

<https://doi.org/10.15407/gpimo2022.01.003>

**В.В. Гордієнко**, д-р геол.-мін. наук, проф., зав. відділом

E-mail: [gordienkovadim39@gmail.com](mailto:gordienkovadim39@gmail.com)

ORCID 0000-0001-9430-7801

Scopus authorID 7102473958

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України

03680, Київ, просп. Палладіна, 32

## МАНТІЙНА ГРАВІТАЦІЙНА АНОМАЛІЯ ТА СУЧАСНА АКТИВІЗАЦІЯ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

---

*Вивчення зон сучасної активізації на території України протягом тривалого часу виконувалося з використанням комплексу геолого-геофізичних методів. Кожен з них не позбавлений недоліків. Отримані результати дозволили припустити, що визначення мантійної аномалії гравітаційного поля може бути позбавлене їх значної частини і служити єдиним критерієм виявлення зон сучасної активізації. Для цього необхідно вдосконалити методику розрахунку ефекту земної кори, доповнивши її урахуванням ступеня катагенезу частини порід осадового шару, впливу підвищених концентрацій рудних мінералів в надрах регіональних магнітних аномалій тощо. Таким чином можна досягти більш точного розрахунку ефекту уздовж профілів ГСЗ. Крім того, необхідно забезпечити визначення гравітаційного ефекту кори на території між профілями. Для вирішення цього завдання використовувалася технологія кригінгу. Вона дозволяє розрахувати прогнозні значення параметра з використанням відомих в інших пунктах і оцінити похибку результату. У нашому випадку достатнім виявився варіант звичайного кригінгу. Для визначення похибок замість зазвичай застосовуваних варіограм було використано порівняння даних по одному з профілів ГСЗ з розрахованими по кригінгу за інформацією на сусідніх профілях. Отримана похибка виявилася цілком зрозумілою з урахуванням помилок вихідних даних і прийнятною для використання результатів для картування мантійної гравітаційної аномалії, а отже і зон сучасної активізації України. Побудована карта демонструє деяку зміну розташування аномалії (і, відповідно, зон сучасної активізації — СА) від встановленої раніше. Зокрема, аномалія відсутня в Деснянському басейні Дніпровсько-Донецької западини. Власне, гравітаційна мантійна аномалія була відсутня там і раніше, поширення зони СА на територію басейну було позначено за іншими критеріями невисокої достовірності. Вдається фіксувати присутність аномалії на території між Приазов'ям і Донбасом, де вона раніше не діагностувалася. Цей результат все ж потребує підкріплення додатковими даними. Перш за все через спостережену істотну розбіжність між різними варіантами швидкісних розрізів уздовж профілів ГСЗ.*

**Ключові слова:** зони сучасної активізації, мантійна гравітаційна аномалія, методика кригінгу.

---

Цитування: Гордієнко В.В. Мантійна гравітаційна аномалія та сучасна активізація на території України. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2022. **18**, № 1: 3—21. <https://doi.org/10.15407/gpimo2022.01.003>

## Вступ

Вивчення зон сучасної активізації (СА) в межах України [7, 12—18 та ін.] дозволило намітити контури території, охопленої процесом, і оцінити переваги та недоліки використаних для цього геолого-геофізичних методів. Щодо активізації альпійської Карпатської геосинкліналі, глибокої западини Чорного моря з корою на стадії океанізації та прилеглої частини Скіфської плити сумнівів не виникало — досить впевнено можна провести кордони процесів. Для виділення їх на Східно-Європейській платформі (СЄП), до якої в даному випадку доречно приєднати і герцинську парагеосинкліналь Донбасу, використовувалися локальні і регіональні критерії. Перші з них поширені тільки на окремих фрагментах території України і не підходять для її картування по СА в цілому. Другі в принципі придатні для вирішення завдання, але в практичному використанні стикаються із істотними обмеженнями. Йдеться про позитивні аномалії теплового потоку (ТП), об'єкти підвищеної електропровідності в корі і верхній мантії, сучасні підняття поверхні і про мантійні аномалії сили тяжіння.

Незважаючи на унікальну геотермічну вивченість України, на її території все ще є значні «білі плями». Крім того, аномалії ТП відсутні в частинах зон СА, де корові перегріті об'єкти сформувалися нещодавно, тепловий ефект ще не досягнув поверхні. Про існування таких потенційних джерел тепла можна судити по локальним проривам гарячих флюїдів над невеликими вторгненнями магми в верхні горизонти кори. Над ними виникають аномалії ТП, але такі спорадичні прояви не дозволяють вести картування по площі. Можна згадати й інші, менш значні, перешкоди для теплової діагностики зон СА, але і вже названих досить для думки про її обмеженість.

Вивченість України методами глибинної геоелектрики також значно вище, ніж в інших країнах. Проте, картина розподілу виявлених провідників в корі і верхніх горизонтах мантії виглядає мозаїчною, по ній важко визначити суцільні прогріті (і, відповідно, із зниженим електроопором порід) тіла, що відповідають, зокрема, і згаданим вище регіонам Карпат та Чорного моря. На решті території України картина подібна. Можна стверджувати, що в межах зон СА концентрація провідників вища, ніж поза ними. Але для достовірного картування цього недостатньо. Природа аномально високої провідності не зводиться до перегріву, вона в істотній мірі пов'язана із флюїдами, вкрапленнями часткового розплаву, іноді з електронними провідниками тощо. Не виключено, що продовження досліджень та вдосконалення методів інтерпретації експериментальних даних дозволять отримати більш визначену картину. Але поки такий результат ще не досягнуто.

Діагностика зон сучасної активізації за амплітудами молодих (в останні мільйони років) підняття найменш надійна. Розрахунки показали, що цей ефект визначається із недостатньою точністю. Цілком можна уявити ситуацію, за якою схема процесу принципово зберігається, а переміщення поверхні має інший знак. Крім того, в південній частині України бічний вплив занурення Чорноморської западини може скоротити підняття в зоні СА практично до нуля. Що і проявилось в дійсності.

Мантійна гравітаційна аномалія в зонах СА платформи позбавлена значної частини розглянутих перешкод. Вивченість і точність спостереженого поля сили

тяжіння цілком достатні для достовірного виявлення такого збурення. Цей факт встановлений на значних просторах України та інших регіонів, де є впевненість у розрахунку ефекту кори, адекватному складності геологічної ситуації. Практично мова йде, перш за все, про використання якісних швидкісних розрізів кори уздовж профілів ГСЗ і засобів перерахунку швидкості ( $V_p$ ) у щільність ( $\sigma$ ). Другий необхідний елемент побудови площинного ефекту кори — визначення його на територіях поза профілями. При вирішенні обох завдань аномалія в районі СА СЄП безумовно буде виявлена і закартована без застосування інших геолого-геофізичних методів. На це вказують розрахунки, які використовують розподіл в мантії аномальних щільностей в порівнянні із неактивізованою платформою, що виникають в результаті активного глибинного процесу.

### **Процес сучасної активізації**

Ендогенний режим сучасної активізації відомий вже близько 80 років. Але його існування все ще дискутується. Тому необхідно зупинитися на розумінні змісту терміну автором [17, 18 та ін.], що засноване на роботах радянських геологів 20-го століття.

Початок вивченню СА поклав Г.Ф. Мірчинк, який побачив в цьому явищі нову форму розвитку земної кори, наступну за платформною [21]. Спочатку мова йшла про утворення брилевих гір (Тянь-Шань та ін.). В.В. Білоусов писав, що події активізації значно відрізняються від характерних для «нормального» розвитку геосинкліналей і платформ [3 та ін.] і «свідчать про особливий, новий напрямок розвитку земної кори, який змінює колишній — геосинклінально-платформний... Багато явищ характерні для самого останнього відрізка геологічного часу — для неогену і антропогену» [4, с. 4]. Тобто «спостерігається абсолютно особлива форма розвитку, яка раніше не виявлялася, лише в деяких своїх рисах може бути подібна в якійсь мірі до геосинклінальної, але в цілому являє собою щось нове в історії земної кори. Ця нова форма розвитку проявляється в рівній мірі як на місці платформ (епіпротерозойських, епікаледонських і епігерцинських), так і на місці альпійських геосинкліналей, і може бути віднесена до явищ тектонічної активізації» [5, с. 173]. Якісна перебудова платформ, тобто різні явища їх активізації (тектонічні і магматичні), безсумнівно, відбувалися і в геологічному минулому. Однак, в мезозої, як вказував Г.Ф. Мірчинк, ці явища проявилися з більшою силою, ніж в палеозої, а в новітній стадії розвитку Землі активізація платформ проявляється особливо сильно й багатьма способами [23]. Тому «при тектонічному аналізі їх потрібно виділяти в якості особливих зон в межах тих головних структурних елементів земної кори (геосинклінальні області і платформи), на основі яких вони виникли» [6, с. 25].

Тут відзначимо основні риси глибинного процесу сучасної активізації, важливі для вирішення поставленої задачі. Схема тепломасопереносу в тектоносфері СА містить невизначеності, пов'язані з незавершеністю процесу і його проявом в регіонах з дуже різними віками попередніх геосинкліналей або рифтів.

При СА з підкорової перегрітої області (що виникла близько 5—25 млн років тому при підйомі речовини із проміжного вогнища під платформою або з неглибокої астеносфери, що існувала перед початком активізації в альпідах) частковий розплав виноситься в кору. Вік був приблизно оцінений за геотермічними дани-

ми і нечисленними проявами магматизму на Молдавській і Мізійській плитах, в Закарпатському прогині, Паннонії, на Чеському масиві. Приблизно в тому ж часовому діапазоні відбувалися швидкі підняття поверхні на Дністровсько-Прутському межиріччі (близько 4 млн років тому), Складчастих Карпатах (10—15 млн років тому), на українській території СЄП (в різні періоди до 25 млн років тому).

Розплав надходить в інтервал глибин 30—40 км (займає близько половини обсягу) і 20—30 км (займає чверть обсягу). Середня температура зростає тут на  $500 \pm 100^\circ\text{C}$ . Під кору опускаються еклогітизовані блоки основних корових порід, при досягненні астеносфери вони знижують її температуру приблизно на  $100^\circ\text{C}$ . Саме нагрівання кори «розморожує» реакцію еклогітизації, швидкій течії якої сприяють флюїди, що принесені мантійними виплавками і утворені при частковому плавленні порід амфіболітової фації метаморфізму в корі.

Модель тепломасопереносу в обох варіантах не передбачає (поки що?) істотного зниження температури в області поліморфних перетворень у підшви верхньої мантії, достатнього для переходу помітної частини речовини до більш щільної фази олівіну. Відповідно відсутні значні занурення поверхні. Цей факт дозволяє обмежувати сучасну глибину нижнього джерела переміщеного матеріалу — 300—400 км.

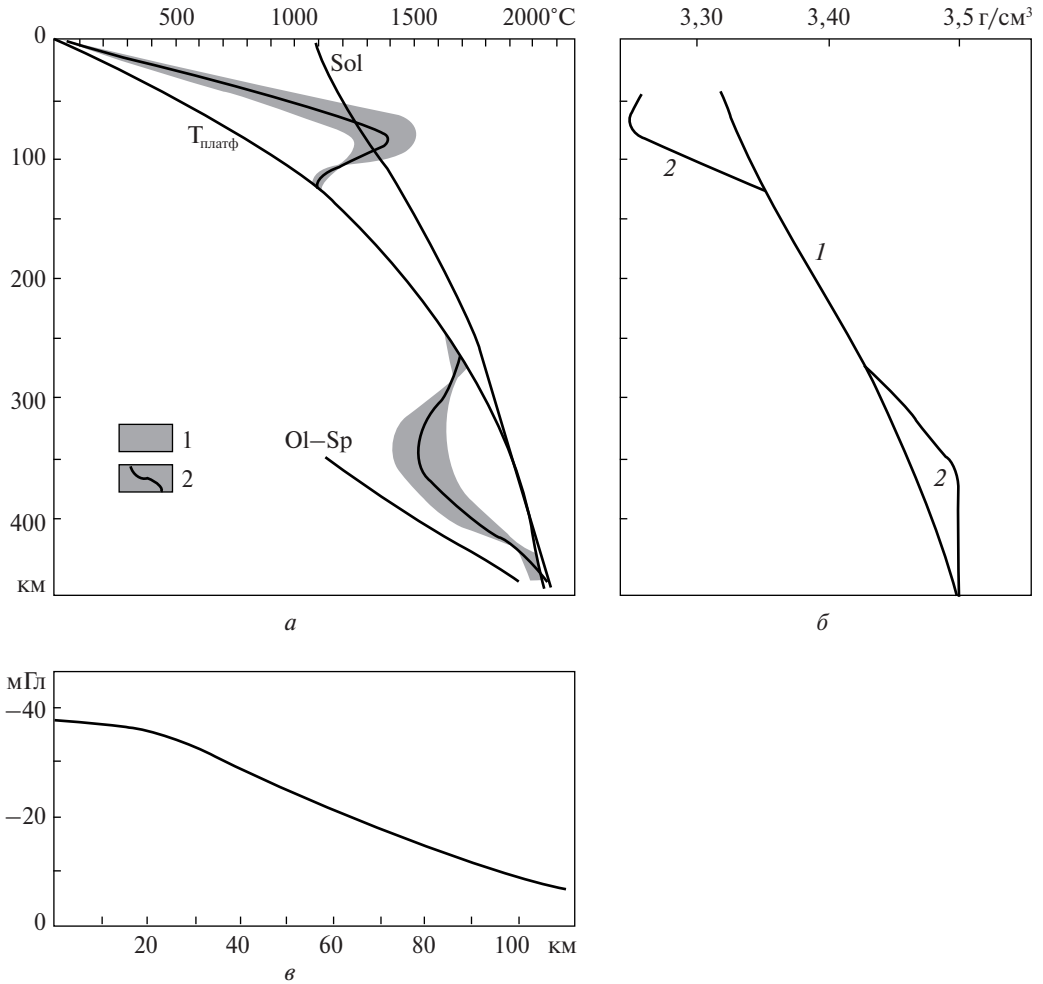
Теплові моделі в інтервалах глибин максимального перегріву в мантії під корою досить близькі під платформами і альпідами і не суперечать даним геотермометрів. Очевидно, що таким моделям повинні відповідати дві зони часткового плавлення. Досить потужна зона — в підкоровій частини мантії (в інтервалі глибин від 40—60 до 90—100 км), малопотужна — в нижній корі на глибинах трохи більше 20 км. Останньої може й не бути, якщо винос магми в кору стався помітно раніше прийнятого при розрахунку віку процесу. Ця зона може служити джерелом матеріалу для внутрішньокорової адвекції, що приводить до утворення окремих вторгнень кислоти і середньої магми на глибини до 5—10 км.

Розгляд форми мантійної гравітаційної аномалії в найбільш вивчених районах України [13—15, 18 та ін.] виявляє ряд фрагментів, що помітно відрізняються від сусідніх, шириною близько 50 км, тобто близько до розмірів кванта тектонічного дії (КТД). Можна припускати, що на зайнятому процесом просторі активізація охоплює порівняно вузькі смуги, розташовані близько одна від одної. Така конструкція підтверджується і сейсмологічними даними [25, 26].

Перенесення речовини в мантії під платформою під час СА може відбуватися за різними схемами. Крім безпосереднього виносу з нижнього резервуару в верхній можуть формуватися і проміжні осередки частково розплавлених порід. Тоді може змінитися і гравітаційний ефект. В роботах [12—17 та ін.] визначена величина аномалії в різних районах континентів і океанів уздовж майже безперервного профілю навколо північної півкулі. Він проходить на територіях зон СА протягом тисяч кілометрів. І у всіх випадках аномалії, розраховані за найбільш простою схемою переміщення речовини (інтенсивністю близько 30 мГл), збігаються в межах похибки. Досить ймовірно, що саме такий процес відбувається і на СЄП.

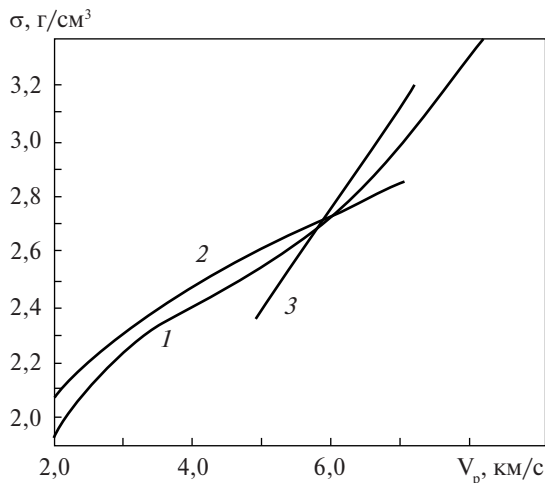
Перераховані дані дозволяють провести оцінку розподілу температур в тектоносфері в результаті СА, обчислити аномальні щільності порід мантії, визначити аномальний гравітаційний ефект. Результати наведені на рис. 1.

Розподілу щільності під зоною СА на рис. 1, б відповідає негативна гравітаційна аномалія щодо нормальної платформної мантії інтенсивністю



**Рис. 1.** Теплова (а), щільнісна (б) моделі тектоносфери зони СА платформи шириною 60 км та гравітаційний ефект над зоною (в);  $T_{\text{платф}}$  — фоновая температура платформи, Sol — температура солідусу мантійних порід, Ol-Sp — покрівля зони поліморфного перетворення олівіну у шпінель, 1 — область значень  $T$  в центрі зон СА віком 5–25 млн років, 2 — середнє значення  $T$  в цьому віковому діапазоні; 1 — фоновая щільність порід мантії під платформою, 2 — середні значення аномальної щільності у межах зони СА на глибинах

близько 36 мГл. Вона узгоджується із величиною, що спостерігається в багатьох таких зонах платформ. Але вважати це точним підтвердженням застосованих кількісних характеристик схеми процесу не слід. Використовувалися «округлені» значення глибин покрівлі і подошви верхнього і нижнього резервуарів переміщеної речовини (50–100 і 300–400 км) та середній вік процесу. При їх зміні можуть бути отримані дещо інші значення. Таким чином, проведений розрахунок не суперечить прийнятому характеру події, не більше того. З іншого боку, потужність верхнього і нижнього (нагрітого і охолодженого) поверхів адвекції досить виразно обмежується сейсмологічними даними [18, 19 та ін.]. При розрахунках, виконаних для шарів із глибинами 40–90 і 280–420 км, гравітаційний ефект фактично не відрізняється від вказаного вище.



**Рис. 2.** Види зв'язку  $\sigma = f(V_p)$  для корівих порід за даними різних авторів. 1 — [28, 29], 2 — [32], 3 — [30]

Таким чином, загальна схема вивчення мантіїної гравітаційної аномалії в платформних регіонах України є досить конкретною. Для успішного вирішення поставленої задачі необхідно провести максимально точний розрахунок ефекту кори уздовж профілів ГСЗ і оцінити його значення між профілями.

### Елементи методики розрахунку ефекту кори

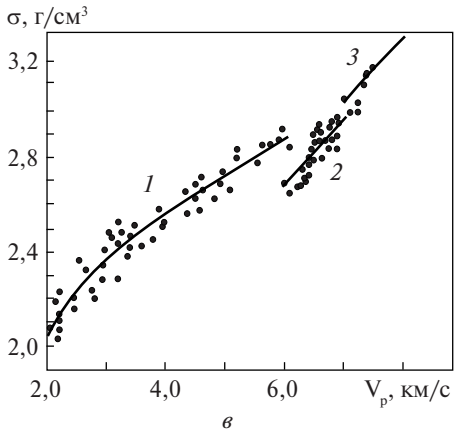
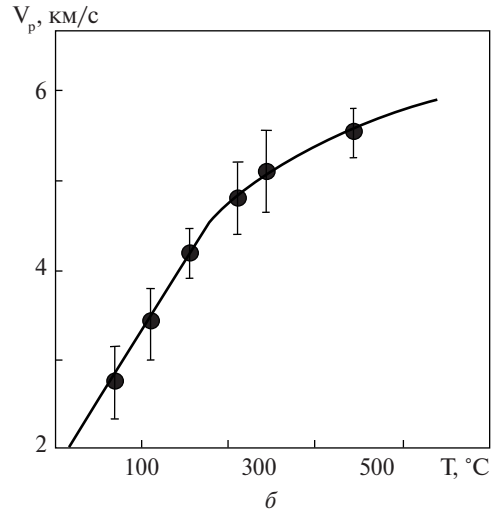
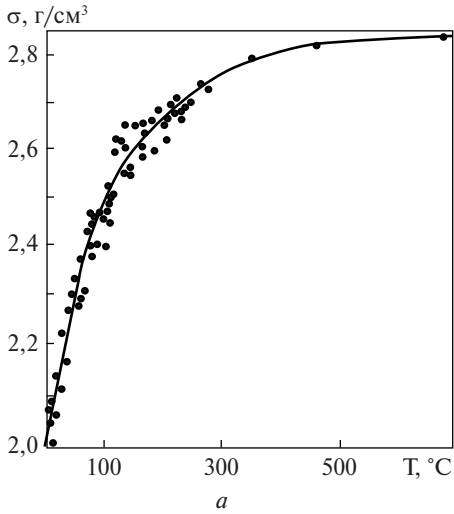
Загальні положення методики розрахунку наведені в декількох роботах [10 та ін.] і тут повністю не повторюються. Відзначимо кілька моментів, істотних для моделювання саме при використанні українських даних, що стосуються як розрахунку щільності по  $V_p$ , так і якості використовуваних швидкісних розрізів ГСЗ. Згадаємо і обґрунтування «норми», за допомогою якої порівнюються розраховане і спостережене поле кори.

Для обчислення щільності порід кори і верхніх горизонтів мантії за значеннями швидкості поздовжніх сейсмічних хвиль широко використовують варіанти кривої Нейфа-Дрейка. Вважається, що її підбір з використанням місцевих даних охоплює всі види залежності для існуючих порід, необхідні для щільнісної моделі [28—30, 34 та ін.]. Це враження створюється великим діапазоном використаних значень параметрів. Як приклад можна згадати формулу Брочера [28, 29 та ін.] (рис. 2).

$$\sigma = 1,6612v - 0,4721v^2 + 0,0671v^3 - 0,043v^4 + 0,000106v^5.$$

Хоча опис використаного автором експериментального матеріалу явно вказує на обмежений інтервал РТ параметрів літифікації порід. У колекції присутні майже виключно неоген-четвертинні неущільнені осади, потужність яких швидко зростає під впливом близькості джерел зносу в замкнену депресію. Товща підстеляється салічними гранітами, значення швидкості в них близько 5,8 км/с, щільність близько 2,7 г/см<sup>3</sup>. Інші, наведені на рис. 2 різновиди кривих, в цілому представляють наявний діапазон варіантів.

В умовах України молоді осадові утворення, змінені зануренням тільки до рівня діагенезу, поширені в меншому інтервалі глибин. Виняток — заповнення глибоководних западин Чорного моря, вивчення яких не входить в завдання да-



**Рис. 3.** Зміни щільності (а) і швидкості (б) осадових порід України в процесі діа- та катагенезу, зв'язок швидкості та щільності порід земної кори (в). 1 — осадові породи; 2, 3 — кристалічні породи в діапазонах швидкостей: 2 — до 7,2 км/с ( $\sigma = 2,69 + 0,27(V_p - 6)$ ), 3 — понад 7,2 км/с ( $\sigma = 3,02 + 0,28(V_p - 7)$ ) [10, 13 та ін.]

ної роботи. Найбільш представницький матеріал є по Дніпровсько-Донецькій западині (ДДЗ), Донбасу, Індоло-Кубанському прогину [9, 13, 24 та ін.]. Тут за комплексом фізичних властивостей виділяється верхня мезо-кайнозойська частина осадової товщі з явно підвищеною (у порівнянні із розташованими нижче палеозойськими осадами) пористістю. Розподіл  $\sigma$  в інтервалі глибин 0–3 км при температурах 10–90 °С майже повністю відповідає даним рис. 2 в діапазоні швидкостей 2–4 км/с [9, 13 та ін.] (рис. 3).

Як видно з рис. 3, а, щільність осадових порід на стадії пізнього катагенезу (при температурі понад 200 °С) досягає мінерального рівня (тобто практично нульової пористості). Це можна проілюструвати даними по утворенням нижнього карбону, що виходять на сучасний ерозійний зріз у Нагольному пасмі Донбасу (рис. 4).

Інформація про щільність і швидкість діа- та катагенетично змінених порід дуже об'ємна, серед використаних даних основну роль грають дані по шахтним полям Євразії та Північної Америки. Очевидно, що вибір варіанта зв'язку щільності і швидкості в діапазоні  $V_p$  4–6 км/с має на увазі знання геологічної історії регіону. В цьому випадку можна відновити РТ-умови існування частини осадового шару і використовувати потрібну форму кривої. Відмінності щільності по-

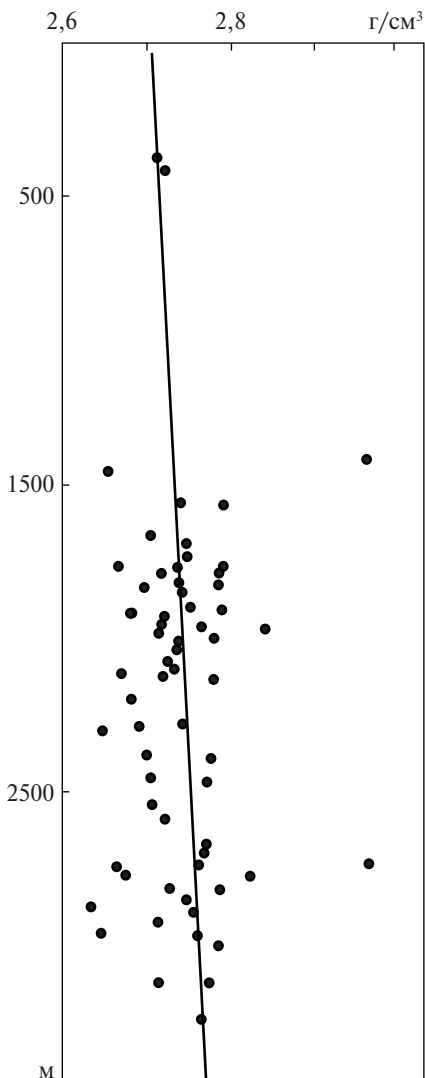


Рис. 4. Щільнісний розріз по свердловині Бобрик-1 [22]

на порядок. Це забезпечує надійний вибір порід, для яких зіставляються щільності і швидкості. При практично точному збігу середньої щільності кори з моделлю Христенсена і Муні в нашій моделі кислотність та її зміна по вертикалі значно менше.

Вид зв'язку щільності і швидкості порушується в зоні часткового плавлення. Для помітних за потужністю шарів поза вулканічними камерами (в межах кори України вони в даний час малоймовірні) ступінь плавлення складає близько 2% [17 та ін.]. Швидкість знижується приблизно на 0,15 км/с, зміна щільності зникаюче мала — менше 0,01 г/см<sup>3</sup>. Таким чином, розраховане за швидкістю значення щільності в зоні плавлення слід збільшити на 0,05 г/см<sup>3</sup>.

ширених в Україні літогенетично змінених порід від використаних в [28] становить близько 0,15 г/см<sup>3</sup> в значному інтервалі глибин, розрахункові ефекти можуть відрізнятися на десятки мГл.

Крім того, перевищення щільності катагенетично перетворених (зокрема і в ході сучасної активізації) порід, що підстилаються гранітоїдами, призводить до щільнісної інверсії, яка не виявляється в розподілі  $V_p$ . Такий контраст може бути причиною вертикального переміщення блоку порід, що викликає корову сейсмічність. Це здається найбільш ймовірним в альпідах і підтверджується даними по геосинкліналях Тетису і частини Тихоокеанського поясу (за винятком кіммерійських фрагментів останнього) [33].

Використання формул перерахунку швидкості у щільність в кристалічній частині кори пройшло багаторічне випробування, непогано узгоджується із варіантом кривої по [28] і не призводить до значних розбіжностей у розрахованих ефектах при застосуванні двох виразів для верхньої і нижньої (осново-гранулітової) частин або одного (що згладжує розрив на рис. 3).

Варіант  $\sigma = f(V_p)$  для кристалічної кори за Христенсеном і Муні [30] здається «негеологічним». Побудована модель складу кори являє собою змішання всіх можливих даних і не існує в природі. Типовий розподіл складу і ступеня метаморфізму консолидованої частини кори України вивчено за комплексом геофізичних даних [12]. Важливу роль тут відіграє радіогенна теплогенерація (ТГ), яка, на відміну від щільності і швидкості, змінюється в корі по вертикалі



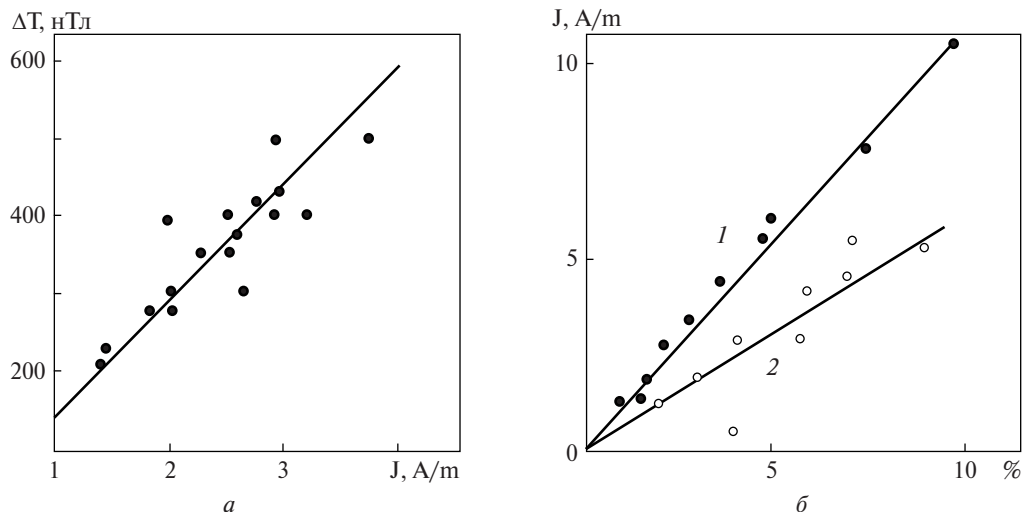


Рис. 5. Зв'язок максимальної інтенсивності регіональної магнітної аномалії ( $\Delta T$ ) і намагніченості ( $J$ ) порід джерела (а) і зв'язок  $J$  з концентрацією магнетиту (1) та немагнітних рудних мінералів (2) [10, 12]

Прийнятий вид зв'язку щільності і швидкості для консолідованої частини кори отриманий не тільки за емпіричними даними, а й на основі вивчення середньої атомної ваги мінералів порід і характеристик кристалів. Розрахунки з їх використанням було проведено за законами Берча і Борна-Кармана. Результати повністю узгоджуються. Це дозволяє з більшою визначеністю вважати праву частину кривої [32] невірною.

Істотне ускладнення розрахунку пов'язане з перетином профілем ГСЗ регіональної аномалії магнітного поля. У блоках кори з платформними значеннями  $T$  джерела магнітних аномалій можуть бути поширені в будь-якій частині кристалічної кори, бо температура Кюрі магнетиту не перевищується. Реальні концентрації цього мінералу припускають існування багатокілометрової потужності джерел (рис. 5, а). Тільки малоінтенсивні регіональні аномалії можуть забезпечуватися джерелами у верхній частині кори. Найбільш вірогідні інтервали глибин 15–40 км [11, 12]. У прогрітій корі зон сучасної активізації нижня частина джерел може виявитися немагнітною через перевищення температури Кюрі. Але вона, тим не менш, буде містити підвищену концентрацію магнетиту, що збільшує щільність порід. При відсутності помітної магнітної аномалії це залишиться невідомим. За її наявності можна розібратися, чи змінюється зв'язок швидкості та щільності за таких обставин.

Відомості про склад основних порід гранулітової фації, відомі по ксенолітам, показують, що поряд з магнетитом вони вміщують і немагнітні рудні мінерали (рис. 5, б). Середня щільність всіх рудних близько  $4,9 \text{ г/см}^3$ . Щільнісна аномалія в інтервалі глибин від 15 км до Мохо під магнітною аномалією інтенсивністю близько 300 нТл складе  $0,2 \text{ г/см}^3$ . Середня швидкість поздовжніх сейсмічних хвиль для прийнятого складу рудних оцінюється в 7 км/с, тобто помітно не відрізняється від наявної в породах середньої і нижньої кори (6,8 км/с) та не створює значущого збурення швидкості при вмісті рудних до 10–15 %. Тому зі швидкісного розрізу щільнісна аномалія такої природи не може бути виявлена.

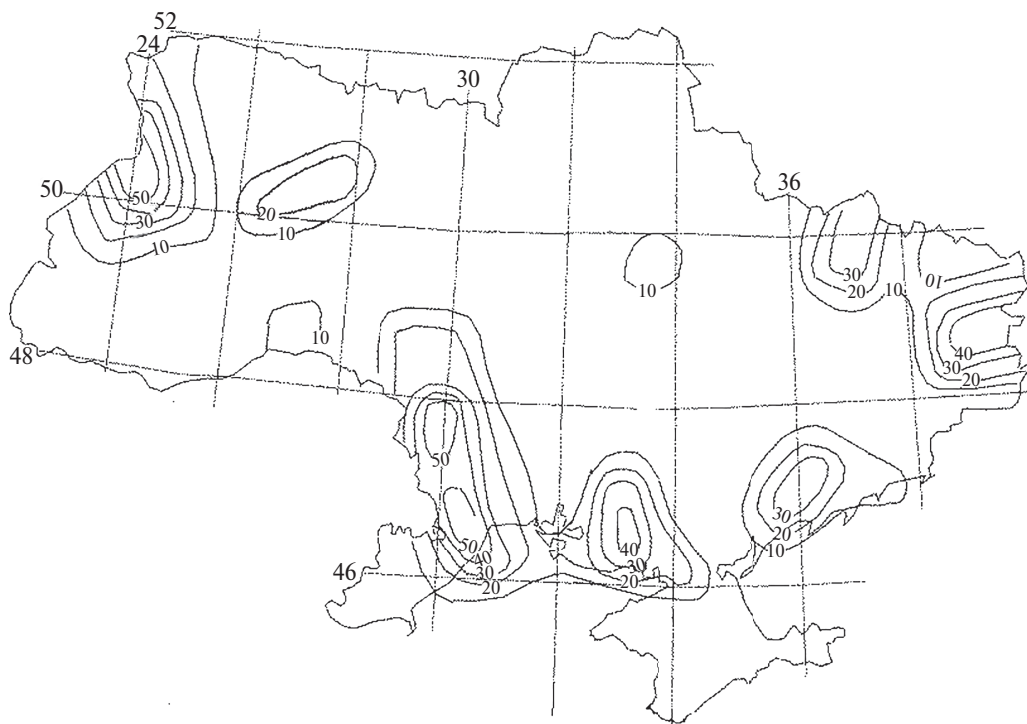


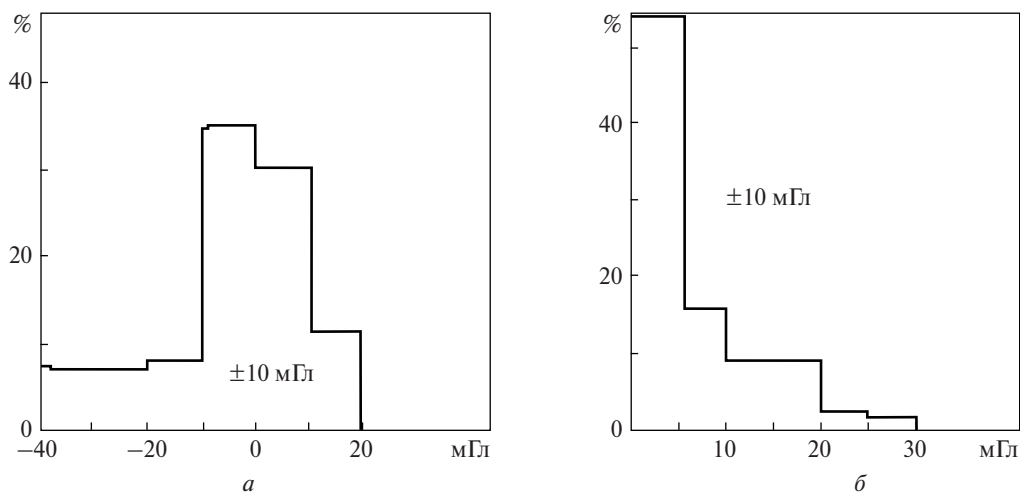
Рис. 6. Гравітаційний ефект (ізолінії в мГл) щільнісних аномалій в корі під регіональними магнітними аномаліями [14 та ін.]

Неврахування блоку підвищеної щільності в моделі призводить до значних помилок в розрахунковому ефекті. Результати розрахунку додаткового збурення  $\Delta g$  для України показані на рис. 6.

При регіональних дослідженнях, що використовують в якості спостереженого осереднене поле, такі аномалії часто малопомітні, незважаючи на розмір в кілька сотень км. При використанні більш детального поля їх доводилося врахувати: на спокійному полі вони виділялися рельєфно. Розрахунок щільності в районі типової регіональної магнітної аномалії можна провести з урахуванням намагніченості її джерела:  $\sigma = 1,55 + 0,19V_p + 0,03J$ .

При порівнянні спостереженого гравітаційного поля і ефекту земної кори використовувався прийом ототожнення нульового поля (аномалії Буге на суходолі або Фая на акваторії) та певної величини ефекту. Для зручності він розраховувався для щільностей, аномальних по відношенню до  $\sigma$  порід платформної мантії під Мохо —  $3,32 \text{ г/см}^3$ . Ефект становить мінус 870 мГл. Проведеними розрахунками відповідна величина підтверджена за даними на фрагментах профілів через СЄП і Сибірську платформу загальною протяжністю близько 2500 км [12]. Порівняння, природно, проведено на територіях, де можна обґрунтовано припустити відсутність СА. Повної впевненості у вірності такого припущення немає, але використання великого обсягу даних може забезпечити наближення до вірного результату. Середня розбіжність полів становить близько 10 мГл (рис. 7, а).

Оцінка якості швидкісних розрізів ГСЗ, використаних для розрахунку щільнісних моделей, була проведена порівнянням їх гравітаційних ефектів.



**Рис. 7.** Гістограми розподілів: *a* — різниці між розрахованим гравітаційним ефектом земної кори платформи поза СА і спостереженим полем; *б* — відмінності у гравітаційних ефектах земної кори, розрахованих для варіантів швидкісних розрізів ГСЗ

Зіставлені варіанти для розрізів, виконаних різними авторами, наведені в літературі [16, 17 та ін.]. Ефекти в місцях перетину профілів, дані для профілів, що практично збігаються (D-4 і ГVШ, D-5 і ГV), також залучені для порівняння. Пункти відібрані з кроком уздовж профілів 50 км, порівняння виконані в 80 пунктах, представлені всі основні тектонічні одиниці України. Результати наведені на рис. 7, б. Середня величина розбіжностей збігається з отриманою на рис. 7, а. Очевидно, що використані методики розрахунку щільності по швидкості (включаючи описані вище складності) не створюють додаткових відмінностей в ефекті, визначена похибка (близько 7 мГл) пов'язана із помилкою визначення швидкості сейсмічних хвиль.

### Розрахунок мантіяної гравітаційної аномалії

Ця операція в даному випадку не проводилась для Скіфської плити. На результативній карті збережені значення, отримані раніше [14, 17 та ін.]. Уточнено з використанням зроблених доповнень видів зв'язків швидкості і щільності ефекти земної кори уздовж профілів на території України і за її межами (в Західних Карпатах, на Паннонському масиві, Молдавській плиті, на Воронезькому кристалічному масиві тощо), використаних в роботах [7, 12—18].

Обчислення мантіяної аномалії — різниці між спостереженим полем і ефектом кори — проведено для сітки розміром  $0,2^\circ$  с. д. на  $0,15^\circ$  пн. ш. У спостереженому полі таким чином виключалися локальні аномалії, явно не пов'язані з об'єктами величиною на рівні КТД. Осередкам сітки, за якими проходять профілі ГСЗ, приписані відповідні значення ефекту. Обробка отриманої сітки його значень повинна забезпечити побудову карти всієї досліджуваної території. Використана методика кригінга [20, 31, 32, 34 та ін.].

Кригінг — це форма узагальненої лінійної регресії для формулювання оптимальної просторової оцінки в сенсі мінімальної середньоквадратичної помилки. З огляду на деякі спостереження на території, кригінг забезпечує оцінку і стан-

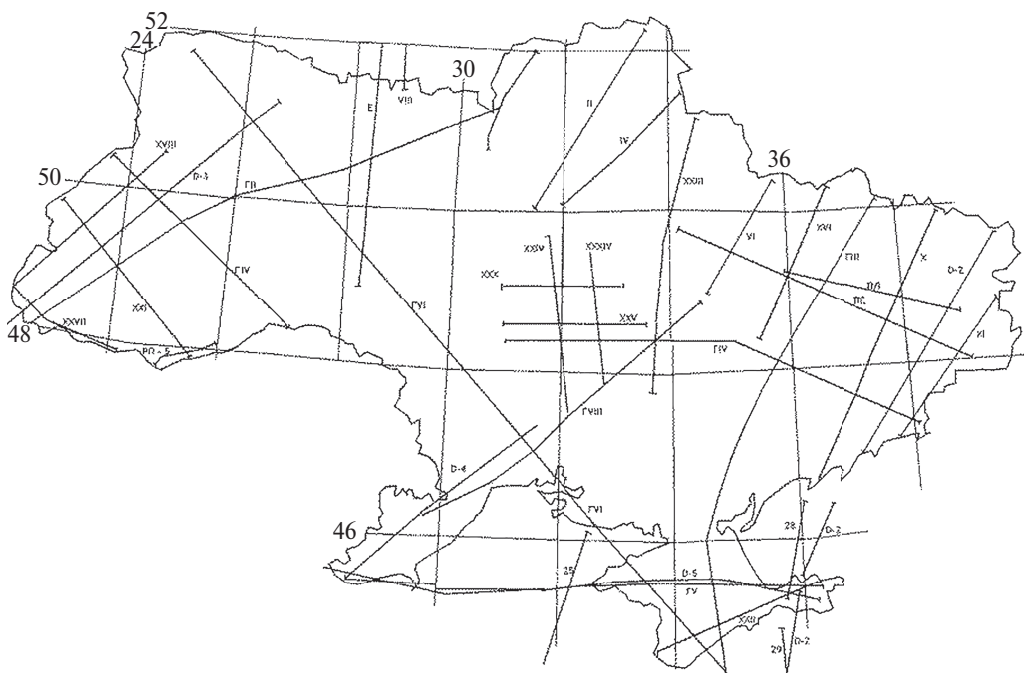


Рис. 8. Профілі ГСЗ на території України, використані для розрахунку гравітаційного ефекту кори

дартну помилку в пунктах відсутності інформації. На відміну від класичної лінійної регресії, кригінг враховує обсяг спостережень і стохастичну залежність між даними. Метод найкраще працює всередині оболонки, яка визначається за периферійними даними.

Практично для розрахунків з використанням експериментальних даних уздовж профілів на СЄП і в Карпатах придатним виявляється звичайний кригінг, що не вимагає встановлення локального середнього.

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) Z(x_i),$$

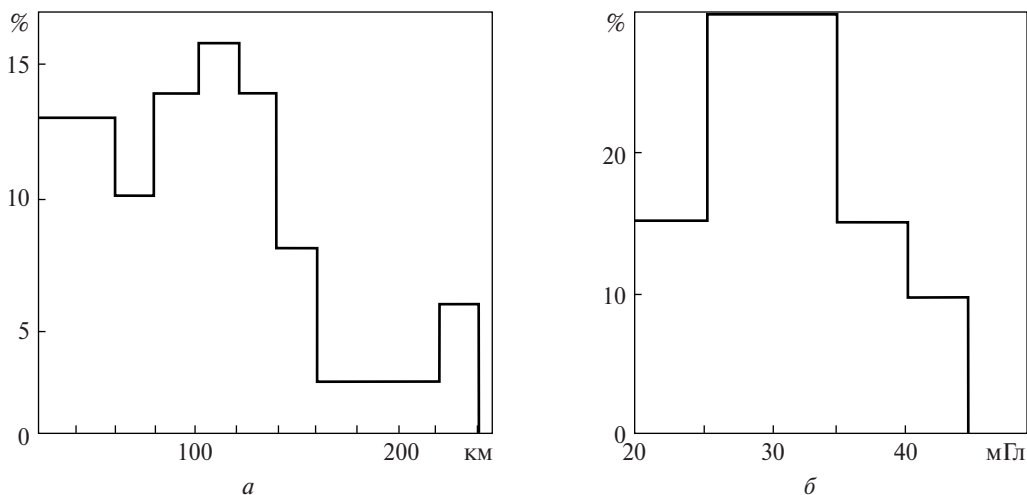
$\lambda_i$  — вага даного виміру (дійсне число), що включає відстань до точки прогнозу.

Умову незміщеності буде виконано, коли сума ваг, використаних при оцінці, дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) = 1.$$

Розв'язуються системи з  $n$  рівнянь. Найвний матеріал володіє значними технічними перевагами у порівнянні з більш хаотичною інформацією. Тут нескладно будувати в багатьох районах замкнені полігони з використанням профілів, що перетинаються. Відсутнє екранування спостережених значень, і з очевидних причин виключаються прогнознi результати з позитивним знаком. Виходячи з відомих даних (розташування пар КТД поруч або на невеликій відстані) можна обгрунтовано припустити радіус кореляції не менше 60—80 км. Таким чином, в розгляд включаються полігони між профілями до 120—160 км (рис. 8).

Для мережі профілів України за цими межами залишаються тільки 12% даних, для яких достовірно оцінювання не досягалося (рис. 9).

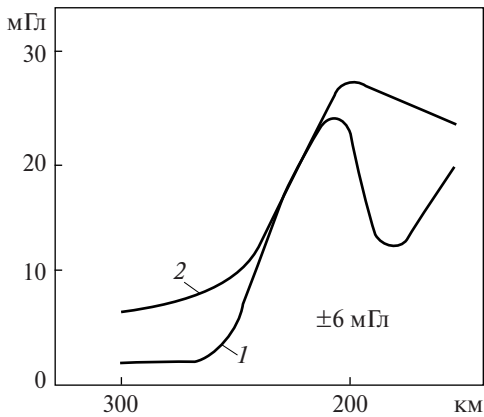


**Рис. 9.** Гістограми розподілу: *a* — відстаней між профілями ГСЗ, використаних для кригінгу, *б* — територій поширення величин мантіїної гравітаційної аномалії на платформній частині України

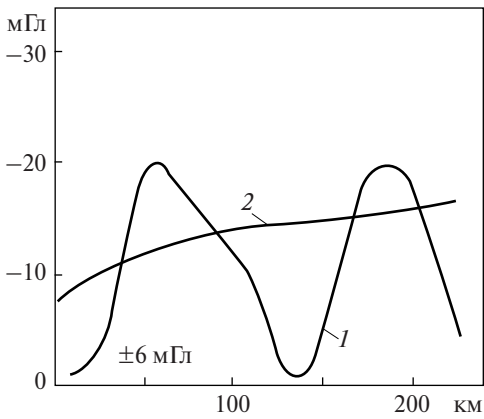
Для геотраверсів Вранча — Південно-Українська АЕС і Бухарест — Чорнобиль [25, 26] межі зони СА поблизу кордону з Молдовою проведено без розрахунку мантіїної гравітаційної аномалії. Виявлені тут швидкісні неоднорідності в верхніх горизонтах мантії досить точно відповідають тепловим аномаліям при СА (див. рис. 1). Узгоджуються із краями гравітаційної аномалії райони, де розподіл швидкості у верхній мантії стає практично платформним.

Побудова варіограм прогнозного параметра в залежності від розмірів осередків мережі вимірювань дозволяє оцінити ймовірну похибку прогнозу. У нашому випадку (як і в багатьох інших) варіограмна хмара досить розпливчата, вимагає в кожному випадку узагальнення значного матеріалу. Хоча варіант розподілу типу нагет тут, природно, виключений. Здається раціональним використовувати інший підхід до аналізу можливих помилок. Він ґрунтується на тому, що в межах досліджуваної території України можна підібрати досить багато систем із трьох субпаралельних профілів, на яких визначена величина мантіїної гравітаційної аномалії (в Дніпровсько-Донецькій западині, Карпатах, в центральній частині Українського щита тощо). З використанням даних по двох крайніх профілях з кожних трьох розраховані прогнозні значення на території між ними. Вони зіставлені з результатами на центральному профілі. Відхилення прогнозних величин від них становлять в середньому близько  $6 \pm 3$  мГл (рис. 10).

На платформі явно видно ефект, що відзначається всіма роботами по кригінга: прогнозне поле згладжене у порівнянні із експериментальними значеннями (рис. 10) [19, 33]. Це неминучий результат застосовуваного осереднення. При невеликій інтенсивності досліджуваних аномалій вони можуть бути пропущені. У Карпатах така небезпека відсутня, похибки оцінок кригінга непорівнянні з інтенсивністю збурень в альпійській геосинкліналі. Зображення ізоліній аномальних значень на карті потребує коментарів. Методика кригінга включає уявлення про «товсті» ізолінії. Вони не показані на карті, проте значен-

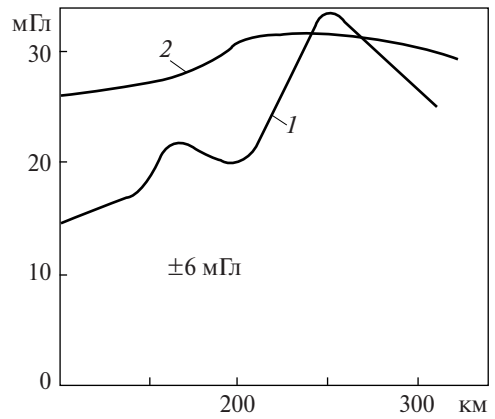


а

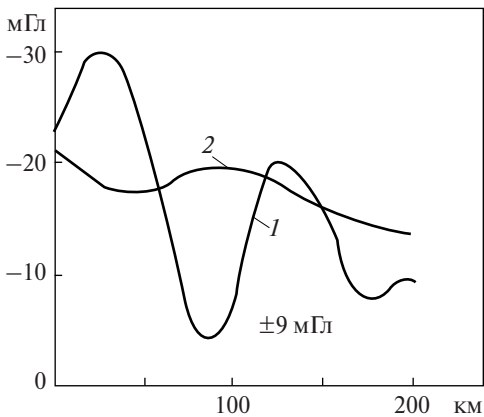


б

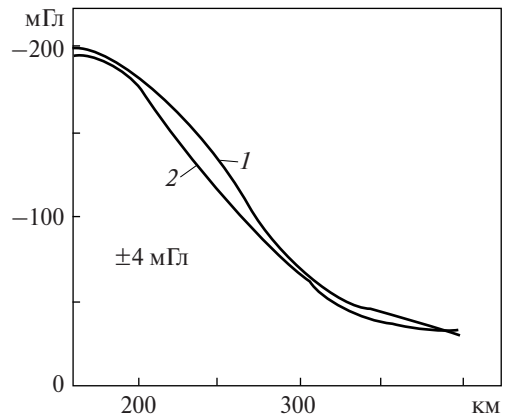
**Рис. 10.** Порівняння результатів, отриманих розрахунком на профілях ГСЗ (1), і шляхом кригінгу із використанням даних по сусідніх профілях (2)



в



г



д

ня 20 мГл приблизно відповідає діапазону 15–25 мГл. Нижче показано, що в такий розширений простір потрапляють локальні прояви активізації. Відстані між крайніми профілями мають великі значення: від 40–50 до 190–200 км (рис. 9, а). Можна припускати, що отримані величини досить повно характеризують похибку виконаного прогнозу. Згідно з нею за мінімальні достовірні ізолінії на карті прийнято 20 мГл.

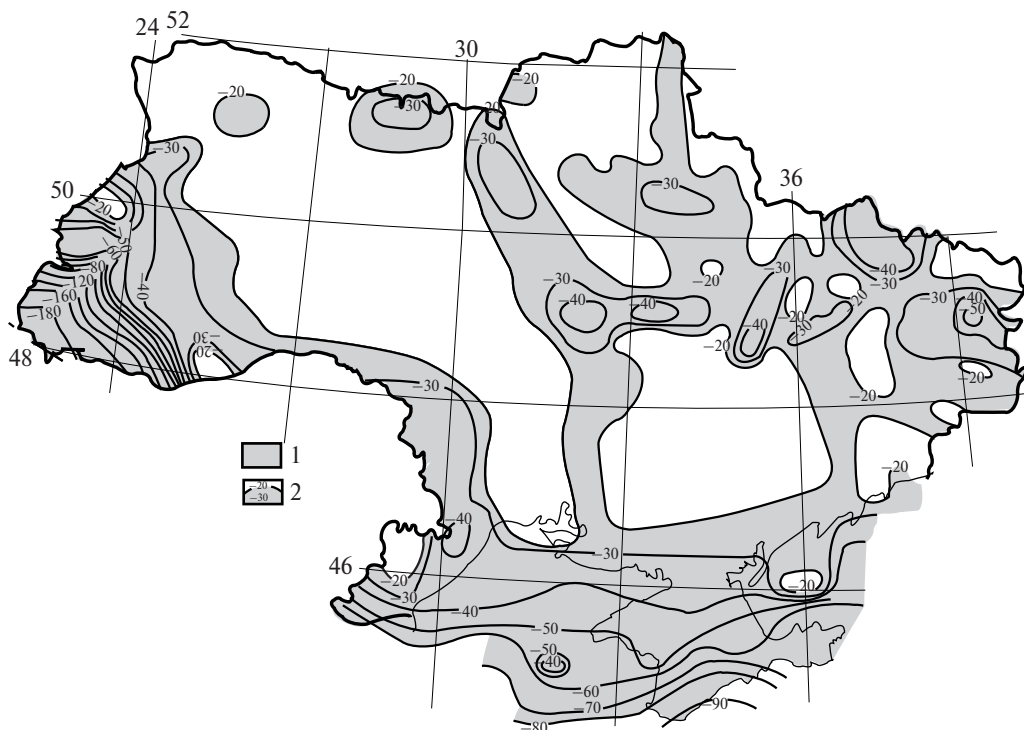


Рис. 11. Карта інтенсивності мантіїної гравітаційної аномалії території України: 1 — область поширення значущих величин мантіїної гравітаційної аномалії, 2 — ізолінії, мГл

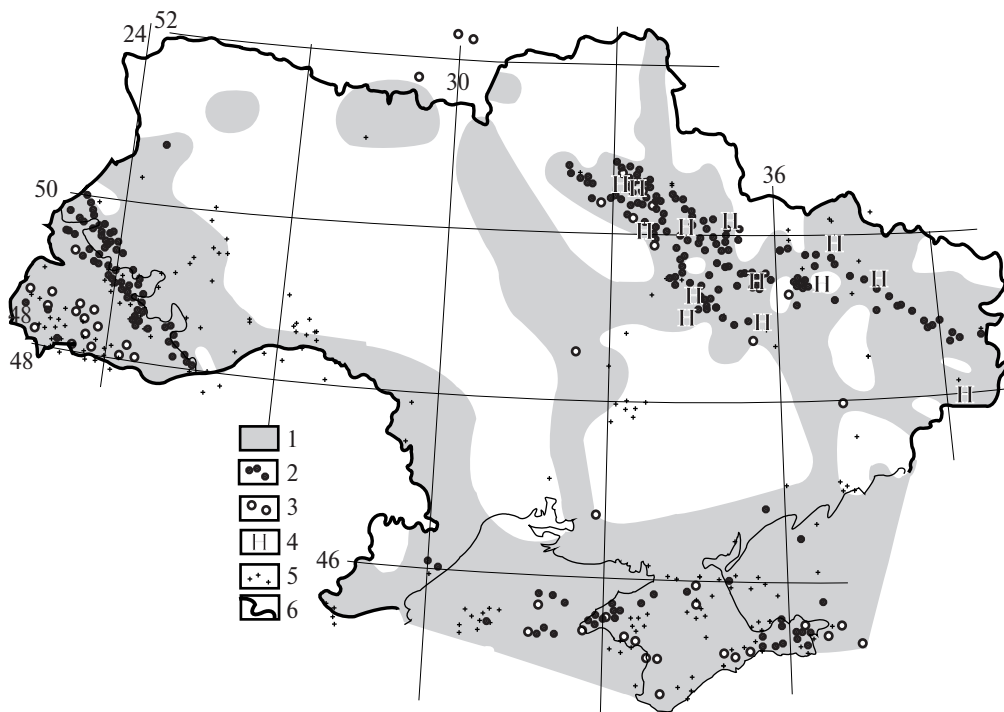
Отримана карта має вигляд, представлений на рис. 11.

У середині аномалії розташовуються практично всі локальні ознаки сучасної активізації, що займають її значну частину (рис. 12).

Розподіл значущої величини аномалії помітно змінився (за винятком Скіфської плити, де вона не переглядалася) в порівнянні із попереднім варіантом [19 та ін.]. В межах платформної частини території України значення в середньому (рис. 9, б) виявилися близькі до попередньо розрахованих по тепловій моделі верхньої мантії (див. вище) і встановлених в інших регіонах Східно-Європейської та Сибірської платформ.

У середині зони СА представлені всі пункти з аномальною ізотопією гелію, що вказує на активізацію мантії і надходження мантіїної речовини в кору. Тут же знаходяться практично всі родовища нафти і газу. Лише поодинокі поклади і пункти розташовуються поза вказаними межами, але на незначній відстані. Рекомендовані методикою кригінга «товсті ізолінії» (в нашому випадку — мінус 20 мГл) [20] приєднують ці елементи до аномалії.

За її межі помітно виходять тільки епіцентри землетрусів. Можливо, це тому, що молоді активізовані розломи простежуються далеко за межі зон сучасної активізації [8]. В районі Кривого Рогу сейсмічність може бути частково стимульована техногенно. Слабка сейсмічність в центральній частині України, ймовірно, поширена значно ширше, ніж показано на рис. 12. Тут недостатньо щільна мережа сейсмостанцій, багато показаних на рисунку епіцентрів наведено за даними мережі Росії.



**Рис. 12.** Зіставлення значущої мантійної гравітаційної аномалії з критеріями виділення зон сучасної активізації: 1 — площа мантійної гравітаційної аномалії, 2 — родовища вуглеводнів, 3 — пункти з аномальною ізотопією гелію, 4 — пункти виділення водню з концентрацією 1—60 %. 5 — епіцентри землетрусів, 6 — східний кордон розповсюдження проявів молодшої рудної мінералізації в Карпатському регіоні [27 та ін.]

Залучення в якості прогностичної ознаки СА підвищеного вмісту водню в глибинному газі родовищ [1, 2, 22] пов'язано із тим, що його виділення — неминучий супутник серпентинізації базитових гранулітів нижньої частини кори. У районах із достатнім вмістом вуглецю у верхній корі водень витрачається на формування вуглеводнів. Частина може залишитися невитраченою, у безвугільному нижньому карбоні Нагольного пасма вона значна [14, 16 та ін.].

## Висновки

Виконана робота дозволила на більш достовірному рівні представити поширення на території України мантійної гравітаційної аномалії і обґрунтувати картування нею зон сучасної активізації без участі інших критеріїв, достовірність яких нижче [18].

Слід коротко зупинитися на типовій величині мантійної гравітаційної аномалії в зоні СА, поширеної не тільки на території України, а й у багатьох інших регіонах світу (див. вище). На рис. 1 показана аномалія, викликана одиничним КТД шириною 60 км. Над об'єктом вона становить в середньому 36 мГл. При близькому розташуванні декількох КТД величина аномалії буде більше. Однак типове експериментальне значення становить 30 мГл (рис. 9). Розглядати подібну відмінність є сенс тільки в зв'язку із дуже незначною величиною аномалії. Можливо, причина розбіжності пов'язана із помітними варіаціями у теплогенерації (ТГ) порід мантії в різних частинах платформи [21]. В нашому випад-



ку знижені значення ТГ (і, відповідно, глибинні температури, супроводжувані підвищеними щільностями) можна припустити в протяжній переривчастій смузі низьких теплових потоків шириною 50—70 км і довжиною в межах України близько 600 км. Вона простягається від північно-західної околиці Українського щита до південно-східної.

Зниження температури порід мантії в межах смуги підтверджується даними геотермометрів [12]. Деяким підтвердженням може служити і розподіл швидкостей у верхній мантії на геотраверсах Вранча — Південно-Українська АЕС і Бухарест — Чорнобиль [25, 26]. Ізолінії швидкості на глибинах від Мохо до 100 км розташовуються на 10 км вище розрахункових. Це відповідає охолодженню мантії в порівнянні з типовою платформною приблизно на 80 °С. Тобто на глибинах 50—100 і 300—400 км (за розрахунком) величина аномального охолодження менше похибки, в інтервалі 100—300 км негативне збурення становить в середньому близько 150 °С. Тут можна припустити незначне зростання щільності в порівнянні з типовим платформним приблизно на 0,010—0,015 г/см<sup>3</sup>. На відстанях від центру смуги в 0—400 км її вплив знизить розрахункову аномалію в зоні СА на 10—2 мГл. Цього приблизно досить для пояснення виявленої відмінності.

Побудована карта демонструє деяку зміну розташування аномалії (відповідно, зон СА) від встановленої раніше. Зокрема, аномалія відсутня в Деснянському басейні Дніпровсько-Донецької западини. Власне, гравітаційна мантійна аномалія була відсутня там і раніше, поширення зони СА на територію басейну було позначено за іншими критеріями невисокої достовірності.

Вдається фіксувати присутність аномалії на території між Приазов'ям і Донбасом, де вона раніше не діагностувалася. Цей результат все ж потребує підкріплення додатковими даними. Перш за все через спостережену істотну розбіжність між різними варіантами швидкісних розрізів уздовж профілів ГСЗ.

Помітно розширилася на північний схід аномалія у північній частині Волине-Подільської плити і у Львівському палеозойському прогині. Але вона фіксується тільки в околицях фрагментів профілів ГІV і ХVІІІ, не поширюючись на профілі D-3 і СЕL-05.

Намічається скорочення інтенсивності аномалії (аж до локальної відсутності значущих її величин на окремих ділянках) на межі Волине-Подільської плити і Карпатського регіону. З'явилися дані про фрагмент аномалії у північно-західній частині Українського щита і його схилу. Не виключено «замикання» ланцюжка збурень гравітаційного поля мантії між Прип'ятським прогином і Передкарпаттям. У цьому районі щільність мережі українських профілів ГСЗ одна з мінімальних. Виявлений фрагмент аномалії (див. рис. 11) має мінімальну значущу інтенсивність, і за даними уздовж профілю СЕL-05 на території Польщі мантійна аномалія на північ від Західних Карпат відсутня. Тобто існування цього фрагменту аномалії залишається під питанням.

Слід зазначити, що висловленому припущенню в принципі не суперечить збіг аномалії зі смугою зниженої теплогенерації в породах мантії. На глибинах 300—400 км температури тут близькі до наявних під зоною СА до початку активного процесу. Цілоком може початися адвекція на обмеженій території.

В цілому очевидна необхідність подальших досліджень мантійної гравітаційної аномалії на території України, але й вже досягнуті результати дозволяють більш впевнено судити про поширення зон сучасної активізації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Багрій І.Д. Інтерв'ю сайту «Главком». 25.08.2020. URL: [https://glavcom.ua/new\\_energy/publications/701046.html](https://glavcom.ua/new_energy/publications/701046.html).
2. Багрій І.Д., Кузьменко С.А. Научное обоснование пространственного распределения и картирования аномальных проявлений водорода — энергетического сырья XXI в. в нефтегазоносных структурах Украины и предупреждения геодинамических явлений. *Геол. журн.* 2019, № 1. С. 59—77.
3. Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. Москва: Госгеолтехиздат, 1954. 606 с.
4. Белоусов В.В. Развитие земного шара и тектогенез. *Советская геология.* 1960, №7. С. 3—27.
5. Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. Изд. 2-е, Москва: Госгеолтехиздат, 1962. 608 с.
6. Богданов А.А., Муратов М.В., Хаин В.Е. Об основных структурных элементах земной коры. *Бюлл. МОИП*, 1963. Т. 38, вып. 3. С. 17—29.
7. Варенцов И.В., Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. и др. Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2013. 112 с.
8. Верховцев В.Г. Новітні вертикальні рухи земної кори території України, їх взаємовідношення з лінійними та кільцевими структурами. *Енергетика Землі, її геолого-екологічні прояви, науково-практичне використання.* Киев: КНУ, 2006. С. 129—137.
9. Голиздра Г.Я., Попович В.С. Плотностные модели осадочной толщи юго-восточной части ДДВ, западной и северной окраин Донбасса. *Геофиз. журн.* 1998, № 6. С. 117—123.
10. Гордиенко В.В. Плотностные модели тектоносферы территории Украины Киев.: Интеллект, 1999. 101 с.
11. Гордиенко В.В. Магнитные модели земной коры территории Украины. Киев: Знання, 2000. 91 с.
12. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). Киев: Корвін прес, 2005. 210 с.
13. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. та ін. Днепроовско-Донецкая впадина (геофизика, глубинные процессы). Киев: Корвін прес, 2006. 142 с.
14. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Украинские Карпаты (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2011. 128 с.
15. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Вольно-Подольская плита (геофизика, глубинные процессы). Киев: Наук. думка, 2012. 193 с.
16. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Донбасс (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2015. 159 с.
17. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Южно-Украинская моноклинали, Скифская плита, Черное море (геофизика, глубинные процессы). Киев: ИГФ НАНУ, 2017. 126 с URL: [http://mmtk.ginras.ru/pdf/gordienko\\_et al2018.pdf](http://mmtk.ginras.ru/pdf/gordienko_et al2018.pdf).
18. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Гордиенко Л.Я. и др. Зоны современной активизации территории Украины. *Геофиз. журнал.* 2020, № 2. С. 29—52.
19. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скорости Р-волн в верхней мантии платформ. *Геофизические процессы и биосфера.* 2021. Т. 20. № 1. С. 14—22.
20. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. Москва: Наука, 2010. 327 с.
21. Мирчинк Г.Ф. Основные закономерности развития земного лика. *Бюлл. МОИП*, отд. геол., 1940. 18, вып. 3—4. С. 53—60.
22. Мурич А.Т., Резников А.Л., Абражевич Е.В. и др. Результаты глубокого бурения в центральной части Донбасса. *Советская геология.* 1975, № 8. С. 125—131.
23. Николаев Н.И., Шульц С.С. Карта новейшей тектоники СССР. *Изв. АН СССР*, сер. геогр., 1961, № 4. С. 52—64.
24. Попович В.С. Разуплотнение глин надпродуктивной толщи нефтегазовых месторождений. *Прикладная геофизика.* 1987. 117. С. 104—110.
25. Харитонов О.М., Красовский С.С., Куприенко П.Я. и др. Литосферный трансект Вранча — Южно-Украинская АЭС. *Геофиз. журнал.* 1993, № 5. С. 23—31.
26. Харитонов О.М., Омельченко В.Д., Дрогицкая Г.М., Кутас В.В. Литосферный трансект Бухарест-Чернобыль. *Допов. НАН України.* 1995, № 5. С. 84—87.

27. Шумлянський В.О., Деревська К. І., Дудар В. Т. та ін. Літогенез і гіпогенне рудоутворення в осадових товщах України. Київ: Знання України, 2003. 272 с.
28. Brocher T.M. Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's crust. *Bull. Seis. Soc. Am.* 2005a. V. 95 (6). P. 2081—2092.
29. Brocher T.M. A regional view of urban sedimentary basins in northern California based on oil industry compressional-wave velocity and density logs, *Bull. Seism. Soc. Am.* 2005b. V. 95 (6). P. 2093—2114.
30. Christensen N., Mooney W. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view, *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. Issue B6. P. 9761—9788.
31. Davis J. *Statistics and Data Analysis in Geology*, (3rd ed). John Wiley & Sons. 2002. 656 p.
32. Gardner G., Gardner L., Gregory A. Formation velocity and density — the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*. 1974. V. 39, № 6. P. 770—780.
33. Gordienko V., Gordienko L. On a hypothetical mechanism triggering crustal earthquakes in Alpine geosynclines. *NCGT Journal*. 2021. № 1. P. 217—230.
34. Olea R. A practical primer on geostatistics. U.S. *Geological Survey. Open-File Report* 2009—1103, Version 1.4, 2018. 348 p.

Стаття надійшла 28.10.2021

V.V. Gordienko, Dr. Sci. (Geol.& Mineral.), Professor, Head of Department  
S.I. Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine  
32, Palladin ave., Kyiv, 03142, Ukraine  
E-mail: gordienkovadim39@gmail.com  
ORCID 0000-0001-9430-7801, Scopus authorId=7102473958

#### MANTLE GRAVITY ANOMALY AND RECENT ACTIVATION IN THE TERRITORY OF UKRAINE

The study of the zones of modern activation on the territory of Ukraine for a long time was carried out using a complex of geological and geophysical methods. Each of them is not without its drawbacks. The results obtained allowed us to assume that the determination of the mantle anomaly of the gravitational field can be eliminated their significant part and serve as a unified criterion for identifying the zones of modern activation. For this, it is necessary to improve the methodology for calculating the effect of the earth's crust, supplementing it with taking into account the degree of catagenesis of part of the rocks of the sedimentary layer, the effect of increased concentrations of ore minerals in the depths of regional magnetic anomalies, etc. Thus, a more accurate calculation of the effect along the DSS profiles can be achieved. In addition, it is necessary to ensure the determination of the gravitational effect of the crust in the area between the profiles. Kriging technology was used to solve this problem. It allows you to calculate the predicted values of the parameter using those known in other points and to estimate the error of the result. In our case, the usual kriging option was sufficient. To determine the errors, instead of the commonly used variograms, a comparison of data on one of the DSS profiles with those calculated by kriging from information on adjacent profiles was used. The resulting error turned out to be quite understandable, taking into account the errors of the initial data, and acceptable for using the results for mapping the mantle gravity anomaly, and, consequently, the zones of modern activation of Ukraine. The constructed map demonstrates some difference in the location of the anomaly (and, accordingly, the recent activation — RA zones) from the previously established one. In particular, the anomaly is absent in the Desnyanskiy basin of the Dnieper-Donetsk depression. Actually, the gravitational mantle anomaly was absent there before, the spread of the RA zone into the basin was indicated by other criteria of low reliability. It is possible to record the presence of an anomaly in the territory between the Azov and Donbas regions, where it was not previously diagnosed. This result still needs to be supported by additional data. First of all, due to the observed significant discrepancies between different variants of velocity sections along the DSS profiles.

**Keywords:** zones of recent activation, mantle gravity anomaly, kriging technique.