

УДК 550.34

## МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОДИНАМІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В АКТИВНИХ ЗОНАХ ВЗАЄМОДІЇ КОРИ ТА МАНТІЇ ЗЕМЛІ

**В. Фурман**

*Львівський національний університет імені Івана Франка  
геологічний факультет, кафедра фізики Землі,  
вулиця Грушевського, 4, 79005, Львів, Україна,  
e-mail: fourman@franko.lviv.ua*

Розглянуто загальні проблеми геодинаміки та термодинаміки процесів Землі і зроблено огляд головних проблемних питань, що зумовлюють напрями досліджень з осмислення фізичної картини не тільки структур, а й процесів і взаємодій, що виникають у глибинних оболонках нашої планети. Головними силами, що діють у зоні субдукції, є повільні конвективні течії в підлітосферній мантії і затягування в мантію слеза плити, що занурюється. Залежно від швидкості конвергенції, віку літосфери і напрямку руху плит, що взаємодіють, виділяють кілька типів зон субдукції.

*Ключові слова:* геодинаміка, термодинаміка, тектоніка, структури Землі, моделювання, глибинні процеси, фізичне моделювання.

Важливою рисою геодинамічних досліджень від початку стало те, що, будучи спрямованими головню на вивчення процесів, які відбуваються в поверхневій оболонці Землі (літосфері й астеносфері), вони значно спиралися на велику геолого-геофізичну інформацію про еволюції тектонічних структур. Результати математичного моделювання процесів формування і розвитку областей континентальної колізії та зон субдукції, океанічних і континентальних рифтових зон, осадових басейнів зіставляли з даними про швидкості тектонічних рухів, даними про будову земної кори і літосферної мантії, гравітаційне поле, тепловий потік, розподіл напружень тощо. У міру побудови нових геодинамічних моделей, збільшення детальності й 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 в кінцевому підсумку сформулювати задачу комплексної інтерпретації геологічних і геофізичних даних у рамках моделей геодинаміки.

Проблемам сучасної геодинаміки, пов'язаним з геодинамічною нестійкістю різних частин територій, що зумовлена неотектонічною активністю і зонами тектонічної тріщинуватості, присвячено багато досліджень. Водночас склалася парадоксальна ситуація: за великого накопиченого емпіричного матеріалу геолого-геофізичних даних, що дає змогу пояснювати багато явищ у цій проблемі, практично нема теоретичних розробок і навіть теоретичного обґрунтування і визначення таких понять, як “геодинамічне

поле” і “геодинамічна активна зона”. Об’єкт досліджень – геодинамічне поле планети, зумовлене тектонічним полем напружень у взаємодії з геофізичними, геохімічними, гідрогеологічними й іншими полями, а також планетарною і лінеаментною тріщинуватістю. Предмет досліджень – закономірності формування геодинамічних активних зон у межах літосфери й мантії Землі та їхній вплив на природно-геологічне середовище і людину. Як будь-яке інше вчення геологічної науки, вчення про геодинамічні активні зони – це синтез знань не тільки власне геологічних, а й інших природничих наук: географії, біології, екології, фізики, хімії, астрономії, математики, який має з ними прямі і зворотні зв’язки за об’єктами, предметами вивчення або методами досліджень. Теоретичні основи охоплюють розробку теорії (гіпотез, концепцій); розробку наукового змісту, структури (визначення місця науки в системі інших наук, близькі науки і навчання, прямі й зворотні зв’язки) і понятійної бази навчання (основні поняття і визначення, передусім – поняття про геодинамічні поля і геодинамічно активні зони); теоретико-математичне моделювання геодинамічних зон, класифікації (за розміром, глибинністю, формою, інтенсивністю, генезисом, геоструктурним положенням та ін.). Основними методичними підсистемами є геофізичні (на всіх рівнях вивчення з оцінкою параметрів глибинності й інтенсивності геодинамічних зон). Прикладна частина складається з трьох великих частин: вивчення природних систем (вивчення зв’язку геодинамічних зон з іншими зонами, полями, аномаліями, родовищами та ін.); вивчення природно-технічних систем (вивчення зв’язку геодинамічних зон з техногенно перетвореними природними й урбанізованими умовами і спорудами); розв’язування прикладних задач (прогноз).

Геодинамічні активні зони (рис. 1) – це обмежені, протяжні в плані ділянки земної кори з концентрацією тектонічного напруження, зумовленого внутрішніми силами Землі та їхньою активністю на сучасному етапі неотектонічного розвитку, для яких характерна знижена міцність, підвищена тріщинуватість, проникність і, як наслідок, прояв розривної тектоніки, сейсмічності, підйом флюїдів та інші процеси. Такі зони, зазвичай, – це мобільні зони тріщинно-розривних порушень на межах блокових структур, вузли перетинання різнонапрямлених порушень, що ускладнюють неотектонічні блоки; внутрішньоблокові ділянки згущення мережі порушень. Геодинамічними активними зонами глобального і субглобального рівня є глобальні зони інтенсивної сучасної деструкції земної кори на межах великих і малих літосферних плит (Середземноморсько-Індонезійська, Африкансько-Чукотська, Філіппінсько-Камчатська, Кордільєро-Андська та ін.), конвергентні сейсмоактивні структури – зони субдукції та їхні релікти на континентах, на регіональному рівні (геозони) – їхні великі сегменти, основною ознакою яких слугує розміщення вогнищ землетрусів та вулканічної діяльності.

**Механізми формування активних зон взаємодії кори та мантії.** Як відомо, кількісною основою для опису геодинамічних процесів слугує механіка деформованого твердого тіла. У рамках цієї наукової дисципліни виникнення деформацій (рухів) звичайно трактують як результат дії на тіло прикладених напружень (сил). У цьому разі, якщо звернутися до досвіду, то правильним виявляється і зворотне твердження. Відомо, що під час деформації твердих тіл виникають сили (напруження), що діють як усередині тіл з боку одних частин на інші, так і між дотичними тілами. У випадку об’ємних деформацій це справджується також для рідин і газів у повній відповідності з основною аксіомою реології. Ця суперечність зникає, якщо згадати, що деформація – це зміна форми і розмірів тіла, зміна взаємного розташування окремих частин тіла одна щодо одної, тоб-

то результат різних переміщень (рухів) окремих частин тіла. Отже, пояснити походження деформацій – це пояснити походження тих рухів, які призвели до зміни взаємного розташування окремих частин тіла. Деформації у загальному вигляді є результатом визначеного руху, тому безпосередньою причиною деформацій є рухи, а не сили. Для підтвердження цієї тези досить, наприклад, розглянути механізм формування термічних, п'єзоелектричних і магнітострикційних деформацій, де зміна температури, електричного і магнітного полів збуджує рух елементів, які утворюють тіло, що й приводить до його деформації. Безумовно, сили відіграють суттєву роль у виникненні рухів, а отже, і в появі деформацій.

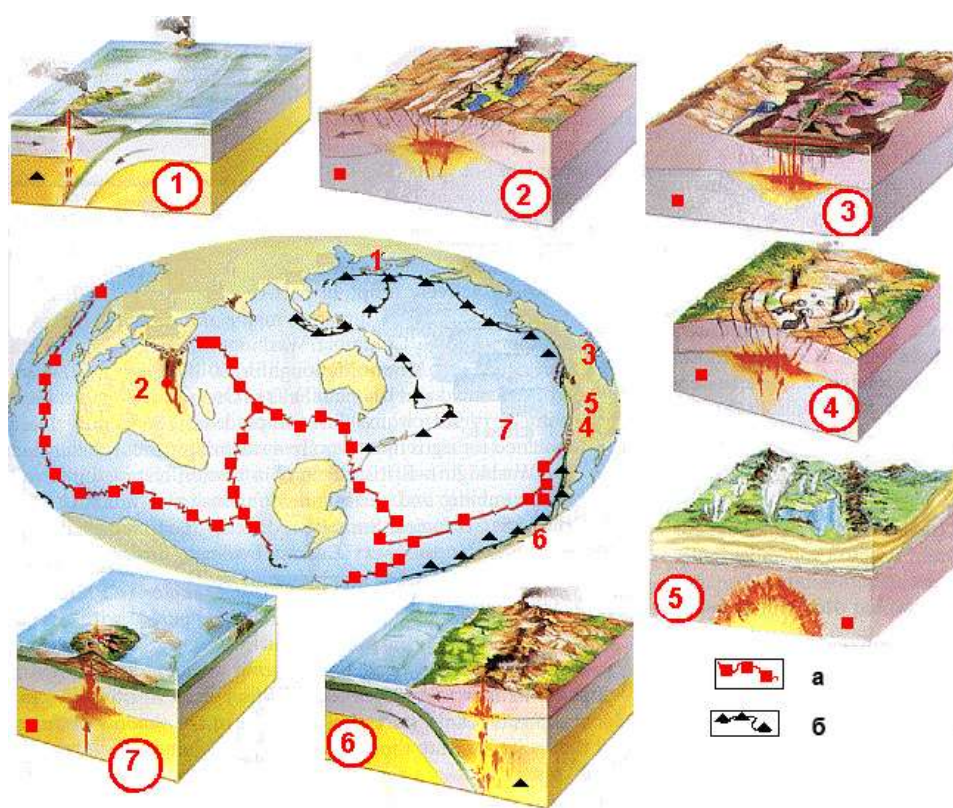


Рис. 1. Активні зони взаємодії кори та мантії Землі: *a* – рифтові; *б* – субдукції.

Однак якщо ці сили такі, що різні частини тіла рухатимуться по-різному, а взаємне розташування різних частин тіла зміниться, то тільки тоді виникнуть деформації. Іншими словами, і напруження (сили), і деформації є відображенням різних форм (силової і кінематичної) єдиного процесу – руху, тому ніякого відокремлення або протиставлення цих понять у разі правильного трактування не виникає. На практиці, оперуючи термінами “напруження” і “деформація”, дослідники часто випускають з поля зору, що спостережуваними (вимірюваними) величинами в сучасній геодинаміці є саме рухи (горизо-

нтальні, вертикальні або зсувні переміщення), а напруження і деформації (як відношення переміщень до бази вимірювань) визначають за результатами обчислень. Тому в сучасній геодинаміці рух є і об'єктом спостережень, і об'єктом інтерпретації одночасно.

Припустимо тепер, що маємо систему рівнянь (геодинамічну модель), яка описує з достатньою детальністю процес формування досліджуваної тектонічної структури. У рівнянні вхідні параметри, що характеризують розподіл фізичних властивостей, тектонічні процеси і, можливо, початкові умови, у загальному випадку невідомі. У рамках геодинамічної моделі форма меж геологічного розрізу, розподіл фізичних полів і фізичних властивостей середовища є розв'язками відповідної системи рівнянь, тобто є функціями, відомими з точністю до кінцевого набору параметрів. Ці параметри і необхідно визначити в процесі розв'язування зворотних задач для окремих геофізичних методів або для декількох методів одночасно. Це приводить до значного скорочення розмірності задачі, робить її розв'язок єдиним і стійким [2, 3, 10]. Розвиток цього підходу висуває на перший план проблему розв'язування прямих задач геодинаміки, тобто математичного опису процесів формування тих особливостей будови та розвитку геологічних структур і тих неоднорідностей у розподілі фізичних властивостей, які висвітлені як у геофізичних полях, так і у використовуваних у ході комплексного аналізу геологічних даних. У загальному випадку ця задача далека від розв'язку. Справді, реальні варіації швидкостей поширення сейсмічних хвиль, щільності, магнітної сприйнятливості, теплопровідності мають полігенетичну природу. Вони можуть бути спричинені тектонічними рухами, різноманітними магматичними і постмагматичними явищами, фізико-хімічними перетвореннями речовини й іншими чинниками. Механізми дії й особливо взаємодії більшості з цих чинників сьогодні вивчені недостатньо повно, тому побудова відповідних моделей у багатьох випадках є досить серйозною проблемою. Водночас у разі побудови моделей регіональних тектонічних структур правомірно припустити, що переважний вплив на варіації фізичних властивостей чинять тектонічні процеси, які приводять до переміщень і деформацій гірських порід, а також теплові поля. Це суттєво спрощує задачу, даючи змогу обмежитися розв'язуванням термомеханічних задач у рамках механіки суцільних середовищ. Зазначимо, що для реалізації розглянутого підходу до інтерпретації геофізичних даних треба було створити новий для того часу клас геодинамічних моделей – так звані еволюційні моделі, що відображають динаміку змін фізичних властивостей порід і зміну геометрії модельованих структур у часі. У середині 1970-х років подібні моделі були вкрай нечисленні, оскільки здебільшого задачі зводилися до аналітичних або числових оцінок розподілів полів швидкостей, деформацій або напружень.

Нові моделі дали змогу використовувати в інтерпретації геофізичних даних великий обсяг додаткової інформації, зокрема, дані про літолого-фаціальне поєднання осадових порід. Розглянемо приклад спільного аналізу сейсмічних, гравітаційних, магнітних даних і даних про швидкості тектонічного занурення для пасивних континентальних окраїн [16]. Схема вирішення полягала в такому. У геодинамічній моделі еволюції пасивної континентальної окраїни будівля й еволюція зони переходу від континентальної літосфери до океанічної визначена набором таких параметрів: характерними вертикальним і горизонтальним масштабами досліджуваної структури, ефективними в'язкостями й густинами осадового шару і шарів земної кори та верхньої мантії, тривалістю процесу (віком окраїни). Ці параметри визначено з умови узгодження розрахункової топографії верхніх шарів осадового розрізу із наявними сейсмічними даними, відповідності розра-

хункової швидкості занурення поверхні моделі та швидкості тектонічного занурення, відомої за даними буріння, а також узгодження амплітуди і характерних розмірів розрахункової і спостереженої ізостатичної аномалії. З використанням даних щодо східної окраїни Північної Америки розраховано сучасну конфігурацію всіх шарів, у тім числі поверхні фундаменту і Мохоровичича, що ненадійно визначені за сейсмічними даними з огляду на велику потужність опадів і наявність у них обривів, що сильно відбивають. Дані про поверхню кристалічного фундаменту і розподіл температури потім використали для задання верхньої і нижньої меж магнітоактивного шару, що дало змогу оцінити розподіл намагніченості по магнітних аномаліях з використанням методу [6].

Розглянемо тепер застосування геодинамічного моделювання для числової оцінки напружень у земній корі. Проаналізуємо двовимірний варіант задачі. Нехай, наприклад, маємо деякий сейсмічний профіль, для якого на підставі комплексного аналізу геологічних і геофізичних даних отримано модель глибинної будови і розподілу фізичних властивостей із глибиною. Для цієї моделі можна б виконати числовий розрахунок напружень, якби були відомі граничні умови, тобто тектонічні сили, що діють на бічних межах (внутрішньоплитні сили) і на підшві моделі (взаємодії з боку мантиї). Однак наявні якісні уявлення про характер тектонічних сил не дають змоги задати числові значення граничних умов. З іншого боку, не застосовано є інформація про сучасну динаміку земної кори, зокрема, результати повторних геодезичних вимірювань (у тім числі отримані з використанням системи GPS), дані неотектоніки. Цю інформацію можна використати для розв'язування такої зворотної задачі: для обраної моделі будови деякої ділянки літосфери визначити такі граничні умови (що діють на його бічних межах і підшві), щоб швидкості рухів на поверхні були близькі (за нормою в обраній метриці) до швидкостей, відомих з геодезії або неотектоніки. З застосуванням цього підходу до реального часу оцінено розподіл напружень у земній корі деяких районів. З іншого боку, оцінка розподілу напружень, створюваних щільнісними неоднорідностями літосфери стабільних областей (щитів і платформ), є ефективним інструментом для скорочення безлічі еквівалентних розв'язків зворотної задачі гравіметрії. Сучасних рухів земної кори в цих областях нема або вони дуже малі, отже, тільки ті щільнісні неоднорідності, що створюють у літосфері девіаторні напруження, які не перевершують межі міцності її речовини, можуть перебувати в рівновазі завдяки силам пружності. Застосування такого критерію до еквівалентних щільнісних моделей є природним розвитком і узагальненням методу ізостатичного моделювання.

Геодинамічні критерії також можна з успіхом використати в разі поділу аномальних полів на компоненти, створювані різними системами джерел. У працях [1, 3] доведено еквівалентність процедур оптимальної фільтрації за Колмогоровим–Вінером і методу апроксимації за певних умов на положення апроксимувальних джерел. На підставі цього результату і з огляду на геодинамічний принцип ізостатичної рівноваги великих щільнісних неоднорідностей у літосфері створено метод оптимального виділення глибинних полів (що залягають нижче астеносфери) джерел [3]. В основі методу є принцип апроксимації ізостатичних аномалій сили ваги системою сингулярних джерел, сконцентрованих у двох шарах. Верхній шар залягає в межах літосфери і є сукупністю вертикальних диполів, що приблизно апроксимують ізостатично врівноважені неоднорідності. Нижній шар розташований поблизу підшви астеносфери і є сукупністю крапкових мас, що апроксимують щільнісні неоднорідності мантиї та ядра. Передбачають, що низьков'язка астеносфера не містить статистично значимої кількості великих щільнісних

неоднорідностей: вони швидко спливають або занурюються залежно від їхнього знака. Оптимальні глибини шарів і співвідношення середньоквадратичних амплітуд сигналів оцінюють, аналізуючи автокореляційну функцію полів аномалій. Описаний метод поділу компонент аномалій сили ваги можна розглядати як окремий випадок загального підходу до геодинамічно обґрунтованого редукування фізичних полів Землі, сформульованого в праці [4]. За цим підходом пропонують створити ієрархічну систему взаємозалежних геомеханічних моделей різного рівня, що відповідають різним просторово-часовим масштабам і ступеням генерування досліджуваних явищ. У такій системі моделі нижчого рівня розглядають як нормальні, тобто визначальні нормальні (або фонові) до розподілу значень фізичних властивостей, а отже, нормальні фізичні поля, породжувані зазначеними розподілами. На противагу прийнятим сьогодні, зокрема, у гравіметрії, статичним нормальним моделям пропонується система моделей Землі повинна бути динамічною, тобто відображати процеси еволюції та динаміки планети. Тому, крім миттєвих розподілів фізичних властивостей, моделі повинні охоплювати закони еволюції цих властивостей, а сполучення суміжних моделей потрібно виконувати за допомогою задання граничних умов на деяких поверхнях. Прикладом реалізації такого підходу є описана модель еволюції реологічно розшарованої поверхневої оболонки Землі [14], пов'язана умовами сполучення з глобальною моделлю гідродинамічної еволюції Землі [15]. Однак загалом сформульована задача створення ієрархічної системи моделей Землі поки ще далека від вирішення.

Вивчення 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 та океанів (рухливі пояси, кратони тощо). У праці [11] 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 Землі розігрівается і розширюється, а зовнішня оболонка, вистигаючи і стискаючись, стримує це розширення, піддаючись відповідному деформуванню, руйнуванню і структуруванню. Згідно із зазначеною концепцією, головні процеси і структури в зовнішніх геосферах Землі повинні залежати від поведінки сферичної оболонки під час її деформування.

Тектонічні й геофізичні процеси значно спричинені динамікою рухів земної кори, тому необхідно хоча б коротко схарактеризувати ті фізичні процеси, що їх формують. 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 структури двошарової конвекції, а також створити можливість експериментального перебування межі виникнення турбулентного режиму конвекції в горизонтальному шарі, що підігрівается 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 [14] унаслідок досліджень глобальної тривимірної геодинамічної моделі Землі та механізмів формування й перетворення мантійних структур і найбільших структур земної кори. Землю в цій моделі порівнюють із 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, зтягуються до місць спадних холодних потоків (зон субдукції). Однак у цьому процесі континенти не залишаються пасивними. Завдяки великій товщині вони гальмують вихід тепла з мантії, що починає прогріватися під ними. Внаслідок цього під континентом з'являється новий висхідний потік. Конвекція виявляється нестационарною, у мантії постійно виникають і переміщуються дрібні конвективні потоки. Доведено, що режим нижньомантійних плинів нестационарний і належить області переходу до турбулентного або розвинутого турбулентного режиму плинину. Знайдено співвідношення між тимчасовими і просторовими масштабами та запропоновано метод моделювання впливу зон субдукції на структуру нижньомантійної конвекції. Отже, континенти постійно дрейфують по поверхні Землі, спричиняючи перебудову мантійних плинів під собою і, як наслідок, формуючи структури рельєфу (рис. 2).

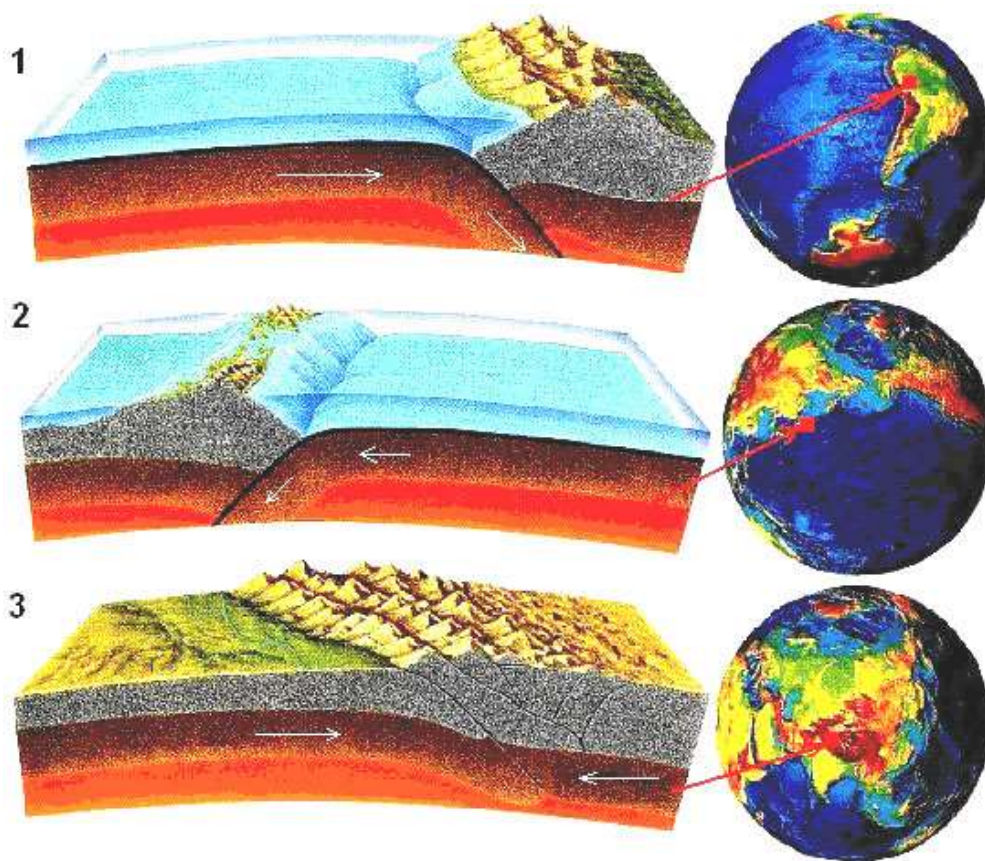


Рис. 2. Субдукція [4, 11]: океан–континент (1), континент–острівна дуга (2) та континент–континент (3).

**Моделювання термомеханічних процесів складних геодинамічних конструкцій.**

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, 12]. 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. 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.

Під час регіональних сейсмічних досліджень, наприклад, у разі глибинного сейсмічного зондування 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 [4, 5] 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. У детальних дослідженнях конкретних структур на етапі їхнього промислового використання, коли головним завданням геофізики є класифікація, завдання побудови фізичної моделі й зображення необхідно виконати раніше. Головні геодинамічні процеси на Землі відбуваються в умовах складного напруженого стану, що є інтегральним показником великої кількості ендегенних, космічних і екзогенних чинників – джерел напружень різних ієрархічних рівнів. Пружно-деформований стан – це найважливіша характеристика геолого-геофізичного середовища. У взаємодії внутрішньої речовини і зовнішньої оболонки беруть участь три головні сили: внутрішнього тиску, зумовлена охолодженням оболонки і розігріванням речовини в замкнутому об'ємі, і конфронтаційні їй дві сили: механічна міцність оболонки та сила ваги.

Платформи є складовою частиною літосферних плит, тому багато особливостей платформної тектоніки можна зрозуміти повніше, якщо їх розглядати на тлі загальних 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 [8]):

- 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 розуміннь – 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.

З областями швидких занурень кори виявилися тісно пов'язаними нафтогазоносні басейни, а також області прояву інтенсивного стискування континентальної кори в складчастих поясах. Швидкі занурення континентальної кори в багатьох областях супроводжувало стрімке розм'якшення літосферного шару [4, 5, 11].

Для опису кінематики зон субдукції, зазвичай, розглядають такі сили, що діють під час субдукції:

- 1) тиск з боку зони спредингу серединно-океанічного хребта (**ridge-push**);
- 2) силу затягування частини, що занурюється в мантію, плити (слеба) під дією її ваги (**slab-pull**);
- 3) силу тертя літосферної плити, що занурюється, внаслідок субдукційного зчеплення (**friction**);
- 4) плавучість плити (**buoyancy**);
- 5) опір згинанню під час занурення (**bend-resistance**);
- 6) силу відкочування назад унаслідок в'язкого зчеплення з підлітосферною мантією (**roll-back**);
- 7) силу "всмоктування" плити, що насувається (верхньої), на контакт із субдукованою (нижньою) плитою (**sucking in**).

Уважають, що океанічна плита в зоні субдукції залишається холодною і тільки у верхній її частині відбувається часткове плавлення [12]. Є різні думки про причини руху і взаємодії літосферних плит. За первісними уявленнями концепції плейтектоніки, негативна плавучість зануреної в мантію плити є суттєвою рушійною силою, що зумовлює переміщення літосферних плит [4, 12, 16]. Маса субдукованої літосфери, що залежить від її віку, зумовлює як глибину жолоба, так і швидкість субдукції. Під впливом надлишкового тиску, створюваного горизонтальним напруженням стискування і вагою насунутої частини верхньої (континентальної) плити, у плиті, що підсувається, розвиваються пластичні деформації, вона змінює напрям руху і починає стрімко спускатися в мантію [14, 16]. Згідно з поширеними уявленнями, на плиті, що підсувається, у цьому разі утвориться передовий прогин, а на насунутій плиті – гірська споруда, висота якої може зменшитись з огляду на вагу субдукованої плити. Субдукція поряд з колізією є одним з провідних геодинамічних процесів (рис. 2-1) на конвергентних межах літосферних плит, де відбувається їхня активна взаємодія з океанічною плитою, зануреною під континентальну. Водночас нарощується і руйнується континентальна літосфера, виявляється різноманітний магматизм (див. рис. 2-2), виділяється значна кількість сейсмічної енергії внаслідок тектонічних переміщень у земній корі та верхній мантії. Унаслідок еволюції зони субдукції, зазвичай, трансформуються в зони колізії (зіткнення) типу континент–континент або континент–острівна дуга (рис. 2-3). Нижче розглянемо головні сили, що діють у зонах субдукції, виконаємо типізацію цих зон і спробуємо виявити деякі закономірності прояву сейсмічності в їхніх межах. У сучасному розумінні головний рушійний механізм руху плит – повільні конвективні течії в підлітосферній частині верхньої мантії, що впливає з виявленого різними незалежними дослідженнями переміщення більшості головних літосферних плит (крім Австралійської, Наска і низки дрібніших) з різною швидкістю у західному напрямі. Другорядне значення мають сили, що затягують плити, опір мантії зануренню в неї плити (сила відкочування назад), від-

штовхування від хребта й інші напруження, що її відхиляють [11, 16]. Активність уздовж зон субдукції багато в чому залежить від віку літосфери, швидкості конвергенції плит і збігу напрямку субдукції із загальним напрямом руху мантийного матеріалу.

Чим молодша літосфера, тим більша швидкість конвергенції, і чим більше напрям субдукції протилежний переважній підлітосферній мантийній течії, тим стрімкіше спадає сейсмофокальна площина. Глибинна будова зони субдукції, тип магматизму вулканічної дуги й інтенсивність розтягу (див. рис. 2) в її тилу зумовлені трьома головними критеріями:

- 1) швидкістю конвергенції плит,
- 2) віком літосфери, що занурюється, і ступенем її “плавучості”,
- 3) напрямом абсолютного руху кожної із плит, що взаємодіють [15, 16].

Відповідно до цих критеріїв виділяють кілька типів зон субдукції, кожному з яких властивий певний розподіл вогнищ землетрусів (див. рис. 2) уздовж сейсмофокальної зони, специфіка магматизму, геодинаміки, а саме – маріанський, чилійський та невадійський, кожний з яких можна вважати головним.

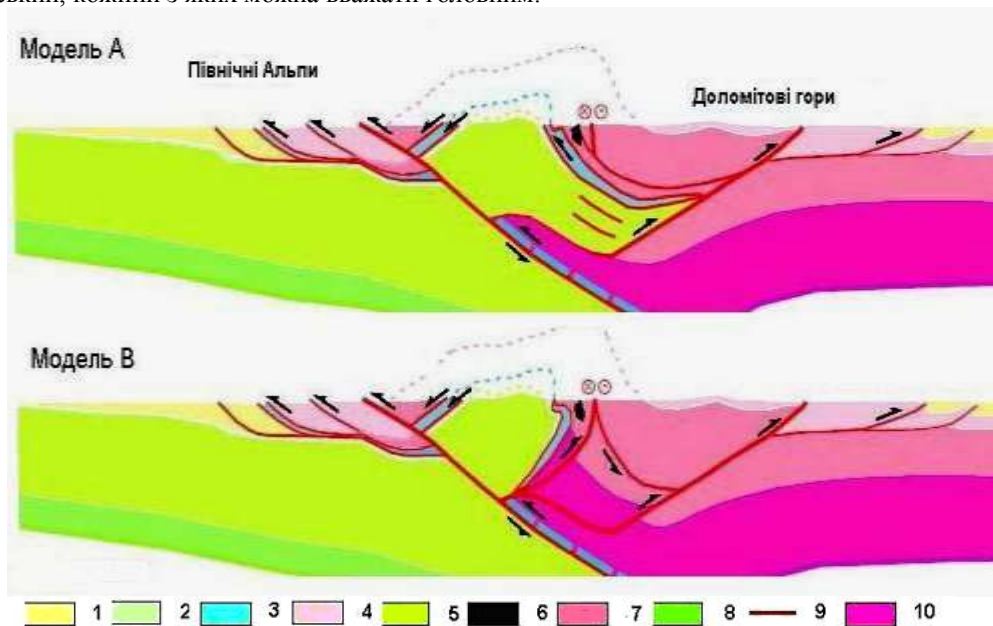


Рис. 3. Моделювання розвитку субдукційної ситуації Трансальпійської системи [7]:

1 – моласи; 2 – європейські відклади мезозою; 3 – відклади Пенінської зони; 4 – мезозой Адріатики; 5 – інтрузиви олігоцену; 6 – європейська кристалічна кора; 7 – верхня кора Адріатики; 8 – європейська нижня кора; 9 – зона розлому; 10 – нижня кора Адріатики.

Для чилійського (андського) типу характерна висока швидкість конвергенції, молодий вік слабо остиглої літосфери плити, що зазнає занурення, зустрічний рух плит зі швидким перекриттям порожнистої океанічної плити, що насувається на континент (див. рис. 2, 1). Переважає стискування, унаслідок чого немає характерних тилкових прогинів. Крім більшої частини Анд, цей тип зафіксовано на заході М'янми й у західній

половині Зондської дуги (Суматра, Ява), в альпійських зонах Близького Сходу і Європи [5, 8, 10–15]. Характерно, що в самих Андах субдукція, яка почалася 170 млн років тому, відбувалася спочатку без виникнення гір за панування режиму розтягання, коли утворилися андські й субандські крайні басейни. Підіймання Анд розпочалося лише близько 80 млн років тому. Стрімке, майже вдвічі, збільшення швидкості руху Південноамериканської плити близько 30 млн років, пов'язане з прискоренням спредингу в Атлантиці, привело до переваги стискування, виникнення активної континентальної околиці андського типу й інтенсивного підняття. Маріанському типу притаманна невисока швидкість конвергенції, давня значно остигла і, відповідно, важче субдукована літосфера, рух обох плит в одному або близькому напрямі, проте із різною швидкістю, стрімке падіння зони Бенюфа (ЗБ), слабе зчеплення океанічної плити з перекривною, перевага розтягання на краях обох плит, що взаємодіють, активний розвиток тилових прогинів з великим тепловим потоком та іноді з контрастним базальт-ріолітовим вулканізмом (див. рис. 2, 2). В умовах розтягання на вигині субдукованої океанічної плити часто утворюються грабени, що можуть бути пастками для поховання океанічних відкладів і продуктів ерозії континентальних схилів. Це одне з можливих пояснень відсутності широкої латеральної акреції перед фронтом низки активних околиць на заході Тихого океану, де не розвинуті або слабко виявлені акреційні призми.

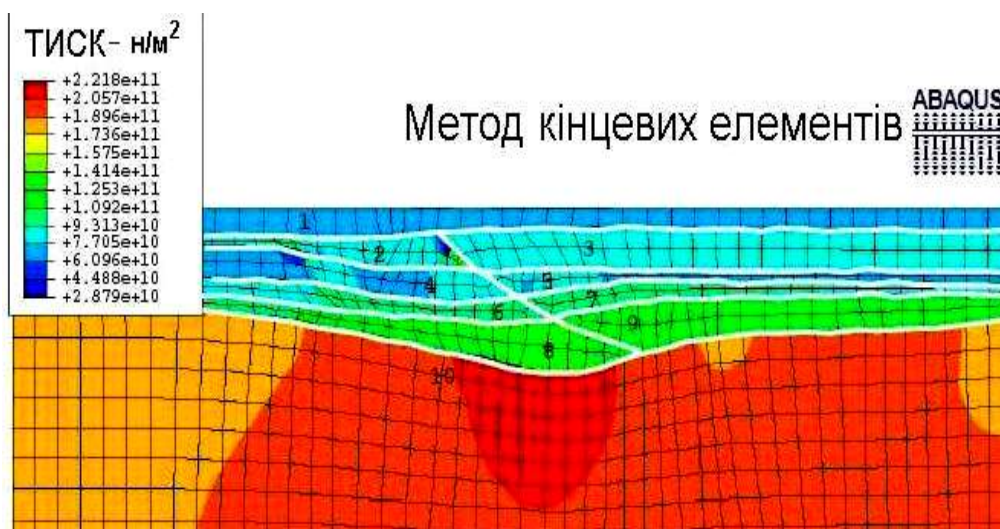


Рис. 4. Моделювання механічних характеристик Альпійської системи [7].

Невадійському (кордільєрському) типу властива дещо помірна швидкість конвергенції, молодість і розігрітість літосфери, що зазнає занурення, зближення плит під скісним кутом (див. рис. 2, 3). Специфіка цього типу стосовно попереднього – порівняна незрілість континентальної літосфери, що перекиває зону, у межах якої перед початком субдукції переважали ситуації пасивних континентальних окраїн або острівних дуг, що зіштовхнулися з континентом. На пізніх стадіях процесу субдукції цього типу, зазвичай, відбувається перекриття континентальною плитою осі спредингу океанічної плити, що

занурюється, із виявом після цього специфічного магматизму і тектоніки розтягання на краю континенту [2].

Реальна неоднорідна тверда кора Землі досить складна (див. рис. 1), тому найінформативнішим є використання регіонального підходу для аналізу геологічних структур, а не окремих локальних ділянок, водночас для глобальної моделі планети необхідне врахування повного набору спостережуваних на Землі структур. Значний обсяг фактичних матеріалів свідчить, що головна частина великих сучасних позитивних форм рельєфу сформувалася внаслідок швидких піднять континентальної кори, що відбулися за останні 3–5 млн років. Без великих порушень ізостації такі підняття свідчать про знецілення порід у корі або мантиї, що відбулося майже водночас на різних континентах. Це знецілення, очевидно, пов'язане зі стрімким розм'якшенням мантийної літосфери і її частковим або повним заміщенням менш щільною астеносферою. З такої позиції [5–9] 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 твердій Землі.

Важливе і не вирішене завдання внутрішньоплитної тектоніки – відтворення реальних геодинамічних моделей для різних ситуацій, що враховують внесок головних діючих сил і взаємодію різних шарів літосфери [7] від осадових чохла до нижніх горизонтів кори. Щодо цього вагомими є праці [7–12] з аналізу геодинамічної ситуації в Альпійській структурі (рис. 4). 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 (див. рис. 4), а й характеру переважного типу руху, що є відображенням неоднорідності земної кори і великої розмаїтості її структур. 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 проникності фундаменту і чохла для флюїдів і газів. Зіставлення з кривою аномалій сили ваги і з залишковою кривою (після врахування впливу земної кори) дало змогу визначити просторову збіжність регіональних аномалій сили ваги з регіональними ділянками сучасних вертикальних рухів, що відображає блокову диференціацію земної кори, виявлену за даними ГСЗ.

Отже, головною характерною рисою рухів є збіжність зон з підвищеними градієнтами зсувів, що зосереджені на межах між регіональними підняттями й опусканнями, із зонами глибинних розломів. Підняття блоків фундаменту стійко корелювали з підняттями земної поверхні, і навпаки, цілковито відповідали успадкованому характеру розвитку процесів. Це є основна закономірність сучасних вертикальних рухів земної кори, визначених у регіональному просторово-тимчасовому масштабі опису процесу [1]. У разі тектонофізичного аналізу результатів вимірювань у сучасній геодинаміці одним із найбільш важливих питань є тимчасова стабільність регіонального пружно-деформованого стану. Дуже часто дослідникам доводиться постулювати незмінність і/або монотонність у часі рівня і спрямованості регіонального поля напружень. Це природно впливає з аналізу натурних даних. Нерідко в разі використання результатів геодезичних спостережень (наземних або супутникових) виникає необхідність тривіального усереднення й екстраполяції вимірюваних кінематичних величин (швидкість і спрямованість

зсувів) за умов рідких і спорадичних циклів повторних спостережень, проведених на великих базах вимірювань. Аналіз і трактування тектонічних процесів найчастіше породжує безліч припущень і гіпотез, що, головню, сформульовані на вербальному рівні. Методи тектонофізики, як відомо, ґрунтуються на строгому формалізмі фізико-математичних наук. Результати, одержувані в сучасній геодинаміці, спираються на високоточні геодезичні і геофізичні вимірювання. Гармонічне поєднання тектонофізики і сучасної геодинаміки дає змогу об'єктивніше вивчати різноманітний і багатofакторний світ тектонічних явищ.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузьмин Ю. О. Тектонофизика и современная геодинамика / Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2009. – № 11. – С. 44–59.
2. Михайлов В. О. Моделирование растяжения–сжатия литосферы внутриплитными силами / В. О. Михайлов // Докл. РАН. – 2000. – Т. 370, № 1. – С. 109–112.
3. Трубицын В. П. Глобальные тектонические процессы, формирующие лик Земли / В. П. Трубицын // Геофизика на рубеже веков. – М., 1999. – С. 80–92.
4. Фурман В. В. Особливості фізичних моделей глибинних процесів Землі / В. В. Фурман, М. М. Хом'як, Ю. Р. Дацюк // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол. – 2003. – Вип. 17. – С. 24–32.
5. 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.
6. Braitenberg C. Inverse modelling of elastic thickness by convolution method – the Eastern Alps as a case example / C. Braitenberg, J. Ebbing, H.-J. Götze // Earth and Planetary Science Letters. – 2002. – Vol. 202. – P. 387–404.
7. Ebbing J. Forward and inverse modeling of gravity revealing insight into crustal structures of the Eastern Alps / C. Braitenberg, J. Ebbing, H.-J. Götze // Tectonophysics. – 2001. – Vol. 337, N 3–s4. – P. 191–208.
8. Kaban M. K. A gravity model of the north Eurasia crust and upper mantle: The Alpine-Mediterranean foldbelt and adjacent structures of the southern former USSR / M. K. Kaban // Russian J. of Earth Sciences. – 2002. – Vol. 4, N 1. – P. 19–33.
9. Meibom A. The statistical upper mantle assemblage / Anders Meibom, Don L. Anderson // Earth and Planetary Science Letters. – 2003. – Vol. 217. – P. 123–139.
10. Mikhailov V. O. Foredeep basins: the main features and model of formation / V. O. Mikhailov, E. P. Timoshkina, R. Polino // Tectonophysics. – 1999. – Vol. 308. – P. 345–360.
11. Mikhailov V. O. Numerical modelling of neotectonic movements and state of stress in the North Caucasus Foredeep / V. O. Mikhailov, E. I. Smolyaninova, M. Sebrier // Tectonics. – 2002. – Vol. 21. – DOI: 10.1029/2002TC001379.
12. Poort J. Heat transfer by groundwater flow during the Baikal rift evolution / J. Poort, O. Polyansky // Tphysics. – 2001. – Vol. 351. – P. 75–89.
13. 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 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2004. – Vol. 146. – P. 35–46.

14. *Sang-Mook Lee*. Deformation from the convergence of oceanic lithosphere into Yap trench and its implications for early-stage subduction / Sang-Mook Lee // *J. of Geodynamics*. – 2004. – Vol. 37. – P. 83–102.
15. *Steven P.* Grand Mantle shear-wave tomography and the fate of subducted slabs / P. Steven // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 2002. – Vol. 360. – P. 2475–2491.
16. *Tikhotsky S.* Determination of the Sublithospheric Component in the Earth's Anomalous Gravity Field / S. Tikhotsky // *Cahiers of ECGS*. – 2003. – Vol. 20. – P. 79–85.
17. *Widiyantoro S.* Deformation of the Aegean Slab in the Mantle Transition Zone / S. Widiyantoro, R. D. van der Hilst, F. Wenze // *International J. of Tomography & Statistics*. – 2004. – N 4. – P. 1–14.

*Стаття: надійшла до редакції 08.05.2013  
доопрацьована 28.10.2013  
прийнята до друку 04.11.2013*

## **THE MODELING OF GEODYNAMICAL AND ENERGY TRANSFORMATIONS IN ACTIVE ZONES OF THE EARTH CRUST AND MANTLE**

**V. Fourman**

*Ivan Franko National University of Lviv,  
geological faculty, department of physics of the Earth,  
Hrushevsky Street, 4, 79005, Lviv, Ukraine,  
e-mail: fourman@franko.lviv.ua*

The main issues of tectonics are considered and review of the main problematic questions which form the ways of investigation of the physical image of structures as well as of processes and interactions in the deep shells of our planet is made. Main forces acting within subduction zone are slow convective currents in mantle and slab detachment. Depended on tectonic deformation measurements and dates about moving the causes of tectonic activity of the platform crust within different deeps are determined. The effectiveness of the complexity of different geophysical data for authenticity of geodynamic situations with examples from Alpine mountain chains is shown.

*Key words:* Geodynamics, Thermodynamics, Tectonics, structure of the Earth, modelling, deep processes, physical modelling.



## МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРЫ И МАНТИИ ЗЕМЛИ

**В. Фурман**

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко,  
геологический факультет, кафедра физики Земли,  
ул. Грушевского, 4, 79005, Львов, Украина,  
e-mail: fourman@franko.lviv.ua*

Рассмотрено общие проблемы геодинамики и термодинамики процессов Земли и сделано обзор главных проблемных вопросов, которые определяют направления исследований по осмыслению физической картины не только структур, но и процессов и взаимодействий, которые возникают в глубинных оболочках нашей планеты. Главными силами, которые действуют в зоне субдукции, есть медленные конвективные течения в подлитосферной мантии и затагивания в мантию слэба погружающейся плиты. В зависимости от скорости конвергенции, возраста литосферы и направления движения взаимодействующих плит выделяют несколько типов зон субдукции.

*Ключевые слова:* геодинамика, термодинамика, тектоника, структуры Земли, моделирования, глубинные процессы, физическое моделирование.