

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ЯВИЩ

УДК [550.3+551.24]:004(477.87)

DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.15.5>

КОМП'ЮТЕРНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ГЕОЛОГІЧНОГО І ГЕОФІЗИЧНОГО СЕРЕДОВИЩ

Дмитро Малицький¹, Віталій Фурман²

¹*Карпатське відділення інституту геофізики ім. С. І. Суботіна,
вул. Наукова, 3-б, 79060, м. Львів, Україна
dmytro@cb-igph.lviv.ua*

²*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Грушевського, 4, 79005 м. Львів, Україна
fourman@i.ua*

Досягнення методів досліджень останніх років стали можливими завдяки прогресу в апаратній частині і комп'ютерному опрацюванні даних, а також щораз більшим вимогам до геофізичних досліджень забруднених місць Землі. Важливим аспектом є проблема прикладних досліджень у науках про Землю, оскільки питання структуризації середовища важливі для практики не менше, ніж для фундаментальних проблем, тому в багатьох працях можна використати їхні фундаментальні результати для вирішення прикладних проблем.

Сучасні досягнення в науках про Землю ґрунтуються на дослідженнях, де головним завданням є аналіз сейсмічних і гравітаційних даних про будову і динаміку глибинних структур, тому було б неправильним обійти результати інтерпретації даних про тепловий потік, що прямо пов'язаний з розподілом температур у корі та мантії. Незважаючи на прямий зв'язок, виявляється, що інтерпретація цих даних становить велику проблему. Збалансованість або незбалансованість деструктивного процесу і сейсмічності є додатковим чинником довготермінового прогнозу процесів деструкції і сейсмічності. Реальна неоднорідна тверда кора Землі досить складна, тому найінформативнішим видається використання регіонального підходу для аналізу геологічних структур, а не окремих локальних ділянок, а для глобальної моделі планети необхідним є врахування повного набору спостережуваних на Землі структур. Фізичне моделювання для виявлення зв'язку деформації розтягання зі зростанням розривів і зміною їхньої густини під час формування великих розривів засвідчило залежність між названими процесами. Зрозуміло, що подібні дослідження треба провадити в майбутньому для інших блоків регіону, щоб одержати повнішу картину залежностей різних геофізичних полів від тектонічної активності, що відбувається в земній корі. Використання стратиграфічних і літологічних моделей тільки доповнює і підтверджує описаний взаємозв'язок. Важливим аспектом є те, цей аналіз ґрунтується тільки на вірогідно відомих сейсмічних даних, які і є основою для отримання залежності теплового стану мантії від можливих варіацій не тільки температури, але і інших термодинамічних характеристик у різних точках глибинних структур Землі

Ключові слова: моделювання, геофізичні методи, гравітаційні аномалії, тепловий потік.

Дослідження структури розподілу густини кори та мантії має вирішальне значення для розуміння еволюції Землі, тому що саме диференціація густини в мантії, пов'язана з варіаціями як температури, так і хімічного складу, є рушійною силою мантійної конвекції. І все-таки всі наявні інформаційні дані [1-7], які ми наразі можемо мати, недостатні для повного розуміння природи термодинамічних та конвективних процесів, що відбуваються у мантії, хоча вони є ключовими положеннями до пояснення багатьох геофізичних і геологічних явищ в земній корі. Виконаний аналіз можливостей побудови простої самоузгодженої теплової моделі кори [8-11] та мантії Землі та її конвекції, що ґрунтується тільки на вірогідно відомі дані як свідчить про залежність теплового стану мантії від можливих варіацій температури на межі ядро – мантія. Результати такого аналізу [1, 2, 6-12] дають змогу отримати функціональні залежності для розподілів температури і теплового потоку в надрах Землі, обчислити їх, а також спроектувати еволюцію залежно від температур фазових переходів, концентрацій радіоактивних джерел і характеристик теплопровідності верхньої твердої частини мантії і кори Землі. Під час опрацювання вимірних на поверхні значень теплового потоку необхідно визначити і відняти складову, зумовлену теплогенеруванням радіоактивних елементів кори. Крім того, техніка інтерпретації може значно відрізнятися, наприклад, поправку за зміни клімату враховують далеко не всі дослідники. Порівнювати прямо не можна результати, отримані різними дослідниками для різних структур, більшість дослідників дає близькі значення мантійного теплового потоку під кратонами та структурами земної кори (рис. 1). Отже, метод побудови простої самоузгодженої теплової моделі кори та мантії Землі та її конвекції є незалежним від інших методом визначення розподілу температури і теплового потоку у корі та верхній мантії Землі.

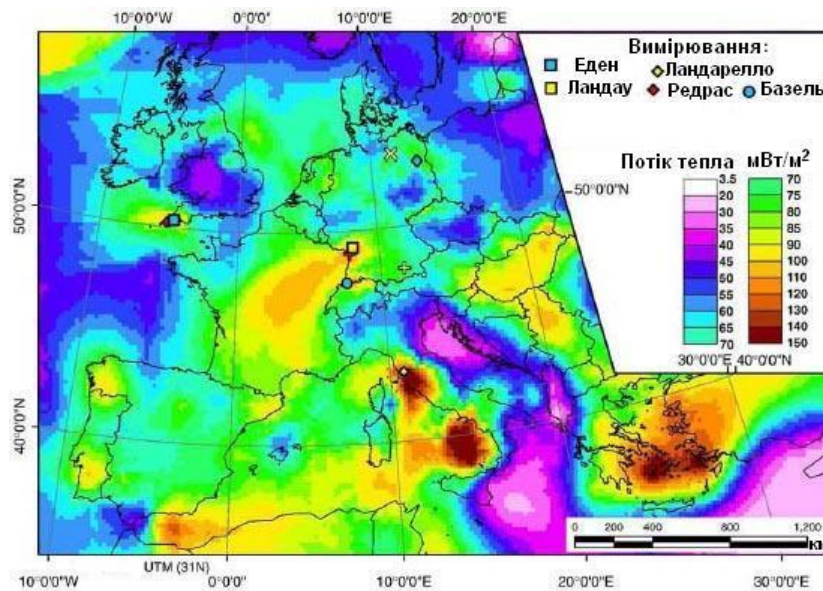


Рис. 1. Теплова мапа Європи, яка описує вимірювання градієнтів температури й інтерпольовані значення даних тепла потоку, взяті з міжнародної бази даних градієнта теплового потоку ($^{\circ}\text{C}/\text{км}$) та розширені додатковими даними [3].

Накопичення тектонічної енергії в надрах Землі спричиняє низку порушень ізостатичної рівноваги земної кори, вертикальне й горизонтальне переміщення літосферних плит і блоків [1, 2-8]. Отже, процеси тектонічної і теплової активізації між собою пов'язані і їх можна зіставляти з динамікою і будовою земної кори на регіональному та локальному рівнях. Сейсмічне зображення не дає змоги визначити фізичні параметри середовища (і в цьому принципова відмінність зображення від моделі), проте за його допомогою можна успішно вирішувати структурні геологічні завдання та підготувати вихідний матеріал для вирішення завдань третього типу – завдань класифікації.

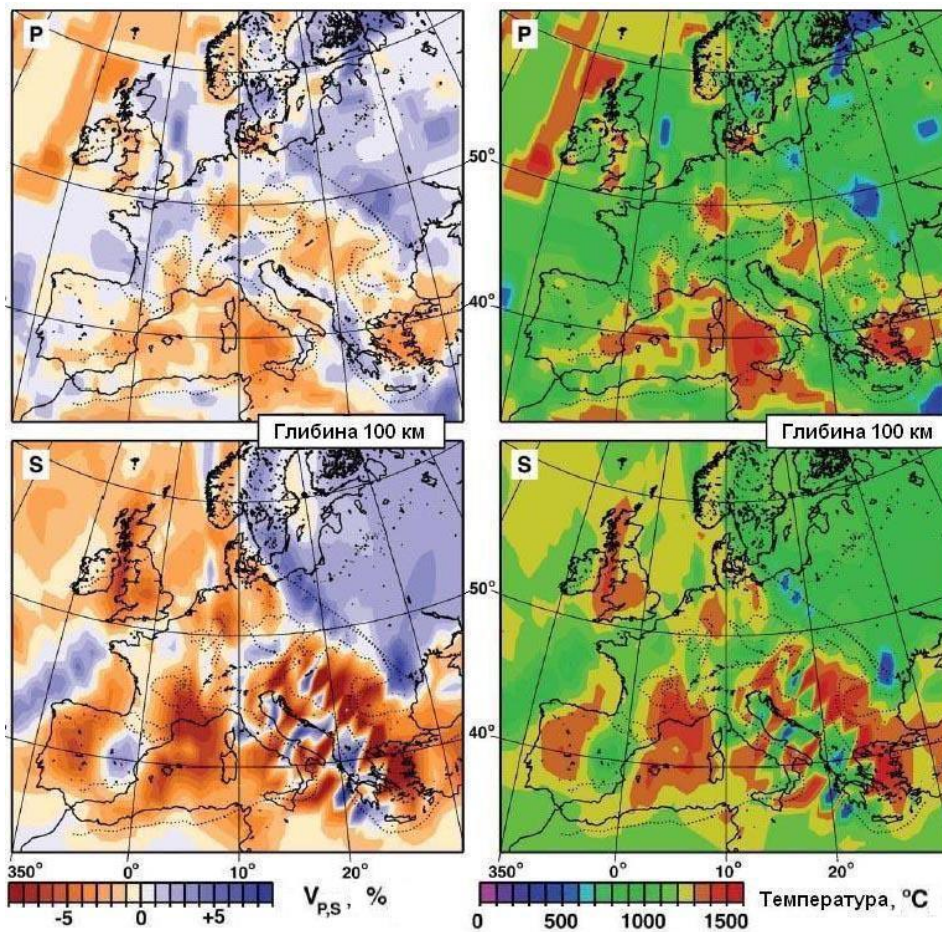


Рис. 2. Сейсмічні аномалії на глибині 100 км під Європою для швидкостей Р-хвиль (ліворуч угорі) і S-хвиль (ліворуч унизу) [3] та кореляція із температурою (праворуч).

Необхідно чітко визначити принципи відбору раціональних розв'язків відповідних задач прояву фізичних полів Землі та фізичної природи явищ у геологічних структурах літосфери й продовжувати дослідження зі створення методик порівняльного аналізу

розв'язку фізичних задач у реальних геологічних системах різної складності та структури. В методиках комп'ютерного моделювання треба враховувати вплив таких реологічних параметрів геологічного середовища, як шаруватість, анізотропія, пластичність та в'язкість, на локальному й регіональному рівнях стосовно задач тектонофізики (рис.2). Зрозуміло, що зазначена закономірність виявляється по-різному під час використання полів різних типів.

Однак її можна так чи інакше простежити і в гравіметричних, магнітометричних, сейсмометричних і електрометричних дослідженнях [3]. Наприклад, у регіональних дослідженнях головна мета гравіметричного методу – побудова щільнісної моделі земної кори. У вивченні локальних структур можливості кількісної інтерпретації зменшуються внаслідок більшої складності досліджуваних об'єктів, а саме через їхній взаємний вплив у гравітаційному полі.

Тут ситуацію, зазвичай, може змінити використання матеріалів інших геофізичних методів, тобто комплексування різних геофізичних методів. Під час регіональних сейсмічних досліджень, наприклад, для глибинного сейсмічного зондування (рис. 3) головне завдання полягає в побудові швидкісної моделі земної кори. У граничному випадку дрібномасштабних досліджень – вивчення Землі загалом – завдання побудови швидкісної моделі також домінує. Однак для вивчення локальних структур [2, 3] головну інформацію дає вирішення завдання побудови сейсмічного зображення.

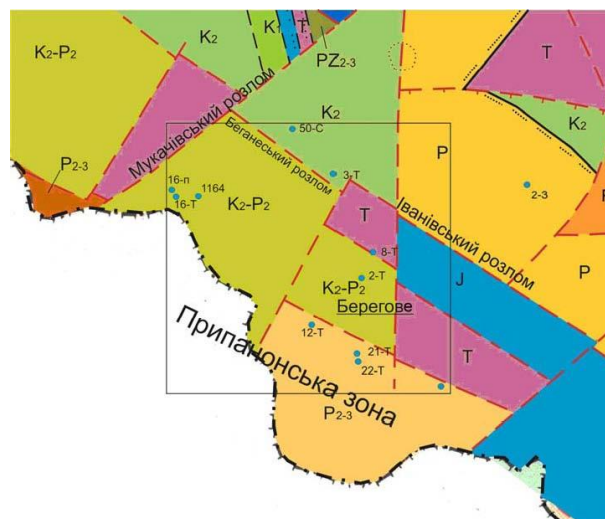


Рис. 3. Геологічна карта досліджуваного району.

Водночас зазначимо про зміну послідовності вирішення геофізичних завдань для різних масштабів досліджень. Регіональні геофізичні дослідження першим вирішують завдання картування та класифікації території на великі структури, потім – детальніше вимірювання характеристик кожної з цих структур, після чого виконують головне завдання – побудову фізичної моделі. У детальних дослідженнях конкретних структур на етапі їхнього промислового використання, коли головним завданням геофізики є класифікація, завдання побудови фізичної моделі і зображення необхідно виконати

раніше. Метод моделювання головний у науці. Створити деяку структурну модель – означає вилучити в досліджуваному об'єкті головні визначальні елементи і відтворити в чистому вигляді їхню взаємодію. Це відтворення, як відомо, можна реалізувати або математично (складанням рівнянь), або за допомогою експерименту. Однак теплопередавання залежить від градієнта температур, і вистигання відбувається швидше там, де градієнт більший. Тобто локальний більший градієнт температур (що виникає незрозуміло як) у природних умовах повинен неодмінно знижуватися.

Система, відповідно до законів термодинаміки, повинна прагнути до термодинамічної рівноваги. Отже, для виникнення і розбіжності градієнтів потрібні надійні джерела енергії. Тому їх потрібно шукати, і не тільки для конвекційних потоків; вони потрібні для горизонтального руху літосферних плит, фактично для руху континентів.

Тривимірні геологічні й геофізичні моделі. Проведення геодинамічних досліджень у Карпатському регіоні України – надзвичайно важливе завдання, тому що на її території простежена підвищена сейсмічна активність. Відомо [3, 14], що геоструктури цього регіону достатньо складні, різні за будовою та інтенсивністю тектонічних процесів. У створенні сучасної геологічної структури Закарпаття важливе значення мають тектонічні розломи. Багато завдань розломної тектоніки Карпат, зокрема, такі, як сучасна активність розломів (рис. 1), їхнє відображення у рельєфі, ще не достатньо вивчені. Комплексні геологічні та геофізичні дослідження можуть дати відповідь на ці питання.

Динаміка земної кори та її тепловий стан перебувають у тісному взаємозв'язку, зумовленому природою глибинних тектонічних процесів. Для розуміння взаємозв'язку різних природних полів Землі багато науковців моделює геологічні та геофізичні середовища з використанням сучасного комп'ютерного забезпечення [1-3]. Геологічна історія Карпатського регіону ще не до кінця з'ясована, що не може не позначитися, наприклад, на характері теплового поля. Ми приділимо увагу проблемі взаємозв'язку тектонічної активності і теплового режиму конкретного блока на території Закарпаття. Мета цих досліджень, з одного боку – відпрацювання методики, а з іншого – вивчення взаємозв'язків температурного поля і тектонічних процесів, що відбуваються в земній корі. Крім того, на підставі даних зі свердловин ми спробуємо побудувати 3D стратиграфічну і літологічну моделі досліджуваного блока.

Наше завдання – побудова 3D моделей геологічних і фізичних середовищ для дослідження взаємозв'язку тектонічної активності з тепловим потоком, стратиграфією і літологією конкретного регіону.

Досліджувані моделі охоплюють територію м. Берегове і прилеглих територій розміром 18×18 км (рис. 3). Використовуватимемо дані, зібрані з 13 свердловин глибинами 900–1600 м, а саме:

- 1) характеристики літосферного складу порід;
- 2) вікові дані порід;
- 3) дані температур на різних глибинах.

Виконано прив'язку цих матеріалів до географічної карти і на підставі цього створено базу даних геологічних і геофізичних характеристик на всіх свердловинах (рис. 4, і табл. 1).

Borehole Data Manager (13 boreholes)

Name	Location	Orientation	Lithology	Stratigraphy	Intervals (I-Data)	Points (P-Data)	Fractures	Water Levels	Symbols	P
<input checked="" type="checkbox"/> 1164										
<input checked="" type="checkbox"/> 12-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 15-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 16-п										
<input checked="" type="checkbox"/> 16-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 19-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 21-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 22-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 2-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 3-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 4-т										
<input checked="" type="checkbox"/> 50-с										
<input checked="" type="checkbox"/> 8-т										
	Depth to Top	Depth to Base	Keyword	Comment						
	0,0	57,2	Clay	Глини						
	57,2	67,8	Sand	Гуфо пісковик						
	67,8	140,0	Tuf	Туфи ліпаритові						
	140,0	148,5	Ignimbryty							
	148,5	199,3	Tuf							
	199,3	212,8	Ignimbryty							
	212,8	260,7	Tuf	Літологічна характеристика свердловини						
	260,7	272,2	Ignimbryty							
	272,2	329,1	Tuf							
	329,1	334,6	Ignimbryty							
	334,6	384,6	Tuf							
	384,6	394,6	Ignimbryty							
	394,6	443,0	Tuf							
	443,0	450,0	Ignimbryty							
	450,0	500,0	Tuf							
	500,0	508,8	Ignimbryty							
	508,8	552,3	Tuf							
	552,3	560,3	Ignimbryty							
	560,3	600,4	Tuf							
	600,4	715,0	Ignimbryty							
	715,0	775,0	Tuf							
	775,0	797,0	Ignimbryty							
	797,0	847,0	Tuf							

Назва свердловини

Рис. 4. Вигляд програмного забезпечення під час створення баз даних [8]

Таблиця 1. Розподіл температур T ($^{\circ}\text{C}$) з глибиною H (м) для досліджуваних свердловин

H	3-Т	2-Т	12-Т	1164	19-Т	50-С	15-Т	4-Т	21-Т	16-П	8Т	16-Т
50	21,2		8	12,6	25	15,8			10	15	20,5	15,6
100	23,2	23	12	14,8	27,4	17,7	16,5		12	19	22,5	18,7
150	25,2	25,5	15,4	17,8	28	19,8	16,5	23,3	15,4	21,3	25	21,3
200	27,1	27,7	18,2	20,9	30,8	23,2	18,5	24,3	18,1	23,9	27	24,3
250	28,4	29,2	21,5	23,9	32	25	21	26	21	26,7	30	27
300	30,3	32,1	24,1	27,2	33,3	27,6	24	27,9	23,5	29,1	38,5	29,5
350	32,2	34,6	26,8	30,7	33,4	29,8	26,5	29,6	26,3	31,7	35	32,2
400	33,7	35,4	29,3	33,4	35,2	32,6	29	33,2	29,4	34,4	37,5	34,8
450	36,3	37,9	31,9	36,2	37,1	35	31,5	33,2	32,5	36,7	40	37,3
500	38,4	40,3	33,6	38,9	39,6	42	33	35,5	34,4	39	42	39,6
550	40,8	42,1	35,5	41,3	41,1	44,3	36	36,6	36,4	41,3	44	42
600	41,5	43,5	36,8	43,5	43	46,8	39,5	37,4	39,2	45,5	46,5	48,8
650	45,8	46	39,6	46,2	45,2	49,5	41,5	39,2	42,5	47,6	49	48
700	49	47	42,5		47,3	50,6	44	40,6	46,3	49,6	50,5	49
750	50,5	49,7	45,5		49,3	52,8	46	41,8	49,2	51,8	52,5	49,2
800	53,1	52,5	48,1		51,3	55,2	48	42,1	52	53	54,5	49,7
850	55,5	54,5	51,8		53,9	58,2	50	44,3	54,8	54,5	56,5	51
900	58	56,9	54,1		55,9	60,9	53	46,4	57,9	55,2	59	55,3
950	60,5		57,6		58	66	56	49,2	59,7		61	58,1
1000	62		60,1		59,8	68,7	59	52,6	62		62,5	
1050	64,8		63		61,6	71,2		55,3	64			
1100	67,4				63				65,6			
1150	70,2				63,7				68,8			
1220	73											

3D-модель теплового поля. За результатами аналізу побудовано тривимірні моделі теплового поля досліджуваного блока за показами температур 13 свердловин, зображені на рис.: 5, а, б. На рис. 6 показано моделі теплового поля за розрізами: N-S, E-W, NE-SW, NW-SE. Із одержаних моделей можна зробити висновок, що тепловий потік зростає в напрямі південь–північ, а це збігається з Мукачівським і Беганським розломами (див. рис. 1). Температурний режим досліджуваного блока пов'язаний з його структурою. Детальніші дослідження заплановано провести в майбутньому з використанням даних температурного режиму досліджуваної території на режимній геофізичній станції (РГС) “Берегове”. Сьогодні на цій РГС ведуть постійний моніторинг за змінами температурного поля на різних глибинах, а деформаційні спостереження за допомогою лазерного реєстратора.

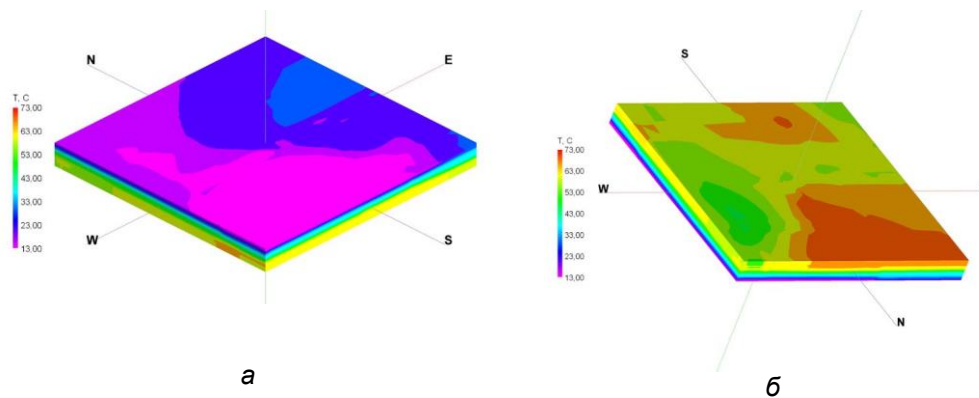


Рис. 5. 3D-модель теплового поля: *a* – вигляд зверху; *б* – вигляд знизу. [1]

Отже, за даними одержаних результатів з'ясовано, що температурний режим досліджуваного блока Закарпаття (квадрат 18×18 км у районі м. Берегове) перебуває у взаємозв'язку зі структурою і тектонічними процесами регіону. За даними 13 свердловин виявлено, що тепловий потік зростає в напрямі південь–північ, що збігається з Мукачівським і Беганським розломами. Зрозуміло, що подібні дослідження треба провадити в майбутньому для інших блоків регіону, щоб одержати повнішу картину залежностей різних геофізичних полів від тектонічної активності, що відбувається в земній корі.

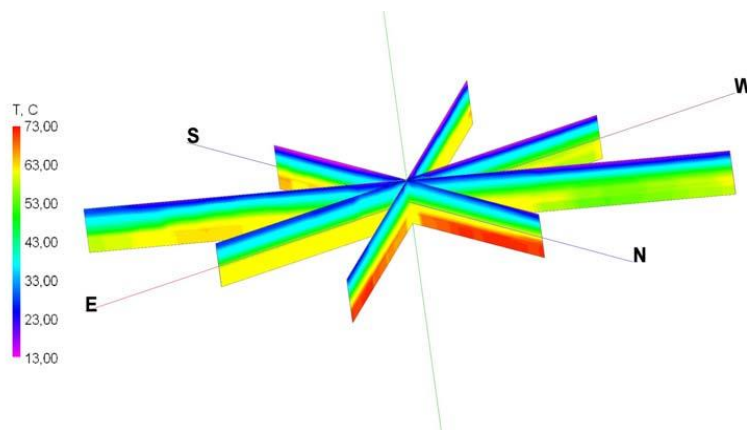


Рис. 6. 3D-модель теплового поля (вигляд у розрізі).

Використання стратиграфічних і літологічних моделей тільки доповнює і підтверджує описаний взаємозв'язок. Важливим аспектом є те, цей аналіз ґрунтується тільки на вірогідно відомих сейсмічних даних, які і є основою для отримання залежності теплового стану мантії від можливих варіацій не тільки температури, але і інших

термодинамічних характеристик у різних точках глибинних структур Землі. Моделюваним середовищем є літосфера Землі, а головними джерелами напружень у ній передбачають сили різниці гравітаційного потенціалу. Тому необхідною умовою для моделювання напруженого стану в літосфері Землі є не тільки розробка і реалізація алгоритмів розрахунку полів напружень, а й підготовка потрібних для цих розрахунків вхідних даних. Відповідно, для розрахунку розподілу по глибині літостатичного тиску на кожній ділянці літосфери треба попередньо розрахувати тривимірну температурно-густинну модель літосфери на підставі розв'язування рівнянь взаємодії кори та мантії Землі. Математичний опис термомеханічної взаємодії літосфери з глибшими областями мантії тривалий час вели окремо для твердої кори і літосфери та в'язкої рідини, що апроксимує стан мантії під літосферою.

У міру побудови нових геодинамічних моделей [7-13], збільшення детальності і точності опису ними тектонічних процесів відбувався перехід від якісного зіставлення до кількісної оцінки параметрів тектонічних процесів і розподілу фізичних властивостей у надрах Землі. Це й дало змогу у кінцевому підсумку сформулювати задачу комплексної інтерпретації геологічних і геофізичних даних у рамках моделей геодинаміки. Геодинамічні активні зони – це обмежені, протяжні в плані ділянки земної кори з концентрацією тектонічних напружень, зумовлених внутрішніми силами Землі та їхньою активністю на сучасному етапі неотектонічного розвитку, для яких характерні знижена міцність, підвищена тріщинуватість, проникність, і, як наслідок, прояви розривної тектоніки, сейсмічності, підіймання флюїдів та інші процеси [1, 2, 5-11].

Список використаних джерел

- [1] Фурман В. В., Хом'як М. М. Моделювання тепловпереносу та теплової дифузії плинів мантійних плюмів мантії Землі // Електроніка та інформаційні технології. 2012. Вип. 2. – С. 105-110
- [2] Фурман В. В. Глобальні моделі сейсмічної томографії у дослідженні верхньої мантії Землі. // Праці НТШ. Том XXX. Геологічний збірник. 2012. – С. 19-33
- [3] Малицький Д. В., Фурман В. В., Сеньківський В. І Використання сучасних комп'ютерних засобів для 3-D моделювання геологічного і геофізичного середовищ. // Вісник Львівського університету. Серія геологічна. 2008. Вип.22. – С. 85-97.
- [4] Russo R. M. et al. Seismic attenuation in the Carpathian bend zone and surroundings // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. Vol. 237. – P. 695–709.
- [5] Regenauer-Lieb K., Yuen D.A. Modeling shear zones in geological and planetary sciences: solid- and fluid-thermal–mechanical approaches // Earth-Science Reviews. 2003. V. 63. –P. 295–349
- [6] Rudge J., et al. A plume model of transient diachronous uplift at the Earth's surface // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. Vol. 267. – P. 146–160.
- [7] Ebbing J et al. Forward and inverse modelling of gravity revealing insight into crustal structures of the Eastern Alps // Tectonophysics. 2001. Vol. 337. N 3–s4. – P. 191–208.
- [8] Goes S. et al. Shallow mantle temperatures under Europe from P and S wave tomography // J. Geophys. Res. 2000. Vol.105. – P. 153–169.
- [9] Andreescu M., Demetrescu C., Rheological implications of the thermal structure of the lithosphere in the convergence zone of the eastern Carpathians // J. Geodyn. 2001. V. 31.

- [10] *Braitenberg C. et al.* Inverse modelling of elastic thickness by convolution method - the Eastern Alps as a case example // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. Vol. 202. – P. 387–404.
- [11] *Bercovici D. et al.* Energetics of a two-phase model of lithospheric damage, shear localization and plate-boundary formation // *Geophys. J. Intern.* 2003. V.52. – P. 581–596.
- [12] *Cloetingh S. et al.* Lithosphere tectonics and thermo-mechanical properties: An integrated modelling approach for Enhanced Geothermal Systems exploration in Europe // *Earth-Science Reviews.* 2010. V. 102. – P. 159–206.
- [13] *Ebbing J. et al.* Forward and inverse modelling of gravity revealing insight into crustal structures of the Eastern Alps // *Tectonophysics.* 2001. Vol. 337. N 3–s4. – P. 191–208.
- [14] *Максимчук В. Ю., Кузнєцова В. Г., Вербицький Т. З. та ін.* // Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. К.: Наук. думка, 2005. – 308 с.

COMPUTER 3D-SIMULATION OF THE HEAT MODE OF THE GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL MEDIUMS

D. Malytsky¹, V. Fourman²

¹*Carpathian branch of Subbotin institute of geophysics,
3-6 Naukova st., 79060, Lviv, Ukraine
dmytro@cb-igph.lviv.ua*

²*Ivan Franko National University of Lviv,
Hrushevskij Str. 4, UA – 79005 Lviv, Ukraine
fourman@i.ua*

Advances in research in recent years have been made possible by advances in hardware and computer-aided data processing, as well as ever-increasing demands for geophysical studies of contaminated Earth. An important aspect is the problem of applied research in the earth sciences, since the issues of structuring the environment are important for practice no less than for fundamental problems, so in many works their fundamental results can be used to solve applied problems. Modern advances in Earth science are based on studies where the main task is to analyze seismic and gravitational data on the structure and dynamics of deep structures, so it would be wrong to bypass the results of the interpretation of the heat flux data, which is directly related to the temperature distribution in the crust and mantle. Despite the direct link, it turns out that interpreting this data is a big problem. The balance or imbalance of the destructive process and seismicity is an additional factor in the long-term prediction of the processes of destruction and seismicity. The real inhomogeneous solid crust of the Earth is quite complex, so the most informative seems to be the use of a regional approach for the analysis of geological structures, rather than individual local areas, and for a global model of the planet it is necessary to take into account the full set of observed structures on Earth. Physical modeling to identify the relationship of tensile strain with increasing breaks and changes in their density during the formation of large breaks testified the relationship between these processes. It is clear that such studies need to be carried out in the future for other blocks of the region in order to obtain a more complete picture of the dependence of the various geophysical fields on the tectonic activity occurring in the Earth's crust. The use of stratigraphic and lithological models only supplements and confirms the relationship described. An important aspect is that this analysis is based only on plausibly known seismic data, which is the basis for obtaining the dependence of the mantle thermal state on the

possible variations not only of temperature but also of other thermodynamic characteristics at different points of the Earth's depth structures. Interrelation of tectonic activity with a thermal stream, stratigraphy and lithology of Beregovo district of Transcarpathian is examined. Materials of Geology party of Beregovo and regime geophysical station (RGS) of Beregovo are executed. Three-dimensional models of thermal field, stratigraphic and lithologic ones were created.

Key words: thermal stream, tectonic activity, design, environment.

Стаття: надійшла до редакції 21.03.2021,
доопрацьована 28.03.2021,
прийнята до друку 29.03.2021