

УДК 550.34.038.4

С. Кравець, канд. геол. наук, мол. наук. співроб.
E-mail: sergiy@cb-igph.lviv.ua;Д. Малицький, д-р фіз.-мат. наук, проф.
E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua;О. Асташкіна, канд. геол. наук, мол. наук. співроб.
E-mail: Sac1@ukr.netМ. Махніцький, асп.
E-mail: caronerules@mail.ruКарпатське відділення, Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
вул. Наукова, 3-6, м. Львів, 79060 Україна

ДИНАМІЧНІ ГЕОТЕМПЕРАТУРНІ ЕФЕКТИ ТА ЛОКАЛЬНА СЕЙСМІЧНІСТЬ ЗАКАРПАТТЯ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Метою роботи є розв'язання прогностичної задачі сейсмології шляхом встановлення зв'язків між динамікою геотемпературного поля та геодинамічною активністю сейсмічного походження. Проведено аналіз основних чинників, що визначають величину та варіації термального поля. За результатами аналізу, основним фактором, що може спричинити суттєві аномальні динамічні ефекти в геотемпературному полі при підготовці сейсмічної події, є переміщення підземних термальних вод. Рух флюїдів при наявності гідротермальних джерел у регіоні дослідження у підготовчий період землетрусу відбувається досить швидко (від годин, тижнів до місяця), на відміну від кондуктивної передачі тепла від вогнища землетрусу, що дозволяє використовувати глибинні виміри температури як індикатори сейсмічних явищ.

З метою вибору оптимальної методики вивчення геотемпературного поля досліджено низку факторів, які беруть участь у процесах перерозподілу температурного поля у товщі оточуючих гірських порід на станціях Карпатської сейсмічної мережі. Встановлено мінімально необхідну величину глибини вимірів, на якій термічне поле визначається виключно факторами глибинного генезису й не залежить від поверхневих варіацій. Для здійснення точних метео- та температурних режимних спостережень застосовано автономний цифровий мультиканальний термограф, що забезпечує відносну точність вимірювання температури порядку $0,01^{\circ}\text{C}$.

За результатами аналізу тривалих (протягом року із дискретністю спостережень 30 секунд) геотемпературних спостережень середовища у свердловині на станції Карпатської мережі (РГС Берегове) встановлено вплив вогнища землетрусу (джерела поширення сейсмічних хвиль) на аномальну зміну параметрів теплового поля в часі. Отримано результати про аномальну поведінку температурного поля, спричинену переносом термальних вод під впливом механічних процесів та зміною пластових тисків у області вогнища землетрусу району Вранча. Експериментальний матеріал свідчить про те, що можливі відносно короточасні й значні за величиною зміни теплового поля гірських порід, які викликаються перерозподілом тепла з рухом по каналах джерел підземних вод у період посилення тектонічної активності.

Ключові слова: геодинаміка, сейсмологія, геотемпературне поле, моніторинг.

Вступ. Карпатський регіон є одним з найбільш сейсμοактивних регіонів України. За останні сотні років тут зафіксовано ряд досить сильних місцевих землетрусів з силою струшувань у епіцентральных зонах до 7-8 балів за шкалою МСК-64, які спричиняли значні пошкодження житлових будівель, інженерних споруд і матеріальні збитки. Враховуючи постійний розвиток промисловості, транспортної та інженерної інфраструктури на цій території, рівень сейсмічного та сейсмоекологічного ризику тут є досить значним. Оскільки землетруси є одним з проявів регіональних геодинамічних та сеймотектонічних процесів, то комплексні геофізичні дослідження

таких процесів є актуальним завданням для регіону [10-11]. Розроблені під час проведення досліджень методи, апаратура та результати можуть бути використані для інших сейсμοактивних регіонів України.

Геомоніторингові та сейсмопрогностичні дослідження ведуться у Закарпатті уже впродовж десятиріч. За цей час розроблено ряд нових методів та апаратних комплексів для таких досліджень, створено мережу режимних геофізичних станцій (РГС) і пунктів спостережень (рис. 1), зареєстровано ряд геофізичних провісників місцевих землетрусів, досліджено деякі характерні риси сеймотектонічного процесу на даній території.



Рис. 1. Розташування пунктів геофізичних спостережень на території Закарпаття

Одним з найважливіших наслідків діючих у регіоні локальних та регіональних геодинамічних процесів, і, одночасно, одним з найкращих індикаторів таких процесів є деформації в масивах гірських порід. Тому вивченню деформацій як у локальному (на певних об'єктах), так і в регіональному (на відповідних територіях) плані здавна приділяється велика увага. Для таких досліджень використовуються різні методи – геодезичні, деформографічні, нахиломірні та ін. Також важливими є дослідження супутніх геофізичних процесів, зокрема, акустичної емісії та температурного режиму масивів гірських порід, вивчення впливу різних метеофакторів. Представлені у роботі результати є подальшим розвитком попередніх досліджень щодо факторів, які пов'язані з процесами перерозподілу температурного поля у товщі оточуючих гірських порід.

Динаміка теплового поля. У низці факторів, які доцільно розглядати як індикатори підготовки землетрусів, зсувів, карсту, суфозії та ін., неодноразово згадувалися геотермічні чинники. Однак, до теперішнього часу ще не запропоновано обґрунтованої програми вивчення динаміки теплового поля з метою прогнозу розвитку цих небезпечних явищ.

Метою роботи є отримання кількісних оцінок аномальної зміни температурного поля під час підготовки й релаксації динамічних ефектів сейсмічного походження та їх взаємозв'язок. Прогрес, досягнутий в останні роки, що виявився у створенні фізичних моделей [3-5, 8, 12], які пояснюють такі ефекти, створив певні перспективи використання геотемпературних вимірів у Закарпатській сейсмічно активній зоні. Основним елементом, що може пояснити тут аномальні теплові ефекти перед землетрусами, є переміщення підземних термальних вод, викликаних або збільшенням об'єму порового простору (при дилатансії), або зміною порового тиску. Переміщення флюїдів неминує має викликати аномалії температури, геотермічного градієнта й теплового потоку в гірських породах під впливом поширення сейсмічних хвиль [10].

Відомо, що теплове поле у верхніх шарах земної кори складається із величини глибинного теплового потоку та зовнішнього перерозподілу метеотемпературних, термодинамічних, геологічних, геохімічних складових і присутності в осадовій товщі гірських порід джерел геотермальних вод. Також відомо, що в області вогнища в період підготовки та реалізації землетрусу температура змінюється в результаті розуцільнення, зміни теплопровідності, вивільнення тепла при терті блоків порід тощо. Внаслідок низької теплопровідності порід ($0,01-0,1^\circ\text{C}/\text{м}$) [11], теплові імпульси поширюються в них дуже повільно. Так, із глибини 3-5 км, де в основному розташовуються вогнища місцевих Закарпатських землетрусів, тепловий імпульс, рівний по величині фоновому тепловому потоку, дійде до поверхні тільки через 5×10^6 років (за умови тільки кондуктивної теплопередачі, швидкість якої становить близько 1 мм за рік). Тому теплові ефекти, пов'язані з підготовкою землетрусу, не виявляються в поверхневому тепловому потоці. Це підтверджується, наприклад, геотермічними дослідженнями вздовж розлому Сан-Андреас у Каліфорнії (Алан Линд, USGS). За період геотемпературних спостережень там не було виявлено змін теплового потоку, які однозначно можна було б пов'язати з інтенсивною тектонічною активністю, характерною для даного регіону. Відомості про регулярні (режимні) спостереження температури гірських порід у сейсмічно активних районах досить незначні. Авторам відомо лише декілька робіт подібного спрямування [1, 10]. Аналізуючи наявні дані, при наявності гідротермальних джерел у регіоні у підготовчий період землетрусу, теплоперенос має відбуватися досить швидко (від годин, тижнів до місяця). Такі

короткострокові зміни температури термальних вод спостерігалися й під час ряду великих землетрусів на Камчатці, під Ташкентом та в Дагестані [2, 7]. Так, під час Дагестанських землетрусів 1981-2001 рр. відзначалися варіації температури в джерелах води на відстанях понад 230 км від епіцентрів. Виходячи з наведених аргументів, авторами був здійснений аналіз даних режимних метеотемпературних спостережень, які проводяться у Закарпатській сейсмічно активній зоні на геофізичній станції РГС Берегово. За даними таких дослідників, як В. Гордієнко, Р. Кутас, В. Осадчий та інші [1, 9-10], у районі Берегівського горбогір'я значно підвищений (до $0,07-0,1^\circ\text{C}/\text{м}$) вертикальний геотемпературний градієнт, особливо, в районі Берегівського горбогір'я, спричинений високим (до $100-120 \text{ мВт}/\text{м}^2$) глибинним тепловим потоком від існуючого під Закарпатським прогином, Паннонією астеноліту [11] та наявністю широкої мережі підземних джерел води.

Результати досліджень. Геотермічний моніторинг на РГС Берегово проводиться нами впродовж кількох років з метою вивчення та врахування метеотемпературних впливів на результати деформографічних та інших режимних геофізичних досліджень, хоча зараз він поступово виходить на такий рівень, коли буде мати також самостійне значення як метод вивчення локальних та субрегіональних геодинамічних процесів.

Наявний у складі комплексу контрольний температурний канал дозволяє досить детально простежити за змінами температури у штольні РГС.

Геофізична станція Берегово [6] розташована поблизу зони глибинного Припанноньського розлому, на південній границі Закарпатського внутрішнього прогину на відстані 50 км від основної сейсмогенеруючої структури Закарпатського прогину Закарпатського глибинного розлому у районі Берегівського горбогір'я.

Важливо встановити взаємозв'язки факторів, які беруть участь у процесах перерозподілу температурного поля, для дослідження впливу температури на об'єм оточуючих порід для компенсації впливу значення температури на геофізичні дослідження. Щоб виробити потрібну методику вимірювань геотермічного градієнта на території Берегівського полігону, в 2007 році було організовано режимні площинні й глибинні спостереження температури. Для здійснення точних метео- і геотемпературних режимних спостережень застосовано автономний цифровий мультіканальний термограф, що забезпечує безперервний автоматичний запис параметрів з кроком 30 секунд протягом 12 місяців і відносну точність вимірювання температури порядку $0,01^\circ\text{C}$.

Також було встановлено давач температури у гирлі свердловини глибиною 35 м. На таких глибинах температура гірської породи, практично, не повинна залежати від коливань температури на поверхні й має не змінюватися протягом багатьох років. Побудований на основі результатів моніторингових спостережень (2012-2013 рр.) графік (рис. 2) показав вплив на зміну температури у товщі породи з глибиною, що спричинюється сезонними коливаннями температури.

На графіках спостерігається поступове загасання зовнішнього впливу зміни метеотемператури на глибинні шари породи. Отримані експериментальні дані підтверджують сталість температурного режиму порід на глибинах понад 30 м, який залишається постійним впродовж багатьох років та знаходиться в межах $12,3-12,4^\circ\text{C}$, але в період збільшення виділення сейсмічної енергії дозволяє фіксувати аномальне підвищення температури, що спричинене сейсмічною активністю та надходженням глибинних термальних вод. Такі аномальні збурення у тепловому полі, як приклад, показано на рис. 3-4.

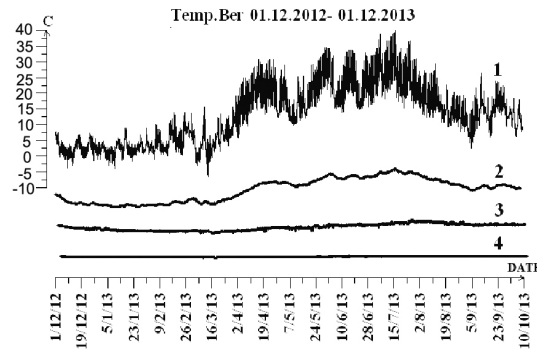


Рис. 2. Зміна температури на РГС Берегово (2012–2013 рр.):

1 – метеотемпература, 2 – температура у ґрунті (глибина вимірювання 0,5 м),
3 – температура у штольні (глибина вимірювання 15 м), 4 – температура у свердловині (глибина вимірювання 35 м)

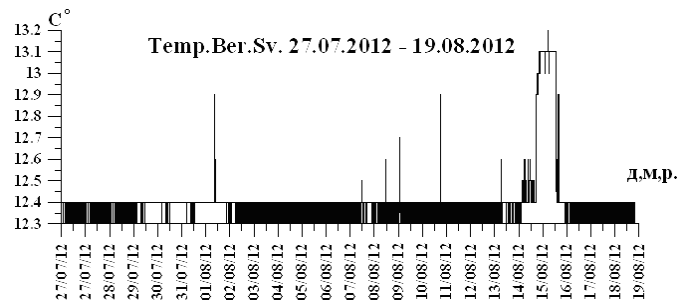


Рис. 3. Аномальне підвищення температури у свердловині РГС Берегово перед повторними поштовхами з 27.07 по 19.08 2012 року. Серія з трьох подій у районі Вранча з глибинами вогнищ (88-113 км)

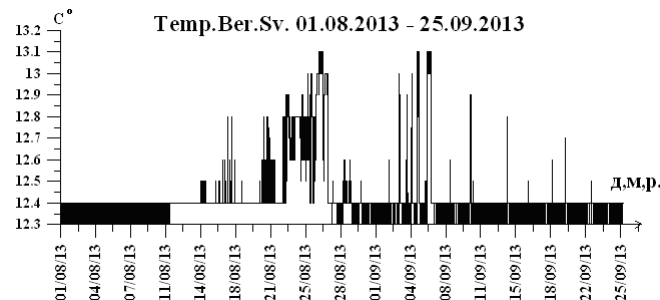


Рис. 4. Аномальне підвищення температури у свердловині РГС Берегово перед повторними поштовхами з 01.08 по 25.09 2013 року. Сейсмічна подія відбулася в районі Вранча 12.08.2013 р., час у вогнищі 22:48:00.0, глибина вогнища 88 км

Висновки. За результатами аналізу тривалих геотемпературних спостережень середовища у свердловині на станції Карпатської мережі (РГС Берегово) встановлено вплив вогнища (джерела поширення сейсмічних хвиль) на аномальну зміну параметрів теплового поля в часі.

Проведено тривалі мультиканальні моніторингові дослідження геотемпературного поля та отримано результати для різнопланового аналізу. Створено банк даних. На підставі аналізу результатів багатоканальних досліджень температурного режиму вимірювальної камери ст. РГС Берегово і навколишнього середовища, виконано відповідні інженерні роботи, що привело до зменшення впливу варіацій температури на геофізичну апаратуру.

Отримано результати про аномальну поведінку температурного поля на глибинах понад 35 м, спричинену переносом термальних вод під впливом механічних процесів та зміною пластових тисків в області вогнища землетрусу району Вранча, експериментальний матеріал свідчить про те, що можливі відносно короткочасні й значні за величиною зміни теплового поля гірських порід, які викликаються перерозподілом тепла з рухом по каналах джерел підземних вод у час посилення тектонічної активності.

Для розвитку методології досліджень і виявлення аномалій у поведінці температурного поля доцільно організувати режимний моніторинг температури та гео-

термічного градієнта на території Закарпатського геодинамічного полігону, зокрема, на геофізичних пунктах спостережень (с. Косино та с. Яноші Берегівського району), відомих гідротермальною активністю у свердловинах на глибинах до 1000 м. На цих глибинах температура гірських порід практично не залежить від коливань температури на поверхні, а може змінюватися тільки під впливом переносу тепла нагрітими водами по підземних каналах при зміні тисків у товщі порід. Саме в цій обстановці теплові ефекти, які пов'язані з переміщенням флюїдів у період підготовки й реалізації землетрусу, можуть бути виявлені найбільш чітко. Для здійснення режимних спостережень необхідно застосовувати автономні термографи, що забезпечують безперервний автоматичний запис параметрів протягом років. Апаратура має забезпечувати точність виміру температури близько 0,001°C.

Список використаних джерел

1. Геотермическая станция ГС-1 / [Аннюк Ф. М., Осадчий В. Г., Филлюс Р. И., Чекалюк Э. Б.] // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. – К.: Наук. думка, 1981. – С. 79–80.
2. Добровольский И. П. Теория подготовки тектонического землетрясения / И. П. Добровольский. – М.: ИФЗ РАН, 1991. – 219 с.
3. Журавчук Л. М. Математичне моделювання нестационарного процесу теплопровідності пригранічними елементами різних типів // Вісник НУ "Львівська політехніка". Сер. Комп'ютерні науки та інформаційні технології, Львів, 2009. – № 638. – С. 124-133.

4. Журавчак Л. М. Нестационарное тепловое поле в неоднородных материалах с нелинейной поведінкою їх компонент / Л. М. Журавчак, Н. В. Забродська // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 1. – С. 33-41.
5. Журавчак Л. М. Розпізнавання об'ємних локальних неоднорідностей за нестационарним тепловим полем / Л. М. Журавчак, Н. В. Шуміліна // Доповіді НАН України. – 2005. – № 10. – С. 42-47.
6. Зубков С. И. Времена возникновения предвестников землетрясений / С. И. Зубков // Изв. АН СССР : Физика Земли. – 1987. – № 5. – С. 87-91.
7. Карпатский геодинамический полигон / Под ред. Я. С. Підстригача и А. В. Чекунова. – М.: Сов. радио, 1978. – 127 с.
8. Кейлис-Борок В. И. Повторный сильный толчок землетрясений: прогноз возможен / В. И. Кейлис-Борок // Наука в России. – 1992. – № 1. – С. 60-63.
9. Кутас Р. И. Тепловое поле Украины / Р. И. Кутас, В. В. Гордиенко. – К.: Наук. думка, 1971. – 112 с.
10. Кутас В. В. Природа объемных волн, регистрируемых в Закарпатье при коровых землетрясениях и промышленных взрывах / Кутас В. В., Дрогичская Г. М., Корчагин И. Н. // Геофиз. журн. – 2003. – 25, № 6. – С. 3-14.
11. Чекунов А. В. Эволюция астенотитов и ее геологические следствия / А. В. Чекунов // Докл. АН УССР, сер. Б. – 1988. – № 3. – С. 30-34, 92.
12. Zhuravchak L. Mathematical modeling of non-stationary thermal field in spatial bodies for recognition of homogeneous inclusions / L. Zhuravchak, N. Shumilina // Proceedings of Sixth International Congress on Thermal Stresses, Vienna, 2005. – Vol. 2. – P. 521-524.

References

1. Annyuk, F.M., Osadchii, V.G., Filyus, R.I., Chekalyuk, E.B. (1981). Geotermicheskaya stantsiya GS-1. *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy i sistemy avtomatizatsii v AN USSR* (pp. 79-80). Kyiv: Naukova dumka. [In Russian].
2. Dobrovolskiy, I.P. (1991). *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya*. Moscow: IFZ RAN, 219 p. [In Russian].

S. Kravets, Cand. Sci. (Geol.), Research Associate
E-mail: sergiy@cb-igph.lviv.ua;

D. Malytsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua;

O. Astashkina, Cand. Sci. (Geol.), Research Associate
E-mail: sac1@ukr.net;

M. Makhnitsky, Postgraduate Student
E-mail: caponerules@mail.ru
Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine
3-b Naukova Str., Lviv, Ukraine 79060

3. Zhuravchak, L.M. (2009). Matematychni modeliuvannya nestatsionarnoho protsesu teploprovodnosti pryhra-nychnymy elementamy riznykh typiv. *Visnyk NU "Lvivska politehnika". Ser. Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnologii*, 638, 124-133. [In Ukrainian].

4. Zhuravchak, L.M., Zabrodskaya, N.V. (2010). Nestatsionarne teplove pole v neodnorodnykh materialakh z nelineinoyu povedinkoyu yikh komponent. *Fiz.-him. mehanika materialiv*, 1, 33-41. [In Ukrainian].

5. Zhuravchak, L.M., Shumilina, N.V. (2005). Rozpiznavannya ob'iemnykh lokalnykh neodnorodnostei za nestatsionarnym teplovym polem. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine – Dopovidi NAN Ukrainy*, 10, 42-47. [In Ukrainian].

6. Zubkov, S.I. (1987). Vremena vozniknoveniya predvestnikov zemletryaseniya. *Izv. AN SSSR : Fizika Zemli*, 5, 87-91. [In Russian].

7. Pidstrigacha, Ya.S., Chekunova, A. (1978). *Karpatskiy geodinamicheskii poligon*. Moscow: Sov. radio, 127 p. [In Russian].

8. Keylis-Borok, V.I. (1992). Povtorny silnyi tolchok zemletriaseniya: prognoz vozmozhen. *Nauka v Rossii*, 1, 60-63. [In Russian].

9. Kutas, R.I., Gordienko, V.V. (1971). *Teplovoe pole Ukrainy*. Kyiv: Naukova dumka, 112 p. [In Russian].

10. Kutas, V.V., Drozhitskaya, G.M., Korchagin, I.N. (2003). Priroda obemnykh voln, registruemykh v Zakarpate pri korovykh zemletriaseniakh i promyshlennykh vzryvakh. *Geofiz. zhurn.*, 6, 3-14. [In Russian].

11. Chekunov, A.V. (1988). Evolyutsiya astenolitov i ee geologicheskoe sledstviya. *Dokl. AN USSR, ser. B*, 3, 30-34, 92. [In Russian].

12. Zhuravchak, L., Shumilina, N. (2005). Mathematical modeling of non-stationary thermal field in spatial bodies for recognition of homogeneous inclusions. *Proceedings of Sixth International Congress on Thermal Stresses*. Vienna, 2, 521-524.

Надійшло до редколегії 15.12.15

DYNAMIC GEOTHERMAL EFFECTS AND LOCAL SEISMICITY OF THE TRANSCARPATHIAN REGION

The aim is to obtain quantitative estimates of abnormal variations upon the influence of temperature field tasting and relaxation dynamic effects of seismic origin and their relationship. Regime monitoring of rocks temperature in seismically active areas was performed. Data analysis in the presence of hydrothermal inflows in the region complexed by earthquakes preparations should occur quickly (by hours, weeks to months). These short-term changes in temperature and thermal waters were observed during several strong earthquakes.

A number of factors involved in the processes of redistribution of temperature fields in the surrounding rock stations of Carpathian seismic network were investigated. The relationship factors were important to establish and to offset the impact of temperature on geophysical surveys. We produced the desired method of measuring the geothermal gradient in the territory of the Base. To make accurate meteorological observations and temperature regime we applied multi-channel stand-alone digital thermograph that provides relative accuracy of temperature measurement order of 0.01°C. The analysis of long-term observations for geothermal environment in the well at the station of Carpathian Network (CSG Coast) were established. We studied the impact of inflow (source of seismic waves) for modification of the abnormal thermal field in time. The results of the anomalous behavior of the temperature field caused by the transfer of thermal waters inflows and the mechanical processes and changes in reservoir pressure in the earthquakes area of Vrancea zone indicates that there may be a relatively of short-term and substantial amount of thermal field of rocks change. They were caused by redistribution of heat with movement along the channels sources of groundwater during strengthening of tectonic activity.

Keywords: geodynamics, seismology, geothermic field monitoring.

C. Кравец, канд. геол. наук, млад. науч. сотруд.
E-mail: sergiy@cb-igph.lviv.ua;

Д. Малыцкий, д-р физ.-мат. наук, проф.
E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua;

А. Асташкина, канд. геол. наук, млад. науч. сотруд.
E-mail: sac1@ukr.net;

Н. Махницкий, асп.
E-mail: caponerules@mail.ru
Карпатское отделение, Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
ул. Научная, 3-б, г. Львов, Украина, 79060

ДИНАМИЧЕСКИЕ ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ЛОКАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗАКАРПАТСКОГО РЕГИОНА

Работа выполнялась для получения количественных оценок аномального изменения температурного поля под влиянием подготовки и релаксации динамических эффектов сейсмического происхождения и их возможной взаимосвязи. Проведены регулярные (режимные) наблюдения за изменениями температуры горных пород в сейсмически активных районах. При наличии гидротермальных источников в регионе в подготовительный период землетрясения, анализ данных должен происходить очень быстро (от часов, недель до месяца). Такие краткосрочные изменения температуры термальных вод наблюдались во время ряда сильных землетрясений.

Исследован ряд факторов, которые принимают участие в процессах перераспределения температурного поля в толще окружающих горных пород на станциях Карпатской сейсмической сети. Важно было установить взаимосвязь факторов для компенсации изменений значения температуры и влияния на геофизические исследования. Чтобы разработать нужную методику измерений геотермического градиента, на территории полигона были организованы режимные площадные и глубинные наблюдения за температурой. Для осуществления точных метео- и температурных наблюдений применен автономный цифровой мультисканальный термограф, обеспечивающий относительную точность измерения температуры порядка 0,01°C.

Впервые установлено по результатам анализа данных длительных геотемпературных наблюдений среды и в буровой скважине на глубине 35 м на станции Карпатской сети (РГС Берегово) влияние очага (источник распространения сейсмических волн) на аномальные изменения параметров теплового поля во времени. Получен результат, свидетельствующий об аномальном поведении температурного поля, вызванном перераспределением термальных вод под влиянием механических процессов и изменением пластовых давлений в области очага землетрясения района Вранча. Экспериментальный материал свидетельствует о том, что возможны изменения теплового поля горных пород, относительно кратковременные и значительные по величине, которые вызываются перераспределением тепла с движением по каналам источников подземных вод во время увеличения тектонической активности.

Ключевые слова: геодинамика, сейсмология, геотемпературное поле, мониторинг.