

УДК 550.42

М.І. ТОЛСТОЙ<sup>1</sup>, О.В. ШАБАТУРА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НДЧ геологічного факультету, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Васильківська 90, Київ, Україна, 03022

<sup>2</sup>НДЧ геологічного факультету, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Васильківська 90, Київ, Україна, 03022, тел. +38(044)2597023, ел. пошта sand@univ.kiev.ua

## ВИВЧЕННЯ ПРОВІСНИКІВ ЛОКАЛЬНИХ ЗЕМЛЕТРУСІВ ЗАСОБАМИ ЇХ ПРЯМОЇ ОЦІНКИ

**Мета.** Метою досліджень є оцінка застосовності електромагнітних провісників від локальних землетрусів, які формують слабкоамплітудні електродинамічні явища в комплексі з геофізичними і петрофізичними даними. Дослідження просторово-часового зв'язку сейсмомагнітних ефектів із фізичних характеристиками геологічного середовища чутливих до зміни напружено-деформованого стану може бути використане під час створення нових несейсмічних методів прогнозу локальних землетрусів. **Методика.** Результати математичного моделювання часово-просторових характеристик електромагнітного провісника, обумовлених дією пружних хвиль від локальних землетрусів на території Карпатського геодинамічного полігону, зіставлялися з результатами геофізичного дослідження території, що передбачало структурно-геодинамічне картування, еманційну зйомку, еманційний моніторинг, магнітомінералогічне і петрофізичне вивчення ефузивних порід. **Результати.** Розраховані сейсмомагнітні ефекти від серії регіональних землетрусів Закарпаття мають складний просторовий розподіл. Значущі величини сейсмоіндуктивної компоненти намагніченості приурочені до вузьких локальних зон і пунктів підвищеного еманопрояву складного торон-радонового режиму еманування, а найбільші її знакомінні значення зв'язуються з площами розвитку ефузивних порід з генерацією розсіяних феромагнетиків, які містяться безпосередньо в кристалах піроксенів і плагіоклазів. Петромагнітне вивчення феромагнетиків такого типу показує їх належність до фаз високотемпературно-окисленого магнетиту і низькотемпературного маггеміту. **Наукова новизна.** Вперше розраховані часово-просторові характеристики сейсмомагнітних ефектів (приріст електромагнітної індукції  $B_{\bullet}$ ) від слабких землетрусів для території Карпатського геодинамічного полігону і показаний їх фізико-речовинний і структурно-геодинамічний зв'язок з ефузивними породами регіону. **Практична значимість.** За результатами досліджень встановлені локальні зони на території полігону, де спостерігаються значні сейсмомагнітні ефекти і аномальні еманопрояви. Детальні моніторингові спостереження в цих зонах варіацій геомагнітного поля, вимірювання концентрацій  $Rn$  ( $i$   $To$ ) в ґрунтовому повітрі і підземних водах, разом із сейсмометричною інформацією дозволить накопичити широкий експериментальний матеріал для створення надійних моделей електромагнітного провісника землетрусів.

*Ключові слова:* прогноз локальних землетрусів; магнітомінералогія; сейсмоелектромагнетизм; пружні хвилі; часово-просторові характеристики.

### *Вступ*

Враховуючи практики прогнозу землетрусів, доведено, що для локальних землетрусів довготривале прогнозування неможливе внаслідок складності процесу підготовки землетрусу і гетерогенності механізмів реалізації накопиченої сейсмічної енергії, відмінності геологічної будови і фізичних властивостей геологічного середовища. Водночас, ґрунтуючись на вивченні просторово-часової структури електромагнітного поля провісникової зони, є можливість підвищити інформативність їх прогнозування. Враховуючи тісний зв'язок динамічних змін середовища із складом, станом і фізичними властивостями порід регіону, отримана інформація підвищує надійність і достовірність прогнозування локальних землетрусів.

Для підвищення інформативності магнітометричних і сейсмологічних спостережень при прогнозі локальних землетрусів у Закарпатській сейсмоактивній зоні (ЗСЗ), в межах Карпатського геодинамічного полігону (КГП), науковим колективом під керівництвом проф. М.І. Толстого

(2007) був проведений комплекс досліджень [Толстой М.І., 2009]. Акцент досліджень робили на прямих методах діагностики змін геологічного середовища: рядових і моніторингових еманційних вимірюваннях вмісту  $Rn$ -222 в ґрунтовому повітрі і ґрунтових водах, вивчення просторового розподілу локальних варіацій геомагнітного поля, детального структурно-геодинамічного картування території, магніто-мінералогічного вивчення основних петрографічних різновидів гірських порід. Всі застосовані методи, тією чи іншою мірою, засновані на вимірюванні фізичних характеристик геологічного середовища, чутливих до зміни напружено-деформованого стану. Внаслідок того, що геофізичні ефекти змін динамічних умов геологічного середовища різні, мають відмінну величину відклику за амплітудою, тривалістю, формою тощо, то ці методи не є конкурентами, а можуть взаємодоповнюватися. Особливо їх значення збільшується під час аналізу геофізичних ефектів від слабких і локальних землетрусів.

**Мета**

Нерідко перед землетрусами і після них спостерігається вихід в атмосферу радону. Збільшення його концентрації в приземній атмосфері внаслідок розкриття тріщин і пор викликає локальне і варіабельне зростання електропровідності з відповідною зміною геоелектричного і геомагнітного поля [Zotov O. et al., 2013]. Проявляються і інші чутливі електромагнітні ефекти від землетрусів, пов'язані з електрокінетичними, тектономагнітними [Сурков В.В., 1997, 2000; Fujinawa Y. et al, 2011; Guglielmi A. and Zotov O., 2010], магнітогідродинамічними, генерації УНЧ електромагнітних полів тощо [Adushkin V. et al, 2012; Arora B., 2012; Pisa D., et al, 2010; Rikitake T., 1987; Sobisevich L. et al., 2010; Stacey F.D., 1964; Yamada I., Masuda K., Mizutani H., 1989]; і навіть для пошуків пасток вуглеводнів [Revil A. and Jardani A., 2010]. Сьогодні не існує адекватної математичної моделі, в якій би враховувалися всі особливості зв'язку радонового потенціалу з механізмом механоелектричної генерації електромагнітних сигналів, але виявлені численні ефекти в п'єзоелектричних, магнітострикційних, геохімічних та інших характеристиках геологічного середовища [Tate J. et al., 1989; Thomas D., 1988; Hayakawa M., Hobaru Y, 2010; Jain P., Jain S.K., 2014; Uyeda S. et al., 2009]. Метою досліджень є оцінка міри застосовності певного роду електромагнітних провідників від локальних землетрусів, які формують слабкоамплітудні електродинамічні явища і їх вивчення, зв'язок з структурно- і речовинно-чутливими геофізичними індикаторами. Також дослідження просторово-часового зв'язку сейсмомагнітних ефектів із фізичних характеристиками геологічного середовища чутливих до зміни напружено-деформованого стану може бути використане під час створення нових несейсмічних методів прогнозу локальних землетрусів.

**Методика**

Результати математичного моделювання просторово-часових варіацій електромагнітного поля Землі, обумовлених дією пружних хвиль від локальних землетрусів на території Карпатського геодинамічного полігону, зіставлялися з результатами геофізичного дослідження території, що передбачало структурно-геодинамічне картування, еманційну зйомку, еманційний моніторинг, магнітомінералогічне і петрофізичне вивчення ефузивних порід.

**Прямі методи оцінки провідників на Карпатському геодинамічному полігоні**

**Структурно-геодинамічне картування.** Азимутальний варіант структурно-геодинамічного картування (СГДК-А) ґрунтується на виконанні кругового електромагнітного зондування із дискретним кутовим вимірюванням електромагнітних характеристик верхньої частини

розрізу. Збурення азимутальних компонент природного електричного поля становлять собою аномалії, які тією чи іншою мірою проявляються у зв'язку із геодинамічними процесами [Толстой М.І. та ін., 2009]. У цих аномальних ділянках спостерігаються істотні часові варіації азимутальної електропровідності; їх фіксація, подальша обробка спеціальним інтерпретаційним апаратом, дозволяє встановлювати просторове місцеположення, оконтурювати і картувати (табл. 1).

За допомогою дослідів було встановлено, що геодинамічні зони, виявлені методом СГДК-А, становлять диференційовані ділянки різної ширини, які співвідносяться із різноранговими тектонічними порушеннями.

На території КГП виявлено ієрархічно-упорядковану систему геодинамічних зон різних рангів. Перша група геодинамічних зон просторово і генетично пов'язана із Закарпатським глибинним розломом; друга – представлена численними порушеннями субборжавського простягання; третя – зони із азимутом простягання в 30° із різнонапрямленими кутами падіння в крайових частинах Закарпатського прогину (табл. 1, рис. 1).

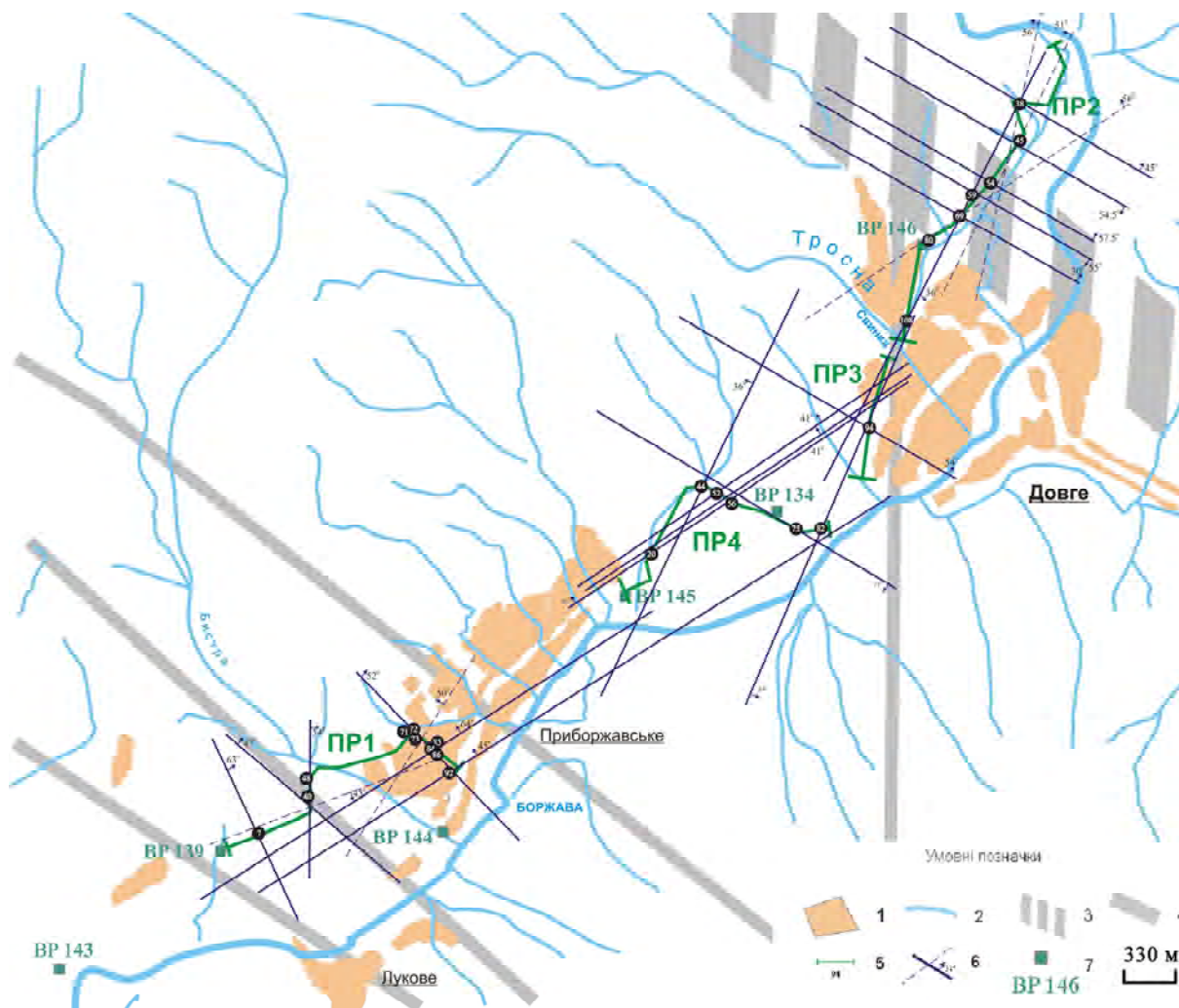
**Еманційні вимірювання.** Доволі показовим є співвідношення геодинамічних зон із розташуванням і функціонуванням еманопроїв на території КГП.

Таблиця 1

**Просторове положення геодинамічних зон КГП, реконструйованих за результатами обстежень СГДК**

ПР	ПК	Векторні характеристики, ° (±15°)		
		простягання	падіння	кут падіння
"Нижнє Селище"	7	60	150	63
1	7	150	60	60
1	40	135	45	47
1	48	0	90	54
1	71	90	180	90
1	72	135	45	52
1	73	120	210	69
1	84	60	330	67
1	85	135	45	66
1	86	60	330	64
1	92	60	330	45
2	38	120	30	45
2	45	120	180	54,5
2	54	120	30	57,5
2	59	120	210	50
2	69	120	30	35
2	80	30	300	55
2	108	30	120	59
3	94	120	30	54
4	20	60	330	45
4	44	30	300	36
4	52	60	330	41
4	56	60	330	41
4	75	120	210	77
4	82	25	115	54

ПР – профіль, ПК – пікет



**Рис. 1.** Структурно-геодинамічні дослідження методом СГДК-А в межах пунктів повторних спостережень геомагнітного поля Карпатського геодинамічного полігону:

1 – населені пункти; 2 – гідрографія; 3 – Закарпатський глибинний розлом; 4 – розломи донеогенового фундаменту; 5 – реконструйовані геодинамічні зони із зазначенням простягання і кута падіння; 6 – профіль, геофізичний пікет з аномальними значеннями СГДК-А; 7 – пункти повторних спостережень геомагнітного поля (BP)

Аномальні радонопрояви узгоджуються із геодинамічними зонами глибокого закладення і великими кутами падіння (геодинамічні зони 1-ї групи); у той час як аномалії змішаної природи – Rn-Tn – просторово приурочені до вузлів перетину геодинамічних зон різних груп (табл. 2).

Магніто-мінералогічні дослідження. Великий інтерес становить вивчення феромагнітних, парамагнітних і діамагнітних мінералів ефузивних порід, їх взаємовідношення з породоутворюючою матрицею і розподіл власної фази тощо [Толстой М.І., 2009]. Кількісний і видовий склад цих мінералів (табл. 3), їхні морфологічні особливості багато в чому контролюються термодинамікою мінералоутворюючого середовища і перебувають у зв'язку з динамічними факторами, а отже, є чутливими до механічних напружень, а у випадку з феромагнітною фазою порід – до сейсмомагнітних ефектів.

Безаномальні субфонові концентрації радону трасують геодинамічні зони субкарпатського

простягання, а також мають ареальне розповсюдження на ділянках із підвищеною потужністю малопроникного осадового покриву [Толстой М.І. та ін., 2009].

*Таблиця 2*  
**Осередненні значення питомої активності еманцій на КГП**

ПР	ПК	ПАЕ, Бк/м <sup>3</sup>				Тип еманопрояву	
	BP144	40				Rn	
	BP144	24				Rn	
1	40	40	27			Rn	
1	72	24				Rn	
4	44	56	193	48	64	56	Rn-Tn
4	56	48				Rn-Tn	
	BP 134	88	177	120		Rn-Tn	
	BP 134	32	144	40		Rn	
	BP 150	24				Rn	
2	ПК38	<20				Rn	
2	ПК54	<20				Rn	
	BP 139	24	40	40		Rn	

Моніторингові вимірювання еманопроявів на КГП показують доволі складний режим ексгалацій радону, що описуються складним циклічним типом ексгалацій з добовими, сезонними, температурними і метеобаричними трендами.

Таблиця 3  
Ваговий вміст мінералів магнітної фракції порід КГП

№	Точки опробування	Вміст мінералів магнітної фракції (г/т)					
		Mag	Hem	Ilm	Pirg	Lim-Ht	Σ
1	с. Брід	1700	110	28	850	140	2808
2	РГС «Берегове»	6,6	1,8	-	31	6,2	45,6
3	с. Нижнє Селище	16	2	-	14	12	44
4	ВР 150	5,5	2	-	99	10	116,5
5	ВР 144	2200	24	24	128	-	2376
6	ВР 134/1	20	-	-	42	38	100
7	ВР 134/2	-	28	-	76	3240	3374
8	ВР 139	112	19	-	261	175	567

Високі значення фактора  $Q$  та високі його кореляційні навантаження із  $J_n$  свідчать про низьку індуктивну складову намагніченості ефузивів [Геохимия, петрофизика и ..., 1976], що разом із значною мінливістю величини і напрямку вектора  $J_n$  свідчить про напружені термодинамічні умови кристалізації феромагнітних мінералів, в

яких відбувалося прогресуюче нарощування кисневого потенціалу на фоні зниження температур кристалізації розплаву.

За величинами магнітної сприйнятливості  $\alpha$  всі ефузивні породи КГП належать до магнітного класу, для них відзначається позитивна з пружними параметрами, залишковою намагніченістю  $J_n$  і намагніченістю насичення  $J_s$  (табл. 4).

Термомагнітний аналіз виявив, що феромагнетики ефузивів представлені декількома фазами: титаномагнетиту, гематит-ільменіту, пірротину, гьотиту. Найвищу магнітність мають магнетики магнетитової фази (ім відповідає III тип термомагнітних кривих – ТМК); дещо понижена магнітність пов'язана з мінералами маггемітової фази (IV тип ТМК). Магнітна фаза, пов'язана із I типом ТМК, свідчить про обстановку низького кисневого потенціалу (низька окисненість заліза за високих температур). У той час, як наявність слідів магнітної фази із ТМК II типу пов'язується з утворенням титаномаггеміту у ході низькотемпературного окислення. Релікти первинного титаномагнетиту виявляються на термомагнітних кривих у появі фаз із низькими точками Кюрі (аж до 150 °C (IV тип)).

Таблиця 4

Петромагнітні і пружні властивості ефузивів Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма (в межах КГП [Геохимия, петрофизика и ..., 1976])

№	Vp	Vs	A	$\alpha$	$J_n$	Q	$J_s$	ТМК			$\theta, ^\circ\text{C}$			$\delta_m, \text{б/р}$		
	км/с		%	$10^{-3}$ од. СГС	б/р	б/р	Гс*см <sup>3</sup> /г	кн	ко	ке	кн	ко	ке	кн	ко	ке
1	5,75	3,26	1,9	1,48	43,9	112	1,14	III	III	III	575	560	560	0,96	1	1
2	5,31	3,03	1,9	0,61	2,18	2,7	0,41	V	III		570	575		1,12	0,93	
3	4,99	3,45	3,4	0,48	1,57	10	0,36		II	III		575	575		1	1
4	5,21	2,73	2,4	0,44	9,1	35	0,42	II	II	IV	250	350	550	1,57	1,42	0,67
5	5,48	3,28	1,3	0,34	0,72	14	0,3		II	IV		550	520		1,39	0,65
6	3,97	2,39	3,4	0,69	10	55	0,3	V	II	III	200	350	300	0,98	1,1	1
7	4,92	2,81	2,2	0,66	3,28	15	0,38		III	II		250			5,32	3,2
8	4,77	2,59	3,6	0,33	1,87	10	0,31	V	III		150	575		1,1	1	
9	5,48	3,12	0,6	0,23	1,41	16	0,25		II			575			1,1	
10	5,84	3,38	1,5	0,82	1,88	9,5	0,51	II	II		200	450		1,83	1,76	
11	5,78	3,34	1,7	1,03	3,21	9,7	0,68	II	III	III	420	540	580	1,32	1	1,01
12	5,64	3,3	2,1	1,11	1,51	4,7	0,75	II	III		360	575		1,35	1,08	

ТМК – тип термомагнітної кривої,  $\theta$  – температура Кюрі,  $\delta_m$  – намагніченість насичення: мінімальна, модальна, максимальна; A – коефіцієнт анізотропії, кн – крива нагріву, ко – крива охолодження, ке – крива еталонна.

Термомагнітний і петромагнітний аналіз показує, що індуктивна складова намагніченості ( $\alpha H$ ) найбільш тісно зв'язана з мінералами, що мають II та IV тип ТМК, а найменше з мінералами III типу. Власне з умовами динамічного зростання кисневого потенціалу (зниження глибинності), за збереження високих температур кристалізації пов'язується утворенням мінеральних фаз II та IV типу ТМК, а також основної маси породоутворюючих мінералів. Для цілей сейсмомagnetизму найбільший інтерес становить генерація розсіяних феромагнетиків, які містяться безпосередньо в кристалах піроксенів і плагіоклазів. Така форма знаходження феромагнетиків істотно змінює

магнітну сприйнятливість цих породоутворюючих мінералів.

Зважаючи, що у кристалах магнетиту з триклинною симетрією по осі  $L_2$  виникає п'єзоэффект, такий кристалографічний тип феромагнетиків є чутливим до механічних деформацій, Перебуваючи в тілі кристала-“контейнера” з деформованими просторовими ґратками (рис. 2), кристал магнетиту сприймає зміну напружено-деформованого стану породоутворюючої матриці, створюючи при цьому додаткову намагніченість.

Такий тип наведеної намагніченості проявлятиметься в областях розвитку порід з відміченою

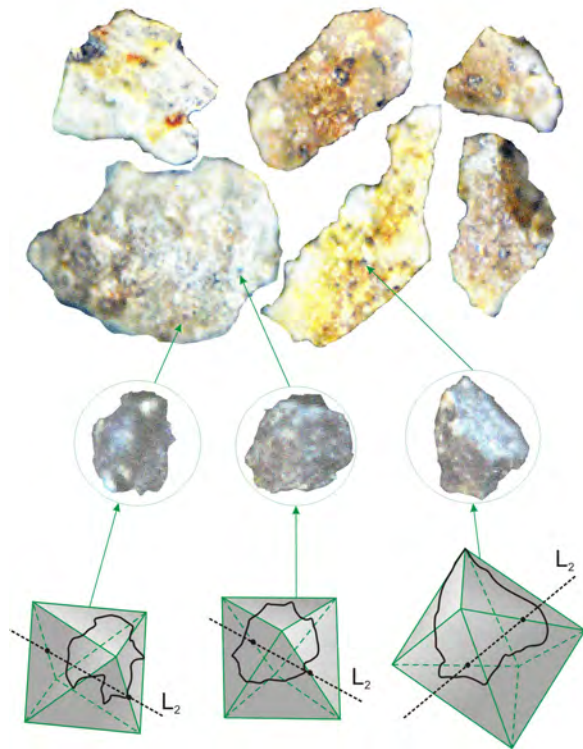
генерацією феромагнетиків. Тому петромагнітний (аналіз компонент намагніченості, терромагнітний аналіз) і мінералого-петрографічний аналіз (видовий і кількісний склад феромагнетиків) дає змогу пояснити природу локальних і інтенсивних ланцюжкових знакозмінних магнітних аномалій і використати їх для сейсмомагнітної оцінки.

**Результати**

Математичне моделювання сейсмомагнітних ефектів локальних землетрусів. Під час переміщення пружної хвилі, перед її фронтом формується квазістаціонарний електромагнітний провідник. Швидкість переміщення сейсмічної хвилі залежить від пружних характеристик середовища, а швидкість переміщення електромагнітного провідника від його електропровідності [Сурков В.В., 1977]. Відповідно до цього для електромагнітного провідника є характерний т.з. просторовий масштаб  $\lambda$ , що залежить від електропровідності середовища  $\sigma$  і швидкості пружної хвилі  $C_l$  [Сурков В.В., 1977; Сурков В.В., 1997, Сурков В.В., 2000]:

$$\lambda \approx C_l t_* \approx \frac{D}{C_l}, \quad (1)$$

де  $C_l$  – швидкість поширення пружних хвиль;  $D$  – коефіцієнт дифузії магнітних збурень або магнітна в'язкість,  $D=(\mu_0\sigma)^{-1}$ ;  $\mu_0$  – магнітна проникність;  $\sigma$  – електропровідність.



**Рис. 2.** Розсіяний магнетит у породоутворюючих мінералах ефузивів КПП (розмір зерен магнетиту  $\leq 0,05$  мм)

Натомість, часова характеристика провідникової області оцінюється параметром  $t_*$ :

$$t_* \approx \frac{D}{C_l^2}, \quad (2)$$

Амплітуда сигналу електромагнітного провідника зростає в міру наближення фронту акустичної хвилі і знижується у разі віддалення від нього. При сталій величині електропровідності верхнього шару осадових порід, просторовий параметр електромагнітного провідника  $\lambda$  лежить в межах 1–100 км, а електромагнітна хвиля буде випереджати пружну хвилю на декілька секунд [Шабатура О.В., 2012].

Результати математичного моделювання часово-просторових характеристик та амплітуди електромагнітного провідника показують, що амплітуда і знак магнітної індукції електромагнітного провідника  $B_*$  знаходиться у залежності від величини електропровідності середовища  $\sigma$  [Сурков В.В., 2000], пружних властивостей (швидкості поширення пружної хвилі, швидкості руху середовища фронту хвилі).

$$\delta B \approx \nu L \mu_0 \sigma B_0 \ll \frac{\nu}{C_l} B_0, \quad (3)$$

де  $\delta B$  – приріст магнітної індукції;  $\nu$  – швидкість руху середовища у сейсмічній хвилі (порядок 2 см/с),  $L$  – довжина сейсмічної хвилі;  $B_0$  – індукція геомагнітного поля.

Із зростанням провідності середовища  $\sigma$  і зменшенням швидкості розповсюдження пружних хвиль  $C$  амплітуда провідника  $B_*$  збільшується, а параметр  $\lambda$  зменшується із відповідними зміною часу випередження електромагнітної хвилі над хвилею сейсмічною.

При типових величинах швидкості середовища у сейсмічній хвилі (порядок 2 см/с), швидкості сейсмічних хвиль 4000–6000 км/с і її латеральної сталості, хвильовий («непровідниковий») режим розповсюдження сигналу реалізується за часу більше ніж 3 с для відстаней, значно більших ніж 16 км із геомагнітним збурення  $\sim 2$  нТл.

Геофізичні оцінки провідників локальних землетрусів. Внаслідок скін-ефекту глибина поширення електромагнітної хвилі сейсмічної природи рідко перевищує сотні метрів, що значно менше від глибини реалізації основної групи землетрусів КПП і тому середня оцінка провідності геосередовища стосується тільки верхніх шарів Землі. Для КПП значення  $\sigma$  лежать в діапазоні  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  См/м.

Величина геомагнітних збурень сейсмічної природи, при типових для КПП електричних і пружних характеристиках, становить перші нТл, а час приходу електромагнітного провідника 2–5 с, радіус провідникової зони  $\epsilon$  – 15–20 км. Із збільшенням відстані реєстрації, фаза електро-

магнітної хвилі, на відміну від сейсмічної, залежатиме від орієнтації вектора індукції місцевого геомагнітного поля і може набувати від'ємного значення (табл. 5).

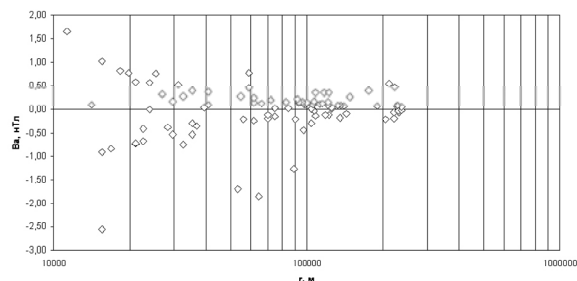
Розраховані сейсмомагнітні ефекти від серії регіональних землетрусів Закарпаття (~100 землетрусів в межах КГП за 1990–2001 рр. [Максимчук В.Ю. та ін., 2005]) показують, що величина магнітної індукції сейсмічного походження  $B_{\bullet}$  залежать від відстані від епіцентра землетрусу до точки реєстрації (рис. 3).

Таблиця 5

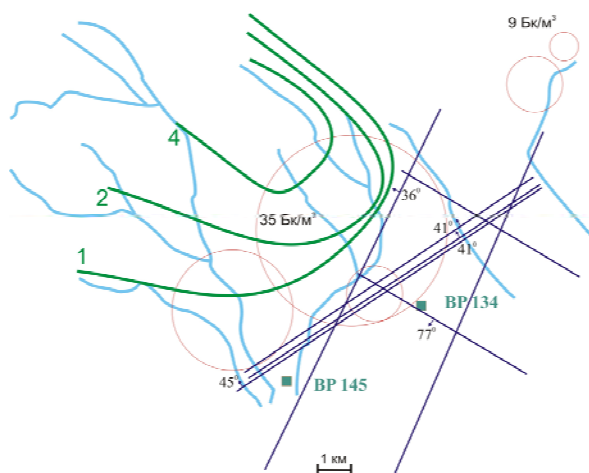
**Геометричні і сейсмомагнітні параметри землетрусів КГП (1990–2001)**  
[Максимчук В.Ю. та ін., 2005] ( $D=79,6 \times 10^6$ ,  
 $C=4,8-6,0$  км/с,  $R=500-2000$  м)

№	г, м	$Q, ^\circ$	$t_2, c$	$B_{\bullet}, \times 10^{11}$	$\lambda_{\bullet}$	$t_{\bullet}$
1	236620	315	10	4,75	16579	3,45
2	226761	316	10	6,41	16579	3,45
3	229577	314	15	-3,13	16579	3,45
4	222535	310	20	46,1	16579	3,45
5	236620	305	10	-1,67	16579	3,45
6	228169	302	15	7,85	16579	3,45
7	230986	300	10	-6,53	16579	3,45
8	221127	300	15	-20,5	16579	3,45
9	221127	295	15	-6,24	16579	3,45
10	147887	290	15	25,3	16579	3,45
11	204225	250	15	-21,5	16579	3,45
12	211268	240	20	54,0	16579	3,45
13	176056	235	20	39,8	16579	3,45
14	122535	315	15	34,4	13263	2,21
15	108451	310	15	35,5	16579	3,45
16	100000	316	10	14,5	16579	3,45
17	104225	311	10	0,25	16579	3,45
18	95775	316	10	15,2	16579	3,45
19	97183	315	10	11,6	16579	3,45
20	92958	310	10	13,8	16579	3,45
21	115493	272	10	12,6	16579	3,45
22	105634	271	10	10,5	16579	3,45
23	83099	265	10	16,2	16579	3,45
24	118310	225	10	-11,9	16579	3,45
25	125352	220	10	1,06	16579	3,45
26	143662	200	10	-9,17	16579	3,45
27	140845	195	15	7,05	16579	3,45
28	104225	194	15	-30,5	16579	3,45
29	97183	193	15	-45,5	16579	3,45
30	71831	315	10	19,6	13263	2,21
31	32394	320	15	-74,7	13263	2,21
32	35211	315	10	39,9	13263	2,21
33	29577	300	10	-53,1	15916	3,18
34	23944	355	10	-0,001	15916	3,18
35	23944	354	10	55,2	15916	3,18
36	21127	359	10	56,3	15916	3,18
37	15493	354	10	102	13263	2,21
38	15493	356	15	-256	15916	3,18
39	21127	30	10	-73,5	15916	3,18
40	26761	32	10	32,4	15916	3,18
41	30986	33	10	50,7	15916	3,18
42	116901	45	15	34,3	15916	3,18
43	107042	50	10	-3,85	15916	3,18
44	190141	70	10	6,39	15916	3,18
45	92958	71	10	16,1	15916	3,18
46	84507	91	10	1,97	15916	3,18
47	125352	91	15	3,98	15916	3,18
48	122535	93	10	-12,2	15916	3,18

№	г, м	$Q, ^\circ$	$t_2, c$	$B_{\bullet}, \times 10^{11}$	$\lambda_{\bullet}$	$t_{\bullet}$
49	9859	100	10	-80,7	15916	3,18
50	29577	280	10	0	13263	2,21
51	35211	275	10	-53,2	13263	2,21
52	15493	225	10	-90,5	16579	3,45
53	22535	230	10	-41,2	16579	3,45
54	19718	234	10	76,4	16579	3,45
55	16901	225	10	-83,0	16579	3,45
56	9859	220	20	135	13263	2,21
57	11268	215	10	164	13263	2,21
58	25352	190	10	74,2	13263	2,21
59	40845	195	10	10,1	13263	2,21
60	36620	200	10	-36,0	16579	3,45
61	21127	180	10	-71,5	13263	2,21
62	22535	175	10	-67,0	13263	2,21
63	14085	135	10	9,46	16579	3,45
64	18310	140	10	80,7	16579	3,45
65	28169	150	10	-38,3	16579	3,45
66	29577	170	10	17,7	16579	3,45
67	40845	140	10	36,2	16579	3,45
68	35211	150	10	-30,6	16579	3,45
69	39437	135	10	3,38	16579	3,45
70	32394	120	10	27,0	16579	3,45
71	61972	120	10	14,1	16579	3,45
72	66197	120	10	13,2	16579	3,45
73	70423	130	10	-19,9	16579	3,45
74	74648	135	10	1,79	16579	3,45
75	56338	136	10	-21,2	16579	3,45
76	54930	140	10	26,9	16579	3,45
77	59155	160	20	44,7	16579	3,45
78	59155	165	15	76,3	16579	3,45
79	94366	159	10	15,0	16579	3,45
80	112676	158	10	10,7	16579	3,45
81	132394	164	10	8,47	13263	2,21
82	107042	165	10	17,6	13263	2,21
83	98592	166	10	9,24	13263	2,21
84	91549	170	15	21,4	13263	2,21
85	90141	168	10	-20,9	13263	2,21
86	74648	169	10	-15,2	13263	2,21
87	53521	169	20	-170	13263	2,21
88	61972	175	10	-24,4	13263	2,21
89	88732	174	20	-127	16579	3,45
90	108451	175	10	-13,9	13263	2,21
91	121127	165	10	15,5	13263	2,21
92	135211	182	20	-18,8	16579	3,45
93	136620	183	10	7,82	16579	3,45
94	121127	183	10	8,82	16579	3,45
95	70423	186	10	-12,9	16579	3,45
96	64789	187	20	-186	16579	3,45
97	61972	184	10	23,8	16579	3,45



**Рис. 3.** Латеральна залежність сейсмомагнітного ефекту для Закарпатської сейсмоактивної зони:  
(у якості опорної точки обрано геомагнітну станцію с. Нижнє Селище КГП)



**Рис. 4.** Розподіл величин приросту сейсмоіндуктивної складової намагніченості у зв'язку із розташуванням еманопроявів та геодинамічних зон на частині Карпатського геодинамічного полігону:

BP – точки вікового магнітного ходу [2], в ізолініях показані величини  $\Delta \varepsilon H$  (зелений колір),  $10^{-8}$  А/м; геодинамічні зони реконструйовані за результатами СГДК із винесеними кутами падіння (фіолетовий колір), колами – питома активність радону в ґрунтовому повітрі (рожевий колір)

Визначено, що для місцеположення геофізичної станції «Нижнє Селище» КГП найбільші амплітуди  $B_*$  фіксуватимуться тільки від найближчих землетрусів, вогнища яких розташовані у сусідніх мінімально-квадратичних кластерах «Міжгір'я-Довге» та «Іршава-Виноградів» [Максимчук В.Ю. та ін., 2005]. Віддаленіші землетруси, зокрема більші за магнітудою, формуватимуть або низькоамплітудні або від'ємні значення  $B_*$ , а також сейсмомагнітні ефекти сейсмічної області (рис. 4). За середньо-зваженими значеннями просторово-часових характеристик електромагнітного провідника від серії сейсмічних подій регіону визначено, що радіус провідникової зони в КГП становить приблизно 16,5 км. Ізометричний вигляд провідникової області значно звужується в полі розвитку ефузивів і підвищеної ексгаляції радону та розширюється для осадових товщ. Симптоматично, що розрахований радіус провідникової області для умов Карпатського геодинамічного полігону близький до середнього розміру мінімально-квадратичного кластеру, визначеного за сейсмологічними даними [Максимчук В.Ю. та ін., 2005], що, на нашу думку, є відображенням своєрідності сейсмогеологічних умов Закарпаття.

Надійність і точність реєстрації електромагнітного провідника залежатиме від коректності визначення низки фізичних параметрів: швидкості сейсмічних хвиль, електропровідності верхніх шарів земної поверхні і іонізованого приземного

шару атмосфери внаслідок еманопроявів, величини і напрямку вектора намагніченості, вивчення складу, концентрації і вмісту феромагнітних фаз гірських порід, структурної будови корінного масиву і поверхневого шару покривних порід.

Розрахунки величин приросту індуктивної складової намагніченості за моделлю електромагнітного провідника і петромагнітних властивостей гірських порід показують їх просторовий зв'язок із пунктами підвищеного еманопрояву складного торон-радонового режиму еманування. Окрім трасування геодинамічних і зон підвищеної проникності радонова ексгаляція приводить до додаткової іонізації повітря продуктами радіоактивного розпаду і, як наслідок, до зростання концентрації іонів в приповерхневому шарі атмосфери товщиною 1–3 м. Цей іонізований шар має більшу електропровідність, спричиняючи приріст магнітної індукції сейсмічного походження.

Конфігурація розподілу значень  $\Delta \varepsilon H$  також контролюється розташуванням геодинамічних зон. Магнітометричні спостереження геодинамічних зон показали їх диференційований характер, де мінімуми магнітного поля збігаються із аномальними ділянками СГДК і найвищими коефіцієнтами анізотропії пружних характеристик.

#### *Наукова новизна і практична значущість*

Вперше розраховані часово-просторові характеристики сейсмомагнітних ефектів (приріст електромагнітної індукції) від слабких землетрусів для території Карпатського геодинамічного полігону і показаний їх фізико-речовинний і структурно-геодинамічний зв'язок з ефузивними породами регіону. В умовах динамічного зростання кисневого потенціалу при адіабатичному зниженні тиску (зниження глибинності) за високих температур в ефузивних породах сформувалася генерація розсіяних феромагнетиків (переважно магнетитів), які містяться безпосередньо в кристалах піроксенів і плагіоклазів. Такий тип порід чутливо сприймає зміну напружено-деформованого стану, індуючи при цьому намагніченість, що виявляється у знако-змінних варіаціях геомагнітного поля. Виявлено, що найвищі градієнти  $B_*$  просторово тяжіють до геодинамічних зон КГП, що мають субборжавське простягання, еманопрояви змішаної природи еманування ( $Rn+To$ ).

#### *Висновки і рекомендації*

Сейсмoeлектричні явища можуть давати різноманітні ефекти електромагнітних збурень комбінованої природи. Теоретичне обґрунтування на цій основі фізичних механізмів і причин електромагнітних явищ показує, що провідники землетрусу проявляються не завжди, і мають доволі жорсткі просторово-часові обмеження.

Дрібномасштабність геоструктури Карпатського геодинамічного полігону із своєрідним зв'язком геологічної будови, тектоніки, геодинаміки, напружено-деформаційного стану, підготовкою і реалізацією землетрусу робить можливою фіксацію позитивних амплітуд величин  $B_e$  електромагнітного провідника у ближній зоні землетрусів локального типу. Це є умовою для детального вивчення електромагнітних провідників землетрусів прямим геофізичними методами. Виявлений на території Карпатського геодинамічного полігону зв'язок геомагнітних варіацій, аномальних радонопроявів, складноспряженої системи геодинамічних зон, зміною намагніченості гірських порід з дією динамічних чинників сейсмічної природи вказує на достатньо сприятливі умови для проведення петрофізичної і мінералогічної оцінки прогнозування локальних землетрусів.

### Література

- Геохимия, петрофизика и вопросы генезиса новейших вулканитов Советских Карпат / Под ред. проф. Толстого М.И. – М.: Вища школа, 1976, 192 с.
- Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат / Максимчук В.Ю., Кузнєцова В.Г., Вербицький Т.З. та ін. – К.: Наукова думка, 2005. – 256 с.
- Сурков В.В. Электромагнитный предвестник сейсмической волны // Геомагнетизм и аэрономия, 1997. Т.38. №6. – С.155–160.
- Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – М.: МГИФИ, 2000.
- Толстой М.И., Кадурин В.М., Шабатура О.В. Палеогеодинамічні властивості порід центральної частини Закарпатської сейсмоактивної зони за даними комплексних геофізичних і мінералогічних досліджень // Київ. у-ту, сер. Геологія, № 47, 2009. – С. 42–47.
- Шабатура О.В. Электромагнітна провідникова модель прогнозування локальних землетрусів // Геодинаміка. – 2012. – №2(13). – С.90–95.
- Adushkin V., Ryabova S., Spivak A. and Kharlamov V. Response of the seismic background to geomagnetic variations // *Dokl. Earth Sci.*, 2012, vol. 444, no. 1, pp. 642–645.
- Arora B., Rawat G., Kumar N. and Choubey V. Multiparameter Geophysical Observatory: gateway to integrated earthquake precursory research // *Curr. Sci.*, 2012, 103, 1286–1299.
- Fujinawa Y., Takahashi K., Noda Y., Iitaka H. and Yazaki S. Remote Detection of the Electric Field Change Induced at the Seismic Wave Front from the Start of Fault Rupturing // *International Journal of Geophysics Volume 2011* (2011), Article ID 752193, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2011/752193>.
- Guglielmi A. and Zotov O. Correlation between Pc1 electromagnetic activity and earthquakes // *Izv. Phys. Solid Earth*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 486–492.
- Hayakawa M., Hobara Y. Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 1, N. 2, 115–155, 2010.
- Jain P., Jain S.K. Investigation of Seismic Precursor Using Correlation Analysis Technique // *International Research Journal of Earth Sciences*, Vol. 2(2), 35–39, March (2014).
- Pisa D., Parrot M., Santolik O. Ionospheric density variations recorded before the 2010 Mw 8.8 earthquake in Chile. // *J. Geophys. Res.* 116, A08309, <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA016611>, p. 8, 2011.
- Revil A. and Jardani A. Seismoelectric response of heavy oil reservoirs: theory and numerical modelling // *Geophysical Journal International*, vol. 180, no. 2, pp. 781–797, 2010.
- Rikitake T. Magnetic and electric signals precursory to earthquakes: an analysis of Japanese data // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1987. Vol. 39. No. 1. – P. 47–61.
- Sobisevich L., Kanonidi K. and Sobisevich A. Observations of Ultra-Low-Frequency Geomagnetic Disturbances Reflecting the Processes of the Preparation and Development of Tsunamigenic Earthquakes // *Dokl. Earth Sci.*, 2010, vol. 435, no. 2, pp. 1627–1632.
- Stacey F.D. The seismomagnetic effect // *Pure Appl. Geophys.* 1964. Vol. 58. No. 11. – P. 5–23.
- Tate J., Daily W. Evidence of electro-seismic phenomena // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1989. Vol. 57. No. 1–2. P. 1–10.
- Thomas D. Geochemical precursor to seismic activity // *Pure Appl. Geophys.* 1988. Vol. 126. No. 2–4. P.241.
- Yamada I., Masuda K., Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1989. Vol. 57. No.1–2. P. 157–168.
- Uyeda S., Nagao T. and Kamogawa M., Short-term earthquake prediction: current status of seismo-electromagnetics // *Tectonophysics*, 2009, 470, 205–213; doi:10.1016/j.tecto.2008.07.019.
- Zotov O. Guglielmi A., Sobisevich A. On magnetic precursors of earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, November 2013, Vol. 49, Issue 6. – pp. 882–889.



**М.И.ТОЛСТОЙ<sup>1</sup>, О.В.ШАБАТУРА<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>НИЧ геологического факультета, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, ул. Васильковская 90, Киев, Украина, 03022

<sup>2</sup>НИЧ геологического факультета, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, ул. Васильковская 90, Киев, Украина, 030226, тел. +38(044)2597023, эл. почта sand@univ.kiev.ua

### **ИЗУЧЕНИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЛОКАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СПОСОБАМИ ИХ ПРЯМОЙ ОЦЕНКИ**

**Цель.** Целью исследований является оценка применимости электромагнитных предвестников от локальных землетрясений формирующие слабоамплитудные электродинамические явления в комплексе с геофизическими и петрофизическими данными. Исследование пространственно-временной связи этих сейсмомагнитных эффектов с физическими характеристиками геологической среды чувствительных к изменению напряженно-деформированного состояния может быть использовано при создании новых несейсмических методов прогноза локальных землетрясений. **Методика.** Результаты математического моделирования пространственно-временных характеристик электромагнитного предвестника обусловленных действием упругих волн от локальных землетрясений на территории Карпатского геодинамического полигона сопоставлялись с результатами геофизического исследования территории, включавшее структурно-геодинамическое картирование, эманационную съемку, эманационный мониторинг, магнито-минералогическое и петрофизическое изучения эффузивных пород. **Результаты.** Рассчитаны сейсмомагнитные эффекты серии региональных землетрясений Закарпатья имеют сложное пространственное распределение. Значимые величины сейсмоиндуктивной компоненты намагниченности приурочены к узким локальным зонам и пунктам эманопроявлений сложного торон-радонового режима эманирования, а наибольшая его знакопеременная амплитуда связывается с площадями развития эффузивных пород с генерацией рассеянных ферромагнетиков, содержащиеся непосредственно в кристаллах пироксенов и плагиоклазов. Петромагнитное изучения этих ферромагнетиков показывает их принадлежность к фазам высокотемпературно-окисленного магнетита и низкотемпературного маггемита. **Научная новизна.** Впервые рассчитаны временно-пространственные характеристики сейсмомагнитных эффектов (прироост электромагнитной индукции) от слабых землетрясений для территории Карпатского геодинамического полигона и показана их физико-вещественная и структурно-геодинамическая связь с эффузивными породами региона. **Практическая значимость.** По результатам исследований установлены локальные зоны на территории полигона, где наблюдаются значительные сейсмомагнитные эффекты и аномальные эманопроявления. Детальные мониторинговые наблюдения в этих зонах вариаций геомагнитного поля, измерения концентраций  $R_p$  (и  $T_o$ ) в почвенном воздухе и подземных водах, вместе с сейсмометрической информацией позволит накопить широкий экспериментальный материал для создания надежных моделей электромагнитного предвестника землетрясений.

Ключевые слова: прогноз локальных землетрясений; магнитоминаралогия; сейсмоэлектромагнетизм; упругие волны; пространственно-временные характеристики.

**M.I. TOLSTOJ<sup>1</sup>, O.V. SHABATURA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Scientific Research Branch of Geology Department of Taras Shevchenko National university of Kyiv, 90 Vasylykivska street, Kyiv, Ukraine, 03022

<sup>2</sup>Scientific Research Branch of Geology Department of Taras Shevchenko National university of Kyiv, 90 Vasylykivska street, Kyiv, Ukraine, 03022, tel. +38(044)2597023, e-mail sand@univ.kiev.ua

### **ON INVESTIGATION OF THE LOCAL EARTHQUAKES PRECURSORS WITH ITS DIRECT PARAMETERIZATION**

**Purpose.** The purpose of research is to assess the applicability of the electromagnetic precursors from local earthquakes that forming low-amplitude electrodynamic effects together with geophysical and petrophysical data. Investigation of the temporal-spatial relationship these seismomagnetic effects with physical characteristics of the geological environment that sensitive to changes in the stress-strain state can be used to create a new non-seismic methods for forecasting of the local earthquakes. **Methodology.** The results of mathematical modeling of spatio-temporal characteristics and amplitudes of the electromagnetic precursor caused by the action of elastic

waves from the local earthquakes in the Carpathian geodynamic area are compared with the results of geophysical researches that include structural-geodynamic mapping, radon survey, radon monitoring, magneto-mineralogical and petrophysical studies of the volcanic rocks. **Results.** The calculated seismomagnetic effects from the series of regional earthquakes of Transcarpathian area have a complicated spatial distribution. Most of seismic-induced of magnetization are confined to local and narrow areas and thoron-radon emanation points. As well there occur areas of volcanic rocks that have scattered ferromagnetic phase in crystals of pyroxene and plagioclase. Petromagnetic studies these ferromagnetics shows that they belong to a high-temperature oxidized phases of magnetite and low-temperature maggemite. **Originality.** First the temporal-spatial characteristics of the seismomagnetic effects (electromagnetic increment) of the local earthquakes of the Carpathian Geodynamic area have been calculated and also a physical and structural-geodynamic aspects of the seismomagnetic effects in the effusive rocks are shown. **Practical significance.** According to the researches the local areas are determined where the significant seismomagnetic effects and the abnormal emanation are occurring. In these points should be set the precise monitoring of the geomagnetic field variations, measuring of Rn (and To) in the soil air and groundwater and analyses of seismometric data that allow to accumulate material for the creation of reliable models of electromagnetic precursor of the local earthquakes.

*Keywords: forecast of the local earthquakes, seismomagnetic effect.*

## REFERENCES

- Tolstoj M.I., Gasanov Ju. L., Moljavko V. G., Ostafijchuk I. M., Serga A. Ju., Prodajvoda G. T., Suhorada A. V. *Geohimija, petrofizika i voprosy genezisa novejsih vulkanitov Sovetskih Karpat* [Geochemistry, petrophysics and some aspects of genesis of update volcanites of the Soviet Carpathian]. Kiev, *Vyshha shkola - High School*, 1976, 187 p.
- Maksymchuk V.Yu., Kuznyetsova V.H., Verbyts'kyj T.Z., Bilins'kyj, A. I., Verbyts'kyj, S. T., Starostenko, V. I. (edit.). *Doslidzhennya suchasnoyi heodynamiky Ukrayins'kykh Karpat* [On researches of update geodynamics of the Ukrainian Carpathian]. Kyiv, *Naukova Dumka - A Science Thought*, 2005, 256 p.
- Surkov V.V. *Jelektromagnitnyj predvestnik seismicheskoy volny* [Electromagnetic precursor of seismic wave]. *Geomagnetizm i ajeronomija- Geomagnetism and Aeronomy*, 1997, Vol. 38, no.6, pp. 155–160.
- Surkov V.V. *Jelektromagnitnye jeffekty pri zemletrjasenijah i vzryvah* [Electromagnetic effects by earthquakes and explosions]. *MGIFI-MSRPI*, 2000.
- Tolstoy M.I., Kadurin V.M., Shabatura O.V. *Paleoheodynamichni vlastyvoli porid tsentral'noyi chastyny Zakarpat's'koyi seismoaktyvnoyi zony za danymy kompleksnykh heofizychnykh i mineralohichnykh doslidzen'* [Paleogeodynamical characteristics of central part of the Transcarpathian Seismic Zone' rocks with combined geophysical and mineralogical investigations]. *Visnyk Kyivskoho Universytety. Ser. Geologija – Kiev University Herald*, Vol. 47, 2009. pp. 42–47.
- Shabatura O.V. *Elektromagnitna provisnykova model' prohnozuvannya lokal'nykh zemletrusiv* [An electromagnetic precursor' model of local earthquakes precursor]. *Heodynamika-Geodynamics*, 2012, Vol. 2(13), pp. 90–95.
- Adushkin V., Ryabova S., Spivak A. and Kharlamov V. *Response of the seismic background to geomagnetic variations* // *Dokl. Earth Sci.*, 2012, vol. 444, no. 1, pp. 642–645.
- Arora B., Rawat G., Kumar N. and Choubey V. *Multiparameter Geophysical Observatory: gateway to integrated earthquake precursory research* // *Curr. Sci.*, 2012, 103, 1286–1299.
- Fujinawa Y., Takahashi K., Noda Y., Iitaka H. and Yazaki S. *Remote Detection of the Electric Field Change Induced at the Seismic Wave Front from the Start of Fault Rupturing* // *International Journal of Geophysics Volume 2011 (2011)*, Article ID 752193, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2011/752193>.
- Guglielmi A. and Zotov O. *Correlation between Pc1 electromagnetic activity and earthquakes* // *Izv. Phys. Solid Earth*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 486–492.
- Hayakawa M., Hobara Y. *Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction*, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 1, N. 2, 115–155, 2010.
- Jain P., Jain S.K. *Investigation of Seismic Precursor Using Correlation Analysis Technique* // *International Research Journal of Earth Sciences*, Vol. 2(2), 35–39, March (2014).
- Pisa D., Parrot M., Santolik O. *Ionospheric density variations recorded before the 2010 Mw 8.8 earthquake in Chile*. // *J. Geophys. Res.* 116, A08309, <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA016611>, p. 8, 2011.
- Revil A. and Jardani A. *Seismoelectric response of heavy oil reservoirs: theory and numerical modelling* // *Geophysical Journal International*, vol. 180, no. 2, pp. 781–797, 2010.
- Rikitake T. *Magnetic and electric signals precursory to earthquakes: an analysis of Japanese data* // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1987. Vol. 39. No. 1. P. 47–61.
- Sobisevich L., Kanonidi K. and Sobisevich A. *Observations of Ultra-Low-Frequency Geomagnetic Disturbances Reflecting the Processes of the Preparation and Development of Tsunamigenic Earthquakes* // *Dokl. Earth Sci.*, 2010, vol. 435, no. 2, pp. 1627–1632.
- Stacey F.D. *The seismomagnetic effect* // *Pure Appl. Geophys.* 1964. Vol. 58. No. 11. P. 5–23.
- Tate J., Daily W. *Evidence of electro-seismic phenomena* // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1989. Vol. 57. No. 1–2. P. 1–10.
- Thomas D. *Geochemical precursor to seismic activity* // *Pure Appl. Geophys.* 1988. Vol. 126. No. 2–4. P.241.
- Yamada I., Masuda K., Mizutani H. *Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture* // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1989. Vol. 57. No.1–2. P. 157–168.
- Uyeda S., Nagao T. and Kamogava M., *Short-term earthquake prediction: current status of seismo-electromagnetics* // *Tectonophysics*, 2009, 470, 205–213; doi:10.1016/j.tecto.2008.07.019.
- Zotov O. Guglielmi A., Sobisevich A. *On magnetic precursors of earthquakes* // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, November 2013, Volume 49, Issue 6, pp. 882–889.

Надійшла 4.11.2013 р.