

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ ГЕОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ГЛИБИННИХ СТРУКТУРАХ ЗЕМЛІ

В. Фурман, М. Хом'як, Л. Хом'як

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

Проаналізовано перспективи створення нових фізичних моделей, що описують структури Землі та їхню еволюцію, а також методичних підходів щодо класифікації структур і вимірювання параметрів фізичних полів Землі. Зазначено, що дослідження глибинної будови, складу і геодинаміки літосфери континентів і океанів дає змогу виділити системи, пов'язані з глобальними процесами розвитку Землі (рифти, глибокі некомпенсовані западини, континенти, океани) і регіональними гравітаційними явищами всередині континентів і океанів.

Ключові слова: гравіка, термодинаміка, тектоніка, структури Землі, моделювання, глибинні процеси, фізичне моделювання, глибинна структура, геодинаміка літосфери.

На межі XX і XXI ст. відбувся значний прогрес у розвитку наук про Землю. Зокрема, це стосується і геофізики. Тут виникла низка нових наукових напрямів із власною методологією; новий розвиток одержало також багато вже відомих методів. Позитивним моментом є комплексний підхід до аналізу геологічних, геодинамічних, геофізичних, сейсмологічних і геодезичних даних, що дає змогу наблизитися до побудови реальніших, ніж раніше, моделей будови і розвитку тектоносфери [19–27]. Дослідження глибинної будови, складу й геодинаміки літосфери континентів і океанів дає змогу виділити системи, пов'язані з глобальними процесами розвитку Землі (рифти, глибокі некомпенсовані западини, континенти, океани) і регіональними явищами всередині континентів і океанів (рухливі пояси, кратони тощо). Залежно від складності об'єкта і режиму його розвитку процес моделювання можна також розділяти на низку етапів, для кожного з яких можлива своя особлива модель. Результатом кількісних вимірювань є (і не завжди контрольовані) оцінки кількісних значень параметрів передбачуваної фізичної моделі геологічного середовища. Проте головною в цьому випадку все-таки повинна бути загальна модель об'єкта, з якої виводять усі наступні (часткові) моделі.

Той факт, що величезні материки перебувають у постійному русі, можна пояснити за допомогою двох фундаментальних концепцій:

- джерелом переміщення континентів є конвективні процеси, які відбуваються в глибинних шарах мантії.
- переміщення плит відбувається з відповідними швидкостями, причому на межі плит ці локальні швидкості можуть бути суттєво більшими, а тому ця обставина

дає змогу розглядати процес з позицій кінетичних уявлень, тобто можна використати багатий досвід кінетики деформацій твердих тіл.

Якщо перше твердження достатньо широко обговорюють у науковій літературі, то друга концепція поки що є у тіні, оскільки для вирішення цієї фізичної проблеми недостатньо даних. Уявлення про будову верхніх шарів земної поверхні у вигляді мозаїчного набору твердих фрагментів – плит, що перебувають у постійному русі, стало природним наслідком вивчення теплової конвекції в мантії і фізико-хімічного аналізу коромантійної взаємодії. Власне ці механізми дали змогу пояснити динаміку руху плит, оскільки для цього необхідні джерела енергії достатньої потужності, які здатні бути рушійною силою настільки масштабних явищ у корі та мантії Землі.

Сучасні так звані геологічні моделі руху плит були створені на основі аналізу трьох типів даних:

- смугасті магнітні аномалії в океанах;
- азимути трансформних розломів в осьових зонах серединно-океанічних хребтів;
- азимути векторів зміщень по розривах під час землетрусів у зонах субдукції.

За сукупністю цих даних визначено вектори відносного обертання плит з усередненням за останні 3 млн років. Є декілька серйозних питань, пов'язаних з геологічними моделями плит: чи можна розглядати усереднені за 3 млн років швидкості як сучасні та яка реальна точність геологічних моделей? Це запитання пов'язане з тим, що моделі ґрунтуються на інформаційних даних лише по океанічних областях. Прямі та безпосередні вимірювання сучасними геодезичними приладами дають змогу будувати об'єктивну модель сучасних рухів земної кори. Основою для такого обговорення є уявлення про принцип подібності низки фізичних явищ на різних масштабних рівнях структурної ієрархії тектонічних структур літосфери Землі. Закономірності утворення, нагромадження і розвитку тріщин аналогічні для різних масштабних рівнів. Концентраційний критерій переходу процесу руйнування із нижчих за ієрархією рівнів на вищі спостерігають як для лабораторних зразків з початковими розмірами тріщин ~10–100 нм, так і для кілометрових тріщин у земній корі, які призводять до землетрусів [11, 12].

Геофізика як наука про вимірювання об'єктів геологічного середовища відрізняється від фізики, що вивчає об'єкти, доступні лише для кількісного вимірювання, тим, що охоплює не лише кількісні вимірювання, а й порівняльні та класифікаційні. Це пов'язано з тим, що під час геофізичних вимірювань часто може не бути головного атрибута кількісних вимірювань – моделі похибок. Зазначено, що визначення мантійних температур за даними про спостережений тепловий потік містить чинник невизначеності, пов'язаний із труднощами з'ясування внеску кори за результатами інтерпретації спостереженого теплового потоку. Розвинуто теоретичні основи та програмне забезпечення для методики комплексного аналізу результатів скінченноелементного 2D- та 3D-моделювання термодинамічних процесів у корі та мантії Землі з неоднорідним розподілом густини. Розроблено числовий метод аналізу для комбінованої моделі в'язка мантія – пружний континент, що плаває в ній, з урахуванням контактних умов між ними й однаковості температур верхньої межі мантії та підшови континенту. 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. Цю працю планували як оглядову, щоб розглянути проблеми адекватного опису геодинамічних процесів у різних структурних оболонках

Землі у взаємозв'язку з геофізичними процесами. Для того, щоб проілюструвати ці моменти, розглядаємо ключові геодинамічні чинники, регулювання теплового режиму і стресу в літосфері Континентальної Європи. Спочатку введемо основні поняття про композиційну структуру літосфери та її зв'язок з термічною структурою Землі до близько 100 км за глибиною.

Нові погляди на тенденції зміни глобальної тектонічної структури Південної півкулі з'явилися внаслідок останніх досліджень тектоніки і геодинаміки спредингових хребтів Південної Атлантики [12]. Втрата міцності континентальної літосфери й утворення мобільних поясів, розглянуті в [6–8], ґрунтуються на гіпотезі про інфільтрації водовмісного флюїду з астеносфери. Унаслідок прояву ефекту Ребіндера літосфера втрачає міцність і з'являється можливість подальшого сильного стиснення континентальної кори в складчастий пояс. Низка праць [8, 17, 18, 27] присвячена дослідженню виявів зсувів у земній корі. Зсув наявний у твердому тілі в усіх видах напруженого стану, крім суто гідростатичного. Тому зсувні процеси відіграють важливу роль у формуванні структурних елементів на всіх масштабних рівнях.

Моделювання механізмів формування і перетворення структур. 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. 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'язування фізичних задач у реальних геологічних системах різної складності та структури. У 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. 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 [4, 6–9]. 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. У детальних гравіметричних дослідженнях, наприклад, у рудних районах провідну роль починають відігравати геофізичні аномалії [17, 19, 23, 26, 27].

Під час регіональних сейсмічних досліджень, наприклад, для глибинного сейсмічного зондування (рис. 1) 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 [10, 14, 17] головну інформацію дає вирішення завдання побудови сейсмічного зображення. Водночас зазначимо про зміну послідовності вирішення геофізичних завдань для різних масштабів досліджень. У регіональних геофізичних дослідженнях 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.

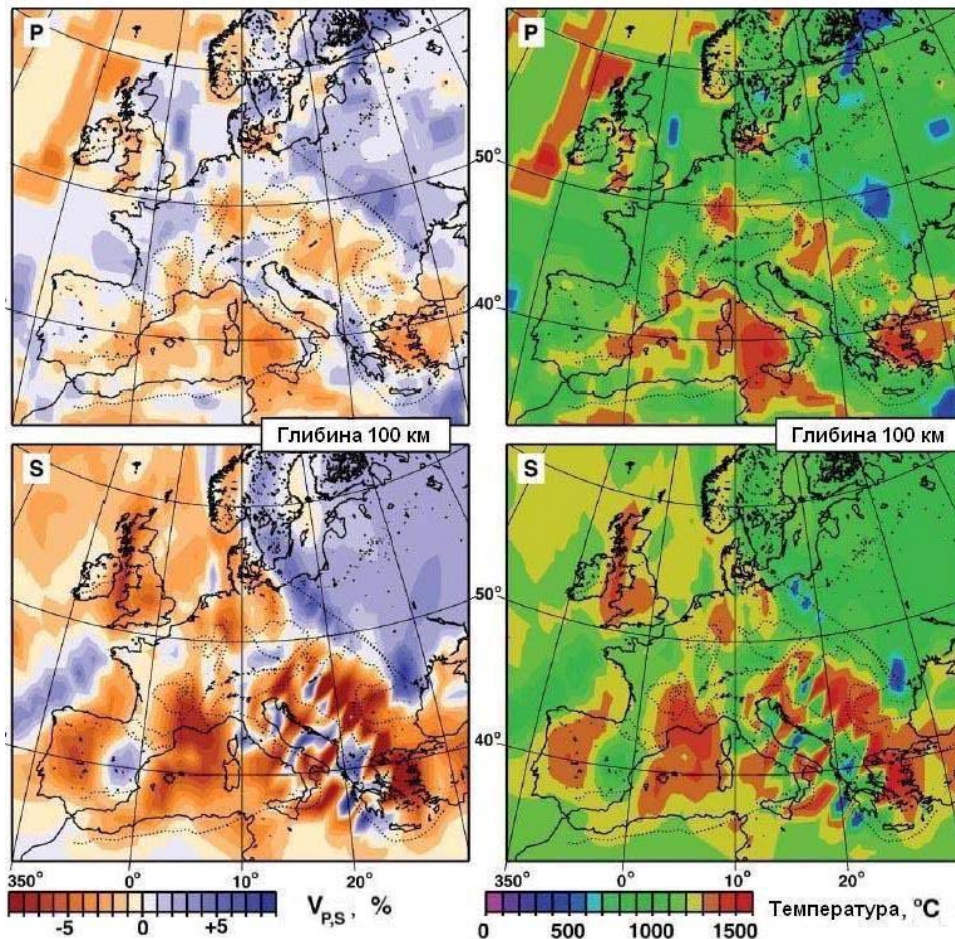


Рис. 1. Сейсмічні аномалії на глибині 100 км під Європою для швидкостей P -хвиль (ліворуч угорі) і S -хвиль (ліворуч унизу) [10] та кореляція з температурою (праворуч).

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. У працях [11, 12] запропоновано якісно новий підхід до проблеми вивчення і моделювання глобальних двошарових структур, характерних для земної кори і верхньої мантії, та започатковано опрацювання геотектонічної концепції,

відповідно до якої Земля має вигляд сфери, внутрішній об'єм якої розігрівається і розширюється, а зовнішня оболонка, вистигаючи і стискаючись, стримує це розширення, зазнаючи відповідного деформування, руйнування і структурування.

Нові уявлення про механізми появи і перетворення блокових структур під час зсувного деформування спочатку суцільного матеріалу, що є в умовах усебічного нерівномірного стиску, отримані [8, 12, 26, 27] внаслідок дослідження процесу подрібнення (тобто утворення безлічі тріщин) зразка за умов деформаційного стиску в товстостінній свинцевій оболонці. Досліджені в цих експериментах фізичні явища характерні для процесів, масштаб яких зумовлений зонами всебічного стиску, що переважають у земній корі і створюють уявлення про механізми перетворення блокових структур у розломних зонах інтенсивних зсувних деформацій. Тектонічні і геофізичні процеси значно спричинені динамікою рухів земної кори, тому необхідно хоча б коротко схарактеризувати ті фізичні процеси, що їх формують.

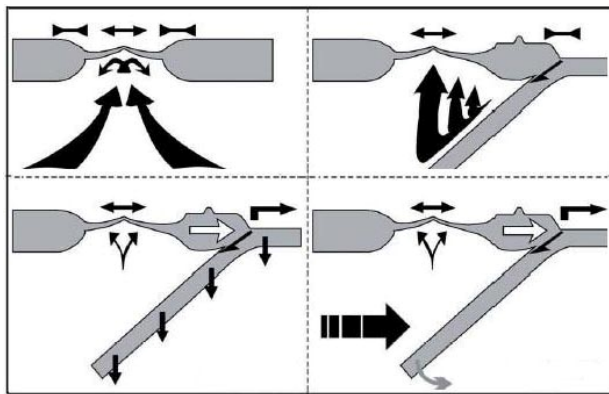


Рис. 2. Моделі, які описують формування та сценарій пізньої стадії розвитку Панонського басейну Карпатської системи під час пізнього міоцену [8] та ілюструють утворення його задугової надбудови, плити згину й етап посторогенного руйнування.

Таких глобальних процесів є два: конвективні та плюм-плини з боку мантії і припливний вплив на Землю із зовнішнього боку. Дослідження конвективних плиннів з використанням теоретичного й експериментального моделювання глибинної геодинаміки повинні визначати вивчення структури двошарової конвекції, а також створити можливість експериментального перебування межі виникнення турбулентного режиму конвекції в горизонтальному шарі, що підігрівається знизу. Тоді можна оцінити енергетичні, тимчасові й просторові параметри теплових плюмів і гарячих точок Землі. Нові уявлення про глобальну динаміку Землі, що узагальнюють і доповнюють концепцію тектоніки літосферних плит, висунуті й обґрунтовані в [4, 12, 15, 22–27] унаслідок досліджень глобальної тривимірної геодинамічної моделі Землі та механізмів формування й перетворення мантійних структур і найбільших структур земної кори. Землю в цій моделі порівнюють з тепловою машиною, у якій мантія відіграє роль теплового казана, океанічні плити – роль рухливих деталей, а континенти – роль клапанів рухомого типу, регуляторів Уатта. Виявлено, що континенти, які плавають на в'язкій мантії, затягуються до місць спадних холодних потоків (зон субдукції) (рис. 2).

Однак у цьому процесі континенти не залишаються пасивними. Завдяки великій товщині континенти гальмують вихід тепла з мантії, що починає прогріватися під ними.

Унаслідок цього під континентом з'являється новий висхідний потік. Конвекція виявляється нестационарною, у мантиї постійно виникають і переміщуються дрібні конвективні потоки. Доведено, що режим нижньомантійних плиннів нестационарний і належить області переходу до турбулентного або розвинутого турбулентного режиму плинну. Знайдено співвідношення між тимчасовими і просторовими масштабами та запропоновано метод моделювання впливу зон субдукції на структуру нижньомантійної конвекції. Вивчення ролі астеносфери в процесі формування великомасштабних тектонічних структур в області континентальної колізії засвідчило, що з порушенням механічної і термічної рівноваги в системі літосфера–астеносфера–верхня мантия в астеносфері розвивається маломащтабна конвекція, поверхневим виявом якої є зростання гірських споруд.

Головні напрями у вивченні тектоніки платформ. Платформи є складовою частиною літосферних плит, і тому багатою особливостей платформної тектоніки можна зрозуміти повніше, якщо їх розглядати на тлі загальніших проблем внутрішньоплитної тектоніки. Крім того, треба мати на увазі, що тектонічні процеси на платформах не обмежені рівнем чохла і фундаменту. У них беруть участь також глибші шари літосферних плит, що потребує вивчення їхньої взаємодії. Прогрес у вивченні тектоніки платформ нині залежить від опрацювання, насамперед, таких фундаментальних проблем (див. також [3, 4, 8, 12]):

- моделі будови й особливості процесів у різних шарах кори від межі М (Мохо) до осадового чохла; взаємодія шарів;
- масштаби і форми тектонічної активності платформ, у тому числі (а з практичних розумінь насамперед) сучасної;
- джерела сил, механізми їхнього передавання і дії; напружений стан літосфери; взаємодія платформ і рухливих поясів;
- речовина: джерела, перерозподіл, перетворення і концентрація (у тому числі у вигляді родовищ мінеральної сировини) під час седиментогенезу і літогенезу та у процесі масообміну між оболонками.

У буквальному значенні ця проблема, можливо, і не тектонічна, проте в ній переплітаються різні чинники, разом із тектонічними і геодинамічними – динаміка осадових басейнів, у тому числі рифтогенез. Одна важлива, проте не завжди усвідомлювана особливість сучасного етапу, що впливає, зокрема, і з зазначеного переліку проблем, полягає в такому: для радикальних проривів у їхньому вирішенні, як і багатьох інших завдань геології, одних традиційних геологічних методів недостатньо. Необхідні мультидисциплінарні підходи, що спираються на матеріали, методи й ідеологію інших галузей знання, таких як геофізика, механіка, геохімія, математичне моделювання тощо. Із наведеного списку ми розглянули питання деформації порід у різних шарах земної кори.

Усі частини кори платформ – осадовий чохол, кристалічний фундамент і глибокі шари кори до межі Мохо – зазнають тектонічних деформацій аж до плинності, що змінює їхню інфраструктуру. Деформація з'явилася під впливом спільної дії сил різної природи: зовнішніх щодо літосферної плити та локальних сил різного масштабу, зумовлених внутрішніми особливостями і, насамперед, неоднорідностями складу та будови кори. Тектонічні течії в низах кори, швидше за все, відповідальні за формування розширеної (відбивальної) нижньої кори, найтісніше пов'язані з процесами метаморфізму, флюїодинамікою і явищами магматичного розшарування. Занурення континентальної

кори (рис. 3) в осадових басейнах протягом тривалого проміжку часу відбувалися в умовах мілководного шельфу з малою швидкістю ~ 10–100 млн років. На окремих етапах у багатьох прогинах швидкість занурення збільшувалася, що часто призводило до утворення глибоководних западин. З областями швидких занурень кори виявилися тісно пов'язані нафтогазоносні басейни, а також зони прояву інтенсивного стискування континентальної кори в складчастих поясах. Швидкі занурення континентальної кори в багатьох областях супроводжувало стрімке розм'якшення літосферного шару [12, 23].

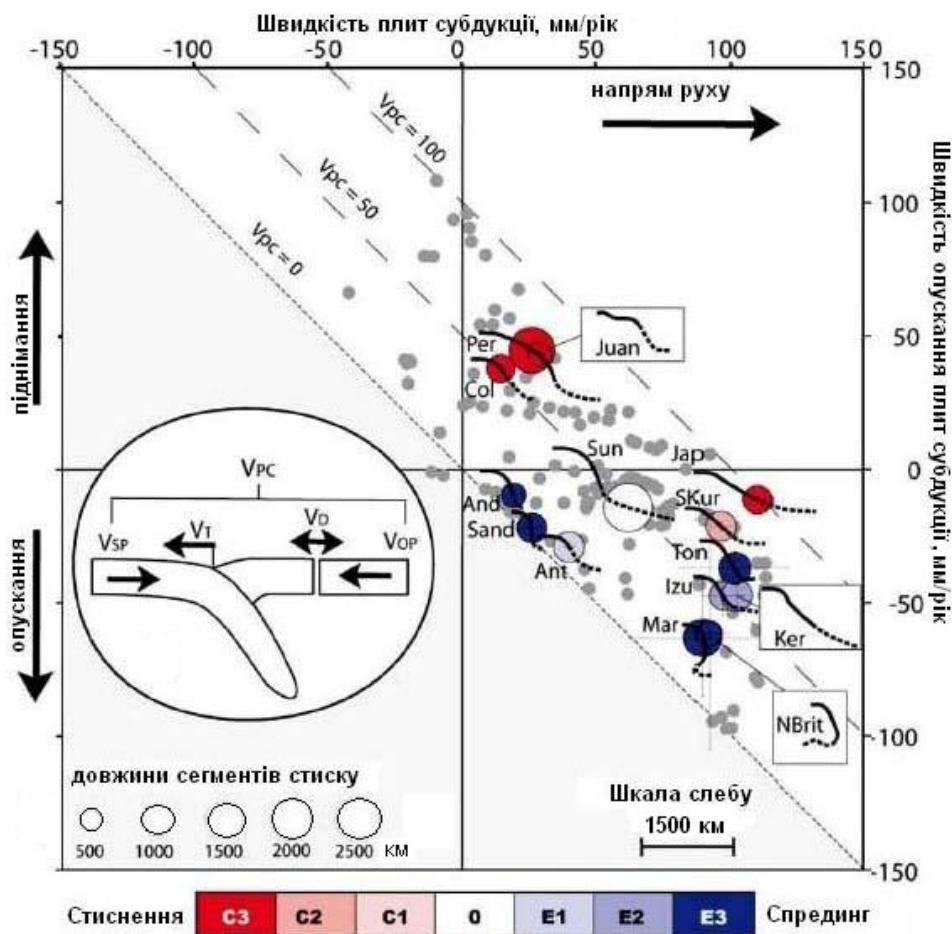


Рис. 3. Структурна модель зони субдукції та взаємозв'язок між кінематикою пластини, формою плити і перевизначення стилю деформації пластини поточних зон субдукції [12]:

V – швидкість, відповідно індекси SP – для субдукційної плити, OP – для насувної плити,
 PC – сумарна швидкість зустрічного руху; T – швидкість руху поверхневого контакту;
 D – швидкість формування насувних деформацій.

Значний обсяг фактичних матеріалів свідчить, що головна частина великих сучасних позитивних форм рельєфу сформувалася внаслідок швидких підняття континентальної

кори, що відбулися за останні 3–5 млн років. Без великих порушень ізоастазії такі підняття свідчать про знещільнення порід у корі або мантії, що відбулося майже водночас на різних континентах. Це знещільнення, очевидно, пов'язане зі стрімким розм'якшенням мантійної літосфери та її частковим або повним заміщенням менш щільною астеносферою. З такої позиції [12, 20–23] розглядають характерні риси та глибинні механізми швидких занурень і піднять континентальної кори [10], супроводжувані значним розм'якшенням літосферного шару, та можливі глибинні механізми цих явищ, що належать до класу широко обговорюваних нелінійних процесів у корі Землі. Останнім часом у літературі широко обговорюють надходження до літосфери великих плюмів, що підіймаються з глибокої мантії [8, 15–18]. Фактично це спроба моделювати процес конвекції, зумовленої підійманням з нижньої частини нижньої мантії із шару D'' сильно нагрітої і тому менш щільної речовини. У реальних умовах підіймання повинно починатися з повільного надходження невеликих мас цієї речовини у вищу, густішу частину мантії, де поступово збирається речовина з шару D'' . Дуже цікавим питанням є глибина області, у якій зароджуються мантійні плюми. З ними пов'язані гарячі точки на континентах і в океанах, вік яких – десятки мільйонів років.

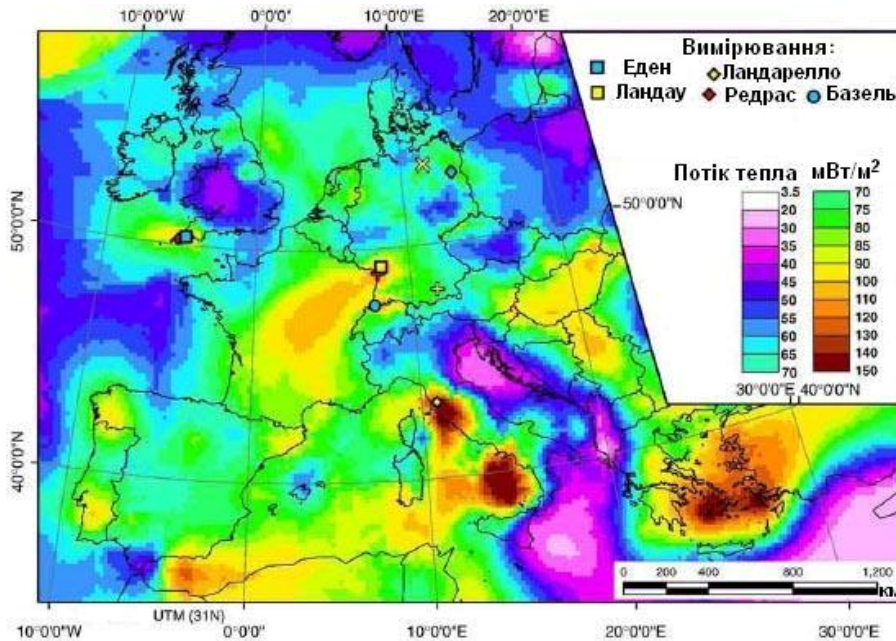


Рис. 4. Теплова мапа Європи, яка описує вимірювання градієнтів температури й інтерпольовані значення даних теплового потоку, взяті з міжнародної бази даних градієнта теплового потоку ($^{\circ}\text{C}/\text{км}$) та розширені додатковими даними [8].

Гарячі точки утворюють систему, у якій після врахування дрейфу різних плит у різних напрямках відносно розташування точок стосовно деякого фіксованого рівня в мантії залишається стабільним, причому гарячі точки переміщуються по поверхні Землі у

бік, протилежний до напрямку дрейфу літосферних плит. Зазначений рівень і повинен бути тією областю, що генерує плюми. Нині вважають, що більшість часу конвективні осередки є окремо у верхній і нижній мантії [12, 13]. Лише в окремі моменти відбувається лавиноподібне занурення в нижню мантію субдуктованих плит океанічної літосфери, що нагромадилися у підшві верхньої мантії. Завдяки порівняній стабільності межа між верхньою і нижньою мантіями теж може бути тим рівнем, на якому утворюються плюми. На цій глибині не зафіксовані, однак, великі латеральні неоднорідності швидкостей пружних хвиль і їхнє підвищене загасання.

Тому ймовірніше, що генерація плюмів відбувається в шарі D'' над межею ядра і мантії. У цьому випадку стабільність взаємного розташування гарячих точок на поверхні Землі суттєво обмежує швидкість плинів речовини в нижній мантії. Їхня швидкість повинна бути не більше ~ 1 см/рік. Такий же висновок випливає і з тієї умови, що перенесення вгору тепла конвективними плинами в мантії не повинне перевищувати теплового потоку через поверхню Землі [14, 15]. Це набагато менше від товщини великих плюмів під літосферою, які оцінюють у декілька сотень кілометрів. Ущільнення кори і мантії в літосфері може також відбуватися і без розтягу – під час їхнього охолодження після сильного попереднього нагрівання знизу (рис. 4).

Нагрівання супроводжує розширення порід з утворенням на поверхні Землі великого підняття висотою ≥ 1 км. Підіймання до кори астеносфери, що заміщує холодну і щільнішу мантію в літосфері, також повинно супроводжувати утворення на поверхні підняття висотою ≥ 1 км. У мантії Землі утворюються конвективні плинні речовини. В одних місцях вони піднімають літосферу, в інших – занурюються нижче рівноважного рівня. Можна також припустити, що цей механізм здатний забезпечити занурення кори, що, з урахуванням ізостатичного занурення під навантаженням осадів, може призвести до утворення осадових басейнів глибиною до ~ 3 – 4 км.

Особливості моделювання геодинамічних ситуацій. 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. За допомогою математичного моделювання опрацьовано алгоритм розрахунку глибин проникнення розломів, що розвиваються в різних геологічних умовах. Зроблено висновок про збалансованість розломоутворення й сейсмічності загалом по рифтовій зоні і про незбалансованість процесів на її флангах. 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 за-свідчило залежність між названими процесами.

Виявлені структурні перебудови у формуванні мережі розривів, що випереджають різні стадії зародження і розвитку великого розлому, відображені у фрактальних розмірностях, що водночас добре корелюють з деформацією в зонах великих розломів літосфери. Важливим і невирішеним завданням внутрішньоплитної тектоніки є відтворення реальних геодинамічних моделей для різних ситуацій, що враховують внесок головних

діючих сил і взаємодію різних шарів літосфери [16, 22] від осадових чохла до нижніх горизонтів кори. Щодо цього вагомими є праці [24–28] з аналізу геодинамічної ситуації в Альпійській структурі [9]. Моделювання природної еволюції розвитку Трансальпійської системи засвідчує важливість комплексного геофізичного аналізу середовища, де розвивалась геодинамічна ситуація. Механізми формування структур на різних масштабних рівнях можуть суттєво відрізнятися і залежати не тільки від напружень та деформацій [9], а й характеру переважного типу руху, що є відображенням неоднорідності земної кори і великої розмаїтості її структур. Ієрархічна структура блокової будови геофізичного середовища додає їй нових рис. Вона не тільки полегшує деформування під дією прикладених сил, а й фіксує напрям переміщень, що відбуваються внаслідок локалізації деформацій і переміщень по межах блоків. Наявні нині структури з'явилися унаслідок тривалої природної еволюції і формувалися якісно й кількісно такими, щоб забезпечити найекономніше (енергетичне) деформування кори.

Вхідні дані моделі Східних Карпат [8, 11, 14] складаються з такого: температур як похідних від аномалій сейсмічних швидкостей *P*-хвиль і поверхневого стоку тепла, густини земної кори і верхньої мантії, перетвореної з *P*-хвиль, що виходять із сейсмічних досліджень заломлення, з томографії геометрії кори Вранча і плити та заломлення сейсмічних даних, оцінками швидкостей деформацій в плиті (унаслідок землетрусів), щоб обмежувати моделі в'язкості. Основна мета дослідження – зрозуміти взаємозв'язок між середньою глибиною великого землетрусу в Південно-Східних Карпатах (Вранча) і тектонічними стресами, спричиненими високою швидкістю тіла (літосферної плити), що занурюється в мантію у регіоні. Для аналізу процесів генерування напружень і локалізації їх усередині й навколо зони зменшення плити розроблено тривимірну (3D) числову модель сучасного мантійного потоку і стрес під регіоном Вранча. Ми також вважаємо, що основну причину підняття земної кори прогнозують ті моделі, які збігаються з орогенезом Східних Карпат і оточенням трансільванського басейну та передбачають, що області занурення пов'язані з Мізійською і Східноєвропейською платформами. З'ясовано [8], що є кореляції між розташуванням проміжної глибини землетрусів і передбачуваними локалізаціями максимального напруження зсуву [13]. Моделювання тектонічних напружень дає змогу передбачити велике горизонтальне стиснення на глибині близько 70–220 км під регіоном Вранча, яке збігається з напруженням режиму, визначеним у площині поділу проміжної глибини землетрусів. Це означає, що плавучість спуску літосферної плити під регіон Вранча безпосередньо пов'язана з проміжною глибиною сейсмічності.

Вивчення взаємного впливу структури і деформаційних процесів у корі є необхідним для сучасного пізнання фізичних процесів у Землі. Деформації в корі платформ зручно розглядати окремо для осадового чохла і фундаменту платформ, для верхньої і нижньої частини кори. До того ж нижня кора континентальної літосфери має особливі фізичні властивості і, очевидно, відмінний від верхньої кори стиль тектоніки. Кора платформ, як тепер відомо, не є тектонічно пасивною. З нагромадженням експериментальних даних і удосконаленням методів дослідження з'ясовують, що на всіх глибинних рівнях вона підлягає тектонічним перетворенням. Це виявляється в різних ознаках, проте найбільше – у сучасній геодинамічній активності: у сильніших, ніж здавалося раніше, сейсмічно активних порушеннях, сучасних рухах земної поверхні, тектонічних напруженнях, зумовлених тектонікою проникністю фундаменту і чохла для флюїдів і газів. Це

стосується і тектонічних деформацій. Назвемо кілька типових обставин виявлення внутрішньо-плитних деформацій фундаменту й осадового чохла, які розрізняються місцем розташування на літосферній плиті, стилем, масштабом і глибиною проникнення деформації, джерелами і механізмами. Порівняння та зіставлення різних методів розрахунку механічних, термодинамічних та гравітаційних характеристик регіону (рис. 5) свідчать про виразну кореляцію отриманих розрахунків. Також зазначимо, що отримані результати підтверджують переваги використання регіональної, а не локальної компенсації у розрахунках ізостаційної ситуації Альпійської системи та прилеглих регіонів.

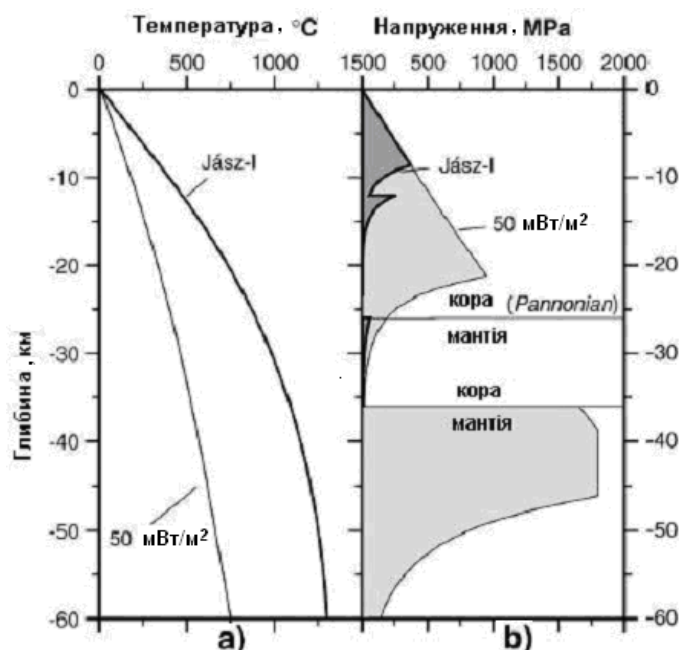


Рис. 5. Термомеханічні властивості і зв'язок геотерм з реологічними характеристиками середовищ геологічних гірських споруд Південно-Східних Карпат [13].

Згідно з поширеними уявленнями, під навантаженням насунутої плити – тектонічного покриву – відбувається пружний вигин плити, що підсувається, з утворенням передового прогину перед фронтом покриву [10–16]. У низці випадків навантаження покриву недостатнє для пояснення занурення, зафіксованого в передовому прогині за умов збереження рівноваги регіональної літосфери та важкої плити океанічної літосфери [11]. У загальному випадку виділяють три типи геофізичних завдань – побудова фізичних моделей об'єкта, одержання зображення об'єкта в геофізичних полях і геологічна класифікація об'єктів.

Головна розбіжність між цими завданнями полягає в співвідношенні кількісно оцінюваної точності та геологічної інформативності одержуваних результатів, що впливає з принципу додатковості цих характеристик [9, 13–23]. Під час конкретних геофізичних досліджень співвідношення значень важливості різних геофізичних задач в одержанні геологічної інформації залежить від декількох чинників: типу використовуваних полів, масштабу геофізичних досліджень, рівня розвитку конкретного геофізичного методу, ступеня комплексування різних геофізичних методів у цих дослідженнях та інтегруван-

ня цих досліджень з геологічними, гідродинамічними, геохімічними й іншими видами досліджень геологічного середовища.

Необхідно виявити вплив кожного з перерахованих чинників окремо, що, природно, можливе тільки завдяки ілюстрації випадків, у яких вплив усіх інших чинників ослаблено. Головна мета тут полягає в побудові моделі розподілу густини середовища з використанням інформації, отриманої під час аналізу інших геофізичних полів. Для вивчення ж геологічного середовища за сейсмічним полем нині найважливіше значення має формування його сейсмічного зображення. Завдання побудови швидкісної моделі середовища відіграє тільки допоміжну роль, оскільки наближення сейсмічного зображення є значно вищим, ніж наближення сейсмічної моделі. Загалом же можна зазначити, що у впливі масштабу досліджуваного об'єкта з розмірами об'єктів, доступних для безпосереднього їхнього спостереження. Для цього недостатньо побудови фізичних моделей досліджуваних об'єктів, а необхідне їхнє високороздільне зображення в геофізичних полях і їхня геологічна класифікація по цих полях.

У створенні напружень і деформацій на платформах беруть участь сили різної природи [4]. Їхнє вивчення нерідко становить практичний інтерес для виявлення загалом рухливих ділянок у межах тектонічно стійких площ. Найочевидніші з них такі:

- а) зовнішні сили, прикладені, здебільшого, до меж літосферних плит;
- б) сили ротаційного походження, у тому числі припливні;
- в) сили, що з'являються внаслідок надходження енергії (тепла) з мантії;
- г) локальні сили, зумовлені неоднорідністю реального середовища.

Їхня поява може бути спричинена або подачею енергії ззовні, що порушує рівноважний стан середовища і є спусковим механізмом для процесу деформації, або з'являтися як ефект неоднорідного, градієнтного середовища, що прагне до рівноваги, навіть без додаткового надходження енергії. На жаль, короткочасність вимірювання та невеликі значення деформацій роблять такий аналіз дуже трудомістким. Застосування геофізичних методів дослідження (електричних, магнетних, гравіметричних, термічних) є одним із важливих джерел наших знань про внутрішню будову Землі. На сучасному етапі достатньо розроблена теорія розв'язування прямих та обернених задач [3–6], польові вимірювання можна виконувати приладами високої точності з використанням GPS- та GIS-технологій, професійні програмні продукти допомагають у побудові профілів та інтерпретації спостережуваних аномалій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Глушко В. Геотраверс III по линии Городок – Коломыя – Рахов масштаба 1:200 000 / В. Глушко, С. Круглов, С. Смирнов [и др.] // Материали по глубинному строению и геологическому развитию Украинских Карпат и их платформенного обрамления: под ред. В. В. Глушко (на 2-х листах). – УкрНИГРИ, 1980.
2. Фурман В. В. Особливості фізичних моделей глибинних процесів Землі / В. В. Фурман, М. М. Хом'як, О. Р. Дацюк // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол. – 2003. – Вип. 17. – С. 24–32.
3. Фурман В. В. Особливості моделювання геодинамічних процесів та термодинамічні характеристики глибинних структур Землі / В. В. Фурман, О. М. Павлюк // Вісн.

- Львів. ун-ту. Сер. геол. – 2004. – Вип. 18. – С. 112–136.
4. *Andreescu M.* Rheological implications of the thermal structure of the lithosphere in the convergence zone of the eastern Carpathians / M. Andreescu, C. Demetrescu // *J. Geodyn.* – 2001. – Vol. 31. – P. 373–391.
 5. *Braitenberg C.* Inverse modelling of elastic thickness by convolution method – the Eastern Alps as a case example / Braitenberg C. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2002. – Vol. 202. – P. 387–404.
 6. *Bercovici D.* Energetics of a two-phase model of lithospheric damage, shear localization and plate-boundary formation / D. Bercovici [et al.] // *Geophys. J. Intern.* – 2003. – Vol. 52. – P. 581–596.
 7. *Cloetingh S.* Lithosphere tectonics and thermo-mechanical properties: An integrated modelling approach for Enhanced Geothermal Systems exploration in Europe / S. Cloetingh [et al.] // *Earth-Science Reviews.* – 2010. – Vol. 102. – P. 159–206.
 8. *Ebbing J.* Forward and inverse modelling of gravity revealing insight into crustal structures of the Eastern Alps / J. Ebbing [et al.] // *Tectonophysics.* – 2001. – Vol. 337, N 3–s4. – P. 191–208.
 9. *Goes S.* Shallow mantle temperatures under Europe from P and S wave tomography / S. Goes [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105. – P. 153–169.
 10. *Handy M.R.* Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological–geophysical record of spreading and subduction in the Alps / M. R. Handy [et al.] // *Earth-Science Reviews.* – 2010. – Vol. 102. – P. 121–158.
 11. *Heuret A.* Plate kinematics, slab shape and back-arc stress: A comparison between laboratory models and current subduction zones / A. Heuret A. [et al.] // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2007. – Vol. 256. – P. 473–483.
 12. *Hurter S.* Atlas of Geothermal Resources in Europe. Commission of the European Communities / S. Hurter, R. Haene // EC Publication. – 2002. – N 17811.
 13. *Ismail-Zadeh A.* Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the earthquake-prone southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow, and gravity data / A. Ismail-Zadeh [et al.] // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 2005. – Vol. 149. – P. 81–98.
 14. *Juez-Larré J.* Tectonothermal evolution of the northeastern margin of Iberia since the break-up of Pangea to present, revealed by lowtemperature fission-track and (U–Th) / He thermochronology. A case history of the Catalan Coastal Ranges / J. Juez-Larré, P. A. M. Andriessen // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2006. – Vol. 243. – P. 159–180.
 15. *Kameyama C.* Thermal–mechanical coupling in shear deformation as a model of frictional constitutive relations / C. Kameyama [et al.] // *Pure and Appl. Geophys.* – 2002. – Vol. 159. – P. 2011–2028.
 16. *Montelli R.* Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle / R. Montelli [et al.] // *Science.* – 2004. – Vol. 303. – P. 338–343.
 17. *Morency C.* Convective destabilization of a thickened continental Lithosphere / C. Morency, M. Doin, C. Dumoulin // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2002. – Vol. 202. – P. 303–320.
 18. *Pascal C.* Gravitational potential stresses and stress field of passive continental margins: Insights from the south-Norway shelf / C. Pascal, S. Cloetingh // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2009. – Vol. 277. – P. 464–473.
 19. *Pasquale V.* Heat flux and seismicity in the Fennoscandian Shield / V. Pasquale [et al.] // *Phys. of the Earth and Plan. Int.* – 2001. – Vol. 126. – P. 147–162.

20. *Raykova R. B.* Surface waves tomography and non-linear inversion in the southeast Carpathians / R. B. Raykova, G. F. Panza // *Phys. of the Earth and Plan. Int.* – 2006. – Vol. 157. – P. 164–180.
21. *Russo R. M.* Seismic attenuation in the Carpathian bend zone and surroundings / R. M. Russo [et al] // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2005. – Vol. 237. – P. 695–709.
22. *Regenauer-Lieb K.* Modeling shear zones in geological and planetary sciences: solid- and fluid-thermal-mechanical approaches / K. Regenauer-Lieb, D. A. Yuen // *Earth-Science Reviews.* – 2003. – Vol. 63. – P. 295–349.
23. *Rudge J.* A plume model of transient diachronous uplift at the Earth's surface / J. Rudge [et al.] // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2008. – Vol. 267. – P. 146–160.
24. *Steven P.* Grand Mantle shear-wave tomography and the fate of subducted slabs / P. Steven // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 2002. A. – Vol. 360. – P. 2475–2491.
25. *Sang-Mook Lee.* Deformation from the convergence of oceanic lithosphere into Yap trench and its implications for early-stage subduction / Lee Sang-Mook // *J. of Geodynamics.* – 2004. – Vol. 37. – P. 83–102.
26. *Schmid S. M.* The arc of the western Alps in the light of geophysical data on deep crustal structure / S. M. Schmid, E. Kissling // *Tectonics.* – 2000. – Vol. 19 (1). – P. 62–85.
27. *Suetsugu D.* Thickness of the mantle transition zone beneath the South Pacific as inferred from analyses of ScS reverberated and Ps converted waves / D. Suetsugu, T. Saita, H. Takenaka, F. Niud // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 2004. – Vol. 146. – P. 35–46.

*Стаття: надійшла до редакції 15.01.2018,
доопрацьована 22.05.2018,
прийнята до друку 23.05.2018*

INTERACTION OF PARAMETERS OF GEOPHYSICAL PROCESSES IN DEEP STRUCTURES OF THE EARTH MODELING

V. Fourman, M. Khomyak, L. Khomyak

*Ivan Franko National University of Lviv,
Hrushevskij Street, 4, 79005, Lviv, Ukraine,
fourman@i.ua*

Main problems of tectonics are considered and review of the main problematic questions governed ways of the investigations of the physical picture not only for the structures but also for the processes and interactions in the deep shells of our planet are made. Depending on the convergence speed, age of the lithosphere and direction of the moving plates that interacted several subduction zones are distinguished. It is pointed out that investigation of the deep structure, composition and geodynamics of the continental and oceanic lithosphere gives the possibility to distinguish the system connected with global processes of Earth's development (rifts, uncompensated deeps, continents, oceans). Direct and immediate measurements by modern geodetic instruments make it possible to build an objective model of modern movements of the earth's crust. The basis for such a discussion is the idea of the principle of the similarity of a number of physical phenomena at different scale levels of the structural hierarchy of the tectonic structures of the

Earth's lithosphere. The patterns of formation, accumulation and development of cracks are similar for different scale levels. It is necessary to identify the influence of each of the listed factors separately, which, of course, is possible only by illustrating cases in which the impact of all other factors is weakened. The main purpose here is to construct a model for distributing the density of the medium using the information obtained during the analysis of other geophysical fields. To study the same geological environment in a seismic field, the most important factor is the formation of its seismic image. The task of constructing a high-speed environment model plays only an auxiliary role, since the seismic imaging approach is much higher than the approach of a seismic model. In general, it can be noted that the impact of the scale of research on the role of their various tasks is the ratio of the size of the object under study with the size of objects available for their direct observation. To do this, it is not enough to construct physical models of investigated objects, and their high-resolution image in geophysical fields is required and their geological classification in these fields.

In computer simulation techniques, the influence of such rheological parameters of the geological environment as layering, anisotropy, ductility and viscosity must be taken into account, at the local and regional levels, in relation to the tasks of tectonophysics. It is clear that this pattern is manifested differently when using fields of different types. However, it can be traced in one way or another in gravimetric, magnetometric, seismometric, and electrometric studies. For example, in regional studies, the main goal of the gravimetric method is to construct a dense model of the crust. In the study of local structures, the possibility of quantitative interpretation is reduced due to the greater complexity of the investigated objects, namely because of their mutual influence in the gravitational field. Here, the situation, as a rule, can change the use of materials of other geophysical methods, that is, complexing various geophysical methods.

Key words: gravity, thermodynamics, tectonics, structure of the Earth, modeling, deep processes, physical modeling, deep structure, geodynamics of lithosphere.