

Кригінг карти глибинного теплового потоку України

В.В. Гордієнко, І.В. Гордієнко, О.В. Завгородня, 2022

Інститут геофізики НАН України ім. С.І. Субботіна, Київ, Україна

Надійшла 14 грудня 2021 р.

У статті розглянуто методику обробки матеріалу, що використаний для складання карти глибинного теплового потоку (ТП) на території України. Мова йде саме про глибинний (виправлений) ТП, бо його похибка (що визначається за відмінностями значень у близьких пунктах) помітно менша, ніж спостереженого, і тільки його значення можуть бути використані для побудови (зазвичай — контролю) теплових моделей земної кори і верхньої мантії. Незважаючи на унікальну вивченість території України за даним параметром, що продовжується протягом майже 60 років, все ще зберігаються значні фрагменти території, де ТП не визначено. Це спричинено відсутністю у таких районах бурових свердловин, придатних для вимірів температури у необхідному інтервалі глибин з необхідною точністю. Звичайно, будь-який засіб обробки експериментального матеріалу на територіях, прилеглих до таких «білих плям», не може повністю замінити повноцінне дослідження ТП в їх межах. Усе ж існуючі методи геостатистики дають змогу шляхом обробки наявної мережі результатів забезпечити побудову карти всієї досліджуваної території. У нашому випадку застосовано методику кригінгу. Кригінг — це форма узагальненої лінійної регресії для формулювання оптимальної просторової оцінки в сенсі мінімальної середньоквадратичної помилки. Метод краще всього працює всередині оболонки, яка визначається за периферійними даними. У районах зі стабільною «довжиною хвилі» аномалій ТП можна без великих проблем заповнювати пробіли карти, природно, з помітним згладжуванням варіацій поля. Саме до даного типу належить більша частина оброблених фрагментів карти. Складнішою виявилась ситуація на південно-західних контактах Кіровоградської і Донбаської аномалій. Цілковито імовірно, що частина структури поля (локальних інтенсивних аномалій) не була відновлена. Тим не менш у цілому проведений контроль показав, що похибка ТП у пунктах оцінювання, як правило, не перевищує експериментальну помилку. Проведена робота надає завершеності результатам досліджень глибинного ТП на території України. Слід наголосити, що відтворений розподіл ТП у межах колишніх «білих плям» визначає запаси геотермальної енергії вдвічі більшими за сумарні запаси горючих копалин України.

Ключові слова: тепловий потік Землі, заповнення «білих плям».

Вступ. Вивчення теплового потоку Землі на території України продовжується вже протягом 60 років. Останні 20—30 років автори досліджують глибинний тепловий потік (ТП), отриманий зі спостереженого після усунення численних (переважно неглибокого походження) перешкод. Вивчені та використані у вигляді введення поправок стосовно умов України основні ефекти: буріння свердловини (у свердловинах з недо-

статнім періодом спокою, як правило, — вибір точок з мінімальними спотвореннями термограм), палеоклімат (на незначних глибинах — річних варіацій поверхневих температур), різноманітні гідрогеологічні (для великих глибин — ефектів зміщення дзеркала ґрунтових вод), структурний ефект, вплив молодих насувів, швидкої молоді седиментації. На зондові виміри на дні акваторій впливають зміни клімату на поведінку газо-

гідратів, провалів «зимових вод», що досягають дна. Тільки після виправлення величин теплових потоків вони стають придатними для геологічно значущих розрахунків температур на великих глибинах (звісно, з урахуванням нестаціонарності теплового поля Землі).

У ході досліджень були сформульовані уявлення про вимоги до карт різного масштабу. Побудовано карти окремих регіонів, України в цілому і великих територій [Бурьянов и др., 1985; Карта ..., 1987, 1991, 1993, 1999, 2007; Гордиенко и др., 2002, 2004, 2016 та ін.]. Загальна кількість поодиноких визначень ТП значна (близько 13 000). Проведене усереднення (для значень, встановлених у пунктах на відстані близько однієї хвилини географічних координат) призвело до винесення на карти значень трохи менше, ніж у половині точок. З часу останніх публікацій (2016—2018) стає очевидною неможливість в даний час та в найближчому майбутньому отримати експериментальну інформацію в кількох районах України (рис. 1).

На нижній частині малюнка бачимо крім значних за площею територій з відсутніми вимірами також порівняно невеликі ділянки, де автори вважали за можливе провести ізолінії ТП, незважаючи на погану вивченість. І в їх межах, і в межах великих «білих плям» необхідно для заповнення карти використовувати геостатистичні методи для оцінки параметра, що вивчається, за відомими експериментальними даними. Нами для цього використовувався метод кригінгу [Демьянов и др., 2010; Olea, 2018 та ін.]. В останні роки метод, який раніше застосовувався переважно з метою оцінки запасів родовищ, набуває популярності і в регіональній геофізиці [Molinari et al., 2012 та ін.].

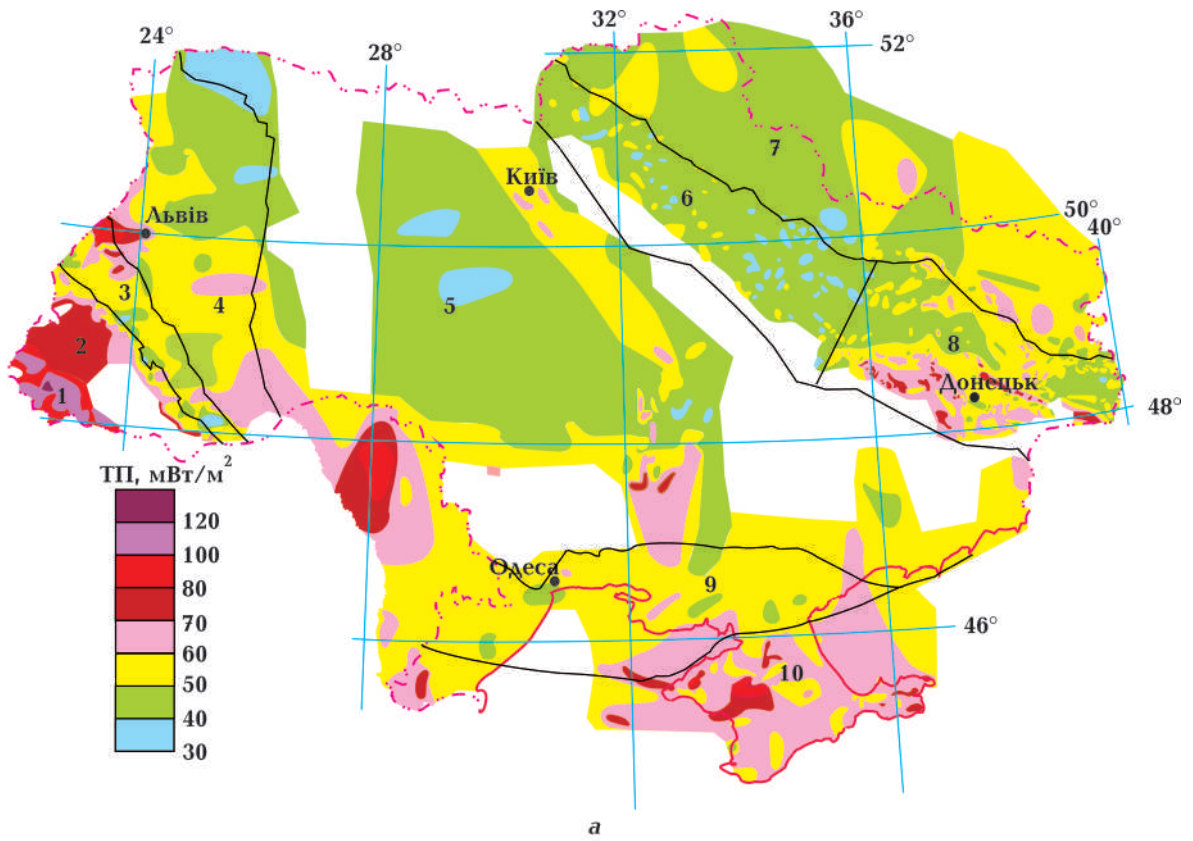
Елементи методики. Перед тим, як розглядати метод кригінга, необхідно згадати деякі характеристики використовуваного експериментального матеріалу. Насамперед, йдеться про похибку визначення теплового потоку. Найбільш надійним засобом її встановлення є порівняння результатів, отриманих усередненням у групах свердловин, розташованих на відстані до однієї хвилини географічних координат [Гордиенко и др., 2002 та ін.]. Слід лише зазначити, що це не стосується значень, що формують аномалії на таких самих невеликих майданчиках (рис. 2) або дещо більших (рис. 3).

Йдеться про хаотичні варіації величини ТП, незакономірні відхилення від стабільного фону. Гістограма на рис. 4 показує типову величину таких відмінностей, яка сягає приблизно 4 мВт/м^2 , що відповідає похибці одиночного визначення близько 3 мВт/м^2 або приблизно 5—7 % типової величини у районі відбору матеріалу.

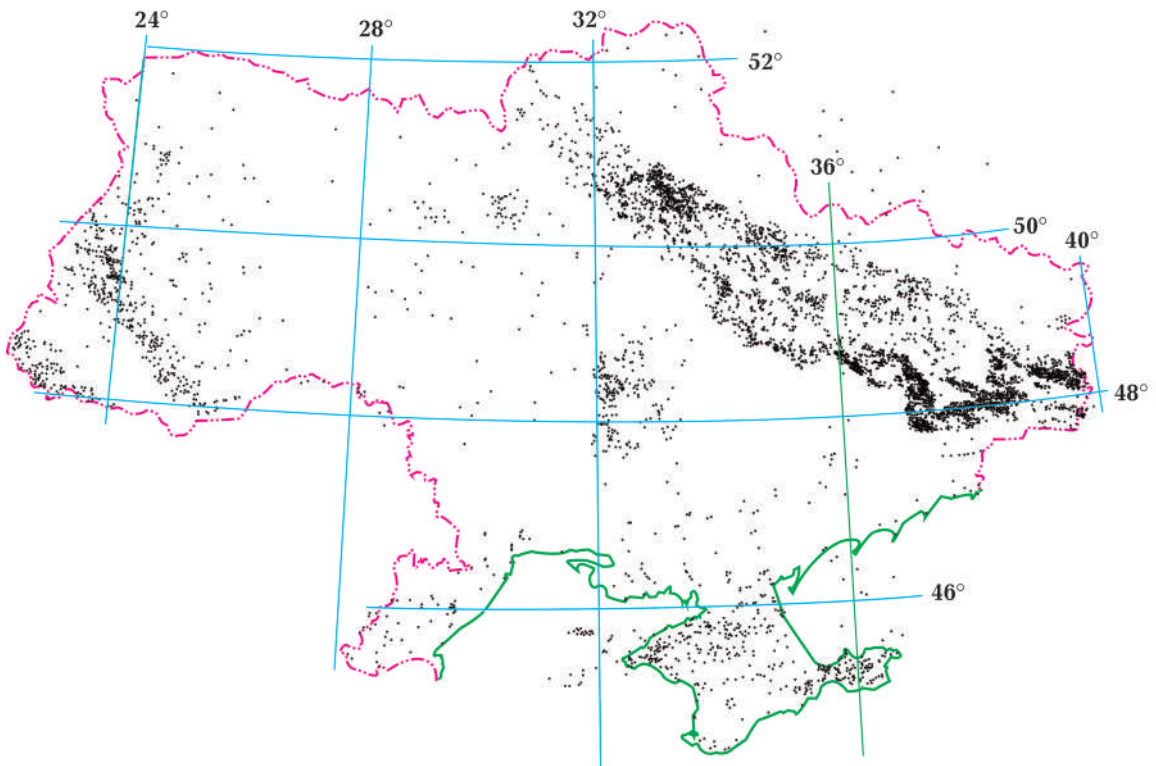
Різниця між двома описаними варіантами розподілу ТП у межах невеликих майданчиків звичайно може включати і змішані випадки, що вже бачимо на рис. 2. Поруч з яскравими локальними аномаліями розташовуються фрагменти фону, на яких перепад між сусідніми точками мінімальний. Зустрічаються і групи значень ТП, що здебільшого складаються з близьких значень з додаванням 1—2 локальних «сплесків», що різко виділяються на переважному тлі. У деяких випадках можна встановити (або припустити) попадання екстремальних ТП у зони впливу проникних розломів, якими циркулюють гарячі глибинні флюїди. Типові відмінності у значеннях теплового потоку на невеликих майданчиках поза аномаліями наведено в табл. 1.

Рис. 1. Карта глибинного теплового потоку України і Молдови (а) та схема розміщення точок його визначення (б). Цифри на карті: *tectonic regions*: 1 — Закарпатський прогин, 2 — Складчасті Карпати, 3 — Передкарпатський прогин, 4 — Волино-Подільська плита, 5 — Український щит та його схили, 6 — Дніпровсько-Донецька западина (ДДЗ), 7 — схил Воронезького кристалічного масиву, 8 — Донбас, 9 — Південноукраїнська монокліналь, 10 — Скіфська плита.

Fig. 1. Map of deep heat flow of Ukraine and Moldova (a) and a diagram of the location of TP determining points (b). Numbers on the map: *tectonic regions*: 1 — Transcarpathian trough, 2 — Folded Carpathians, 3 — Ciscarpathian trough, 4 — Volyn-Podolian plate, 5 — Ukrainian Shield and its slopes, 6 — Dnieper-Donetsk depression (DDD), 7 — slope Voronezh crystalline massif, 8 — Donbass, 9 — South Ukrainian monocline, 10 — Scythian plate.



a



б

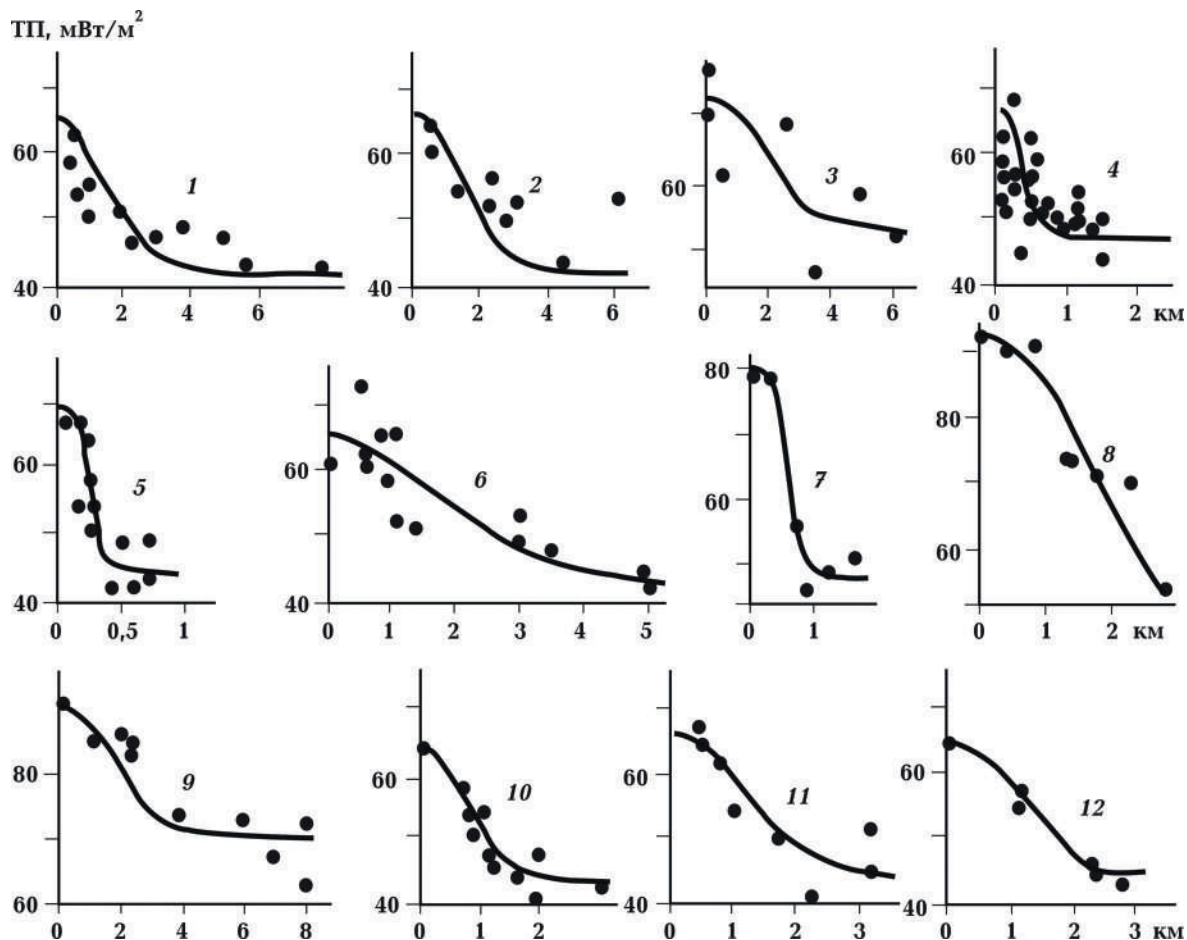


Рис. 2. Локальні аномалії теплового потоку у різних зонах сучасної активізації України: 1, 2 — Український щит, 3 — Волино-Подільська плита, 4, 5 — Донбас, 6 — Скіфська плита, 7—12 ДДЗ.
 Fig. 2. Local anomalies of heat flow in different zones of Ukraine: 1, 2 — Ukrainian Shield, 3 — Volyn-Podolian plate, 4, 5 — Donbas, 6 — Scythian plate, 7—12 — DDD.

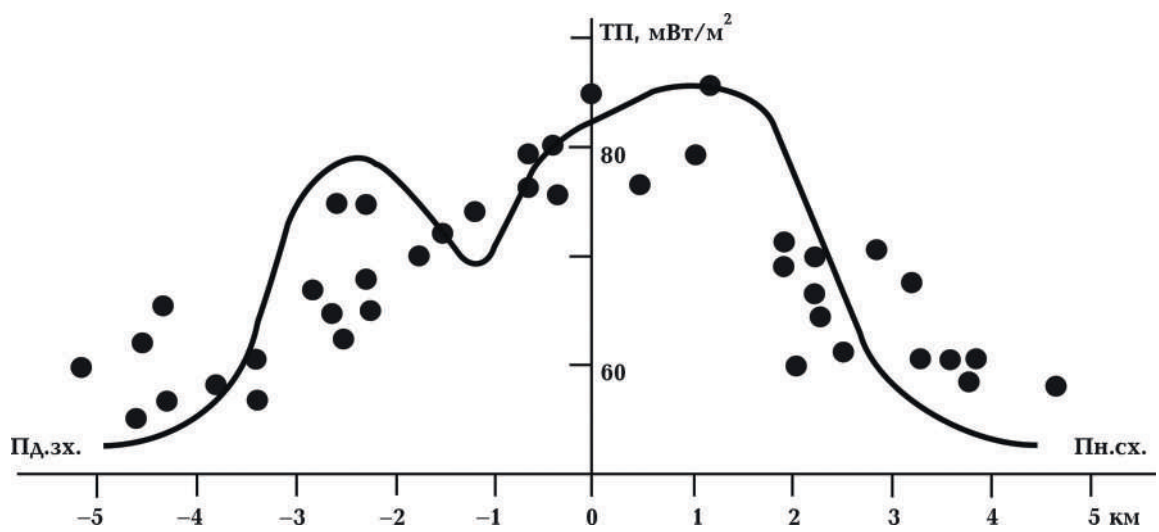


Рис. 3. Локальні аномалії Микитівського рудного поля в Донбасі. Кружки — експериментальні дані, лінії — розраховані.
 Fig. 3. Local anomalies of the Nikitovskiy ore field in Donbas. Points are experimental data, lines are calculated.

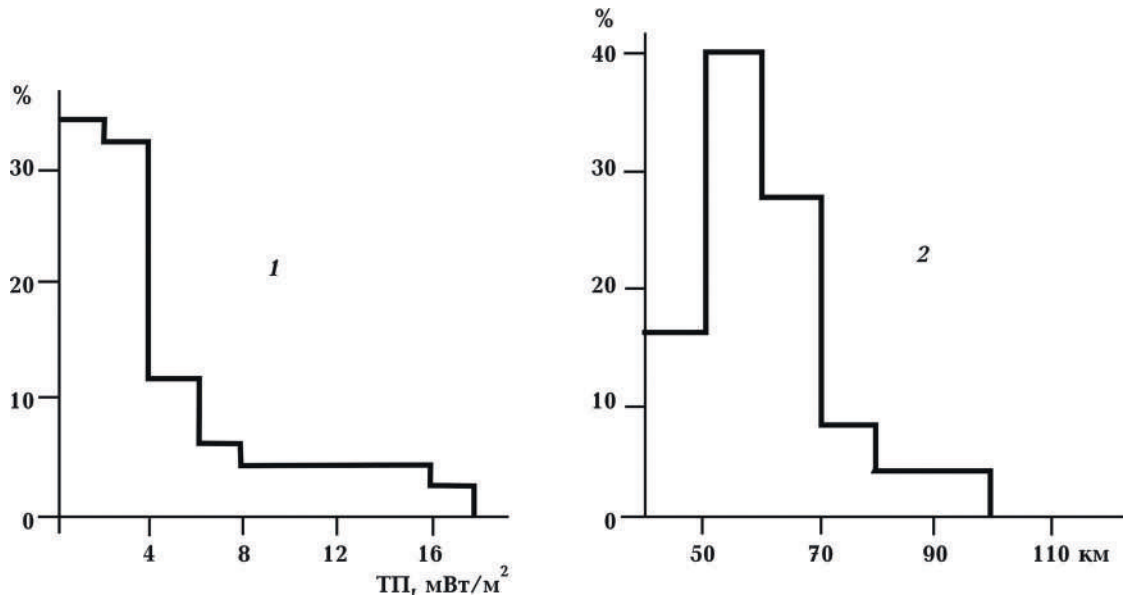


Рис. 4. Гістограми розподілів різниць теплового потоку у близьких точках (1) і лінійних розмірів типових його аномалій (2).

Fig. 4. Histograms of distributions of HF differences at close points (1) and linear sizes of typical HF anomalies (2).

Другий необхідний параметр для якісного використання кригінгу — виявлення просторово-безперервної випадкової функції з деяким географічним розподілом для використання її у вигляді зразків або вимірювань [Olea, 2018]. Практично у цій якості зручно є півдовжина хвилі регіональних варіацій (лінійний розмір великих аномалій), що спостерігаються у реальному полі теплового потоку. Найбільш поширені величини виявляються лише на рівні $60 \text{ км} \pm 10 \text{ км}$ (див. рис. 4). Така оцінка точно відповідає розмірам активних блоків тектоносфери, що переміщу-

ються і формують, зокрема, теплові збурення [Гордиенко и др., 2002 та ін.]. У такі розміри вкладається ширина приблизно двох третин прогалін, для них очікуються впевнені оцінки. В інших випадках за спостереженими розподілами ТП на протилежних краях прогалін можна передбачати поділ поля на фрагменти з різною інтенсивністю ТП (друга півдовжина хвилі), що і реалізувалося в процесі кригінгу.

На відміну від класичної лінійної регресії кригінг враховує обсяг спостережень та стохастичну залежність між даними. Метод

Т а б л и ц я 1 . Різниця між значеннями теплового потоку на невеликих майданчиках у різних регіонах України (мВт/м^2)

ДДЗ	Донбас	Крим	УЩ	ВПП
0,2,2,4,4,2,2,4,4	2,5,3,2,1,1	0,1,4,10,1,4,10,5,11,6	0,7,7,6,7,7,6,0,1,1	6,10,4
3,10,7,0,3,3	0,1,2,2,2,1,3,2,2,2	0,1,1,1,1,0	2,5,3,0,5,1,2,2	8,2,2,4,6,6,4,0
4,1,4,3,0,5,2,7,4,4,2	3,5,5,7,2,2,4,0,2,2	5,0,8,10,2,8,3,3,5,3,3,7	4,0,0,0,0,4,4,4,4	0,7,7,6,7,7,6,0
0,6,8,3,3,6,8,3,3,2,3	5,6,6,1,11,12	7,4,0,3,10,2,1,1,3,7,3	6,2,1,8,4,8,4,5,2,2,2	2,0,2,6,2,4,8,2
0,2,2,3,2,2,1,3,2,1,1,0	0,0,1,8,0,1,8,1,8,7	4,1,2,2,2,5,4,2,6,1,3,1,6	2,8,8,4,8,5,10,10,5,0	9,2,8,7,1,6

найкраще працює всередині оболонки, яка визначається за периферійними даними. Практично повсюдно для розрахунків із використанням експериментальних даних на Східноєвропейській платформі (ВЄП) та в Карпатах (на Скіфській плиті помітних «білих плям» немає) придатним виявляється звичайний кригінг, що не потребує встановлення локального середнього:

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

де λ_i — вага даного виміру (дійсне число), що включає відстань до точки прогнозу.

Умову незміщення буде виконано, якщо сума ваг, використаних під час оцінювання, дорівнює одиниці:

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

Розв'язують системи із n рівнянь. Наявний матеріал — розподіл ТП — має значні технічні переваги. Тут часто нескладно будувати в багатьох районах замкнені або майже замкнені полігони, можна уникнути екранування значень. Практично було виключено етап конструювання варіограм, якими оці-

нюється відповідність результату мінімальній середньостатистичній похибці. Найпростіше було провести масові розрахунки для всіх типових розподілів ТП за площею в пунктах, де вони були відомі, та порівняти їх із обчисленими кригінгом.

Результати обчислень. Зазначені вище попередні розрахунки були виконані для різних рівнів ТП та різних (з реально існуючих) густин експериментальної мережі (із зазначеними вище винятками для невеликих за площею фрагментів території). Результати показали дуже високу узгодженість розрахованих та експериментальних даних (рис. 5).

Результати порівнянь розрахунків на рис. 5 та інших полігонах наведено у табл. 2.

Гістограма розподілу різниць між розрахованими та експериментальними визначеннями теплового потоку в регіонах України з різними типовими значеннями цього параметра показана на рис. 6.

Гістограма відмінностей виявляється доволі симетричною, практично 2/3 результатів укладаються в діапазон ± 4 мВт/м² і не залежать від абсолютних величин порівнюваних ТП. Це значення не відрізняється від похибки ТП, тобто проведення кригінгу не додає помилок порівняно із звичайним експериментальним дослідженням теплового потоку в умовах України.

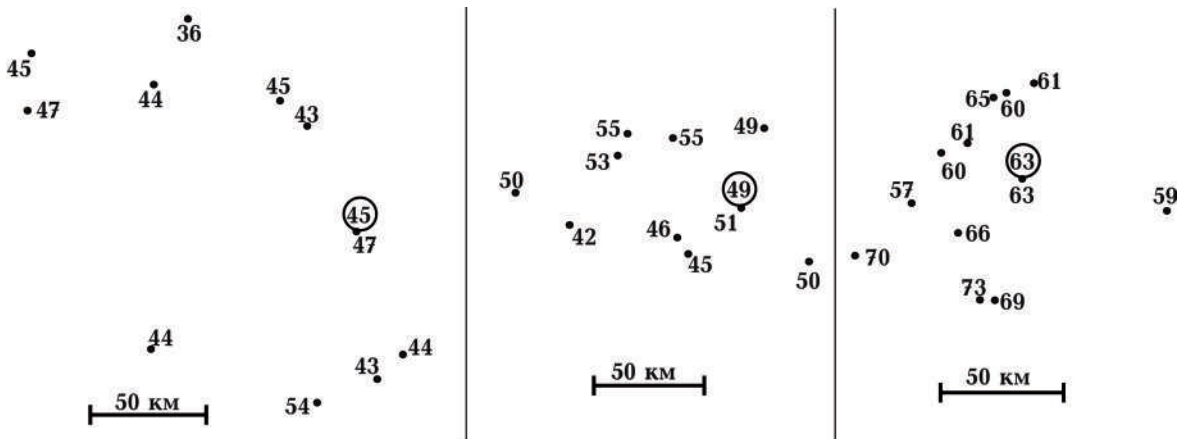


Рис. 5. Результати оцінювання значень теплового потоку за даними у навколишніх пунктах. У кружечку — розраховане значення.

Fig. 5. The results of the assessment of HF values according to the data in the surrounding points. The circle shows the calculated value.

Т а б л и ц я 2. Порівняння експериментальних значень теплового потоку ($\text{мВт}/\text{м}^2$) ($\text{ТП}_{\text{екс}}$) і встановлених кригінгом ($\text{ТП}_{\text{кр}}$)

$\text{ТП}_{\text{екс}}$	$\text{ТП}_{\text{кр}}$	$\Delta\text{ТП}$	$\text{ТП}_{\text{екс}}$	$\text{ТП}_{\text{кр}}$	$\Delta\text{ТП}$	$\text{ТП}_{\text{екс}}$	$\text{ТП}_{\text{кр}}$	$\Delta\text{ТП}$	$\text{ТП}_{\text{кр}}$	$\text{ТП}_{\text{екс}}$	$\Delta\text{ТП}$
47	52	5	45	48	3	48	44	-4	47	45	-2
37	39	2	53	46	-7	52	52	0	51	49	-2
50	53	3	44	42	-2	45	46	1	52	54	2
53	54	1	48	42	-6	56	52	-4	38	40	2
47	45	-2	51	49	-2	40	41	1	63	63	0

Процедура кригінгу. Описані обчислення було проведено для усіх «білих плям» (див. рис. 1). Розглянемо результати у напрямку із заходу (від Закарпаття) на схід (до Донбасу).

1. Ситуація для кригінгу у південній частині Українських Карпат є доволі сприятливою. Очевидна видовженість аномалій ТП вздовж структури, оцінки в розрахункових точках встановлюються за інформацією, що їх оточує з 3—4 сторін. Тільки на українсько-румунському державному кордоні пункти, що використовуються на румунській території, рідкісні і порівняно віддалені. Однак значення ТП загалом узгоджуються з відомими в межах України (хоча в одному ра-

йоні ТП знижено, але не біля державного кордону). Тому аномалію ТП було продовжено до краю української території. Деякі сумніви можуть бути пов'язані з якістю матеріалу, для отримання якого було використано дані із сусідніх країн Європи щодо спостережуваного ТП [Гордиенко и др., 2006]. Перерахунок до глибинного ТП враховував лише середнє виправлення за палеоклімат.

Відгалуження досліджуваної «білої плями» розташовано на самому півдні Волино-Подільської плити. Північніше та південніше встановлені на територіях України, Румунії та Молдови [Гордиенко и др., 1996] значення ТП практично збігаються (з максимальними відмінностями в кілька $\text{мВт}/\text{м}^2$). Ними і було заповнено прогалину.

2. Оцінки ТП у двох великих пробілах — субмеридіональному між кордонами Білорусі та Молдови та широтному вздовж кордону з Білоруссю — також виявилися добре мотивованими. Крім українського матеріалу, було використано молдавський (отриманий авторами) та білоруський [Зуй и др., 2006]. Проведено облік частини перешкод. Результати кригінгу виявляють витриманий ТП на рівні приблизно $45 \text{ мВт}/\text{м}^2$ у великій частині субмеридіональної смуги. Виділено невідому (слабовиражену за експериментальними даними) негативну аномалію. У широтній смузі вдалося простягнути Дніпровську (що проходить через Київ) позитивну аномалію до державного кордону з Білоруссю, за яким це збурення поля продовжується.

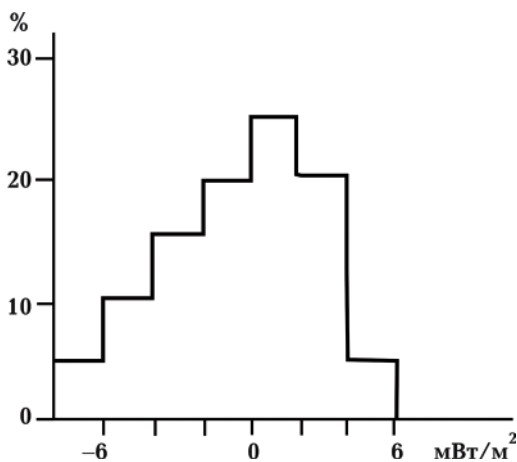


Рис. 6. Гістограма відмінностей між розрахунковими та експериментальними ТП.
Fig. 6. Histogram of differences between calculated and experimental HF.

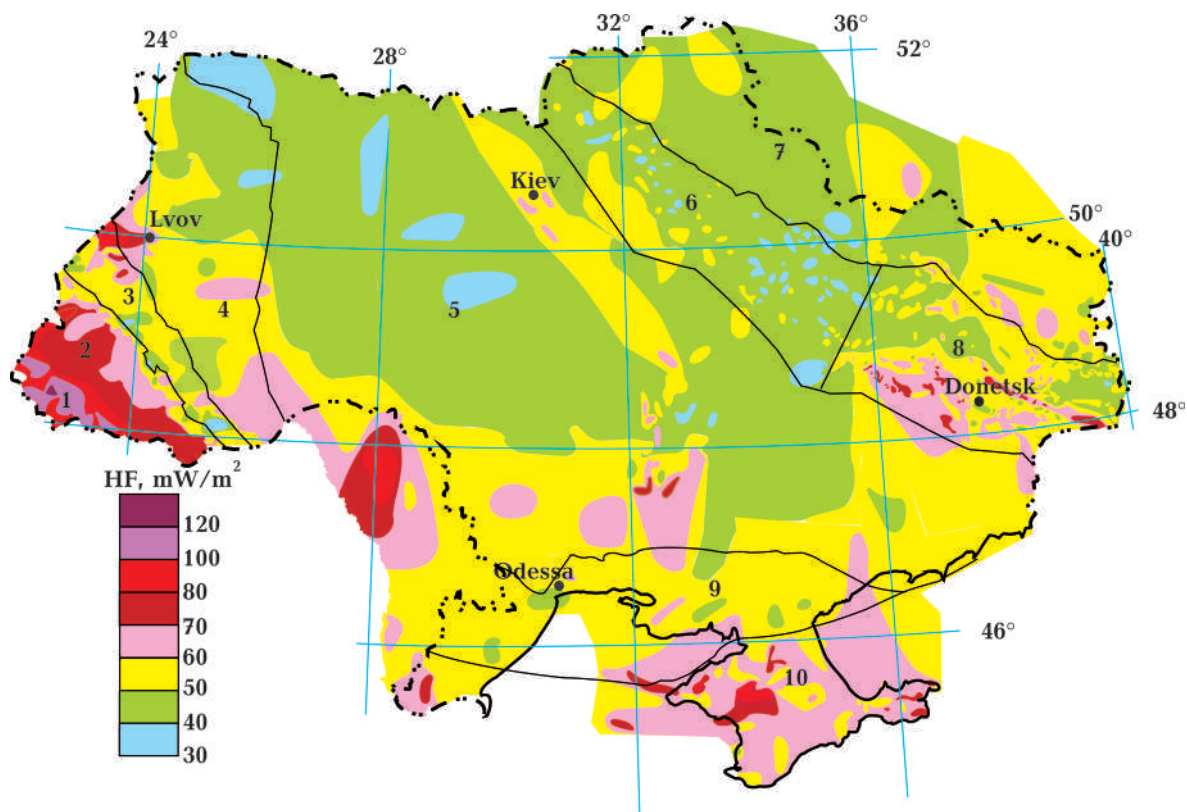


Рис. 7. Карта глибинного теплового потоку України і Молдови із заповненими пробілами.

Fig. 7. Map of deep heat flow on Ukraine and Moldova with filled gaps.

3. Прогалину на північ від Одеси заповнити виявилось складніше. Більшість її площі ймовірно належить до зони поширення ТП лише на рівні трохи більше 50 мВт/м^2 , що підтвердилось проведеними обчисленнями. Втім для території ще залишилися розрахункові значення (досить віддалені від опорних пунктів), що регулярно опинялися на межі 60 мВт/м^2 . Відповідно виділені на рис. 7 плями поширення значень ТП понад 60 мВт/м^2 можуть мати іншу форму та площу. Проте саме їх існування швидше за все реальне.

4. «Біла пляма», витягнута вздовж південно-західної межі ДДЗ і Українського щита, була заповнена без особливих проблем. З боку Дніпровсько-Донецької западини пляма обрамлялася територією з щільною мережею спостережень, які впевнено виділяли невеликі за площею аномалії зі значеннями ТП нижче 40 мВт/м^2 і понад 50 мВт/м^2 на фоні близько 45 мВт/м^2 . З боку Українського щита та його схилу мережа спостере-

жень значно рідша, але й тут виділялися ті ж самі варіації ТП. У деяких частинах плями формувалися райони, оточені відомими значеннями з трьох боків. Унаслідок цього вдалося доволі впевнено описати досить значну за площею позитивну аномалію ТП (див. рис. 7). Сумніви можуть викликати лише відповіді на запитання: чи приєднується це збурення до регіональної Дніпровської аномалії теплового потоку?

5. Заповнення значного за площею пробілу на схилі Українського щита, його Приазовського мегаблока, що простягається аж до перехідної зони між ДДЗ та Донбасом та обмеженого меридіаном 36° сх. д., було пов'язано із особливими труднощами. З цього випливає, що отримано результат невисокої достовірності. На східній та західній периферіях прогалини отримано значення ТП, що знаходяться по різні боки від ізолінії 50 мВт/м^2 , проведення її досягається легко за умови відсутності всередині великого фрагмента

території вказівок на зміну градієнта ТП. Такі особливості (за наявними даними) виділити не можна. В усьому пробілі вдалося діагностувати лише невелику негативну аномалію у його північно-східному кутку.

6. Найсхідніша прогаліна на карті глибинного теплового потоку України має ширину, що різко змінюється. На сході, де вона незначна та інформації на краях доволі багато, можна впевнено описати розрахункову форму інтенсивної позитивної аномалії Нагольного кряжа. Можна припустити за даними рідкої мережі, побудованої авторами на прилеглий території Ростовського виступу РФ [Карта ..., 1987 та ін.], що аномалія продовжується до державного кордону України та південніше швидко скорочується до фону. У широкій частині пробілу розрахунки показують наявність переходу від помірно підвищених ТП (50 мВт/м^2) до аномальних на рівні $60\text{—}70 \text{ мВт/м}^2$ і більше. Зрозуміло, що можливості кригінгу у розширенні цієї активної зони обмежені. Максимальні позитивні аномалії всередині пробілу діагностувати не вдасться. Проте зона ТП 60 мВт/м^2 досить впевнено виділяється поблизу межі Донбасу.

Загалом Карта глибинного теплового потоку території України внаслідок застосування кригінгу набуває вигляду, показано на рис. 7.

Висновок. Виконана робота з усунення прогалін на Карті глибинного теплового потоку України за допомогою кригінгу досягла поставленої мети. Винятком є лише дрібні фрагменти території на півночі країни. Незважаючи на вивчення ТП на територіях Польщі та Воронежського кристалічного масиву (Росія) за участю авторів, у відповідних районах не вдалося відшукати належ-

них примежових даних. Якість досягнутого результату можна вважати високою, якщо говорити про оцінювання похибки обчислених значень ТП. Очікуваним виявився і негативний ефект кригінгу — згладжування розрахункового поля. Способи побудови більш диференційованих варіантів пов'язані з переходом від простого та звичайного кригінгу до складніших схем, що включають попередню обробку матеріалу. У нашому випадку для двох південних прогалін постановка такого завдання не має сенсу. Уявити попередню схему поведінки поля можна, але насторожує відсутність надійного засобу контролю похибки результату. Крім того, запровадження додаткових варіацій поля скорочує «довжину хвилі», в рамках якої працює звичайний кригінг, тобто для великих «білих плям» у південній частині карти заповнення їхньої території стає проблематичним. Краще залишити на карті згладжений варіант зміни ТП до того часу, коли стане можливим (за рахунок додаткових експериментальних даних) здійснити подібний контроль.

Отримані результати дають змогу зробити цікавий додаток до оцінювання геотермальних ресурсів України. У межах «білих плям» розрахунки їх щільності не проводили [Гордиенко и др., 2016 та ін.]. При обчисленні щільності геотермічних ресурсів (W) за глибинним тепловим потоком (з урахуванням середнього для регіону значення теплопровідності до глибини 6 км) було використано лише відомості про площу поширення аномалій більш як 60 мВт/м^2 . Території з меншими значеннями ТП не дадуть істотного збільшення сумарної оцінки. Вона становить $8 \cdot 10^{10}$ т умовного палива. Ця величина вдвічі більша за відомі запаси всіх горючих корисних копалин України.

Список літератури

Бурьянов В.Б., Гордиенко В.В., Завгородняя О.В., Кулик С.Н., Логвинов И.М. Геофизическая модель тектоносферы Украины. Киев: Наук. Думка, 1985. 212 с.

Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Гордиенко Л.Я., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тара-

сов В.Н. Зоны современной активизации территории Украины. *Геофиз. журн.* 2020. № 2. С. 29—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i2.2020.201740>.

Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. Глубинный тепловой поток Украины и Мол-

- довы. Докл. НАН України. 1996. № 12. С. 119—123.
- Гордиенко В., Гордиенко И., Завгородняя О. Тепловое поле и геознергетические ресурсы Украины. Saarbrücken: LAP, 2016. 108 с.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Усенко О.В. Геотермический атлас Украины. Киев: Корвін пресс, 2004. 60 с.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Усенко О.В. Тепловое поле территории Украины. Киев: Знання, 2002. 168 с.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Усенко О.В. Тепловое поле Центральной и Восточной Европы. В кн.: Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Москва: ГЕОС, 2006. С. 624—659.
- Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. Москва: Наука, 2010. 27 с.
- Зуй В.И., Жук М.С. Тепловое поле геологических структур Беларуси. *Літасфера*. 2006. № 2(25) С. 111—127.
- Карта глубинного теплового потока территории Украины. 1 : 2 500 000. Сост. В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя, О.В. Усенко. Киев, 1999.
- Карта теплового потока территории Европейской части СССР (и объяснительная записка к карте). 1 : 5 000 000. Ред. В.В. Гордиенко, А.А. Смыслов, У.И. Моисеенко. Киев: Изд. Мингео УССР ЦТЭ, 1987.
- Карта теплового потока территории СССР (и объяснительная записка к карте). 1 : 5 000 000. Ред. В.В. Гордиенко, У.И. Моисеенко. Киев: Изд. ГКП ЦТЭ, 1991.
- Карта теплового потока территории Украины и Молдовы (и объяснительная записка к карте). 1 : 2 500 000. Сост. В.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя. Киев: Геос, 1993.
- Карта глубинного теплового потока. Національний атлас України. Київ: Картографія, 2007.
- Molinari, I., Raileanu, V., & Morelli, A. (2012). A Crustal Model for the Eastern Alps Region and a New Moho Map in Southeastern Europe. *Pure and Applied Geophysics*, 169, 1575—1588.
- Olea, R. (2018). *A practical primer on geostatistics*. U.S. Geological Survey. Open-File Report 2009-1103, Version 1.4, 348 p.

Kriging of Ukraine's deep heat flow map

V.V. Gordienko, I.V. Gordienko, O.V. Zavgorodnaya. 2022

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article discusses the method of processing the material used to compile a deep heat flow (HF) map on the territory of Ukraine. We are talking specifically about the deep (corrected) HF, since its error (determined by the differences in values at close points) is noticeably less than the observed one and only its values can be used to construct (as a rule, to control) thermal models of the Earth's crust and upper mantle. Despite the unique study of Ukraine on this parameter, which has been going on for almost 60 years, there are still significant fragments of the territory where the HF has not been determined. This is due to the lack of boreholes in such areas suitable for temperature measurements in the required depth interval with the required accuracy. Of course, any method of processing experimental material in areas adjacent to such «white spots» cannot completely replace a full-fledged study of HF within their boundaries. Nevertheless, the available geostatistical methods allow, by processing the existing grid of results, to ensure the construction of a map of the entire study area. In our case, we used the kriging technique. Kriging is a form of generalized linear regression to formulate an optimal spatial estimate in terms of minimum mean square error. The method works best within the shell defined by periphe-

ral data. Within areas with a stable «wavelength» of HF anomalies, it is possible to fill in the gaps in the map without any problems. Naturally, with a noticeable smoothing of the field variations. Most of the processed map fragments belonged to this type. A more complicated situation was encountered at the southwestern contacts of the Kirovograd and Donbas anomalies. It is likely that part of the field structure (local intense anomalies) was not reproduced. Nevertheless, in general, the control carried out showed that the HF error in the assessment points, as a rule, does not exceed the experimental errors. The work done gives completeness to the results of research of the deep heat flow on the territory of Ukraine. It should also be noted that the identified distribution of HF within the former «white spots» reveals reserves of geothermal energy twice as much as the total reserves of combustible minerals in Ukraine.

Key words: heat flow of the Earth, filling of «white spots».

References

- Bur'yanov, V.B., Gordienko, V.V., Zavgorodnyaya, O.V., Kulik, S.N., & Logvinov, I.M. (1985). Geophysical model of the tectonosphere of Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 212 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Gordienko, L.Ya., Zavgorodnyaya, O.V., Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2020). Zones of recent activation of Ukraine. *Geophysical Journal*, 42(2), 29—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i2.2020.201740> (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., & Zavgorodnyaya, O.V. (1996). Deep heat flow of Ukraine and Moldova. *Doklady NAN Ukrainy*, (12), 119—123 (in Russian).
- Gordienko, V., Gordienko, I., & Zavgorodnyaya, O. (2016). *Thermal field and geoennergetic resources of Ukraine*. Saarbrücken: LAP, 108 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., Logvinov, I.M., Tarasov, V.N., & Usenko, O.V. (2004). *Geothermal Atlas of Ukraine*. Kiev: Korvin press, 60 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., & Usenko, O.V. (2002). *Thermal field of the territory of Ukraine*. Kiev: Znannya, 168 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Usenko, O.V. (2006). Heat field of Central and Eastern Europe. In *The structure and dynamics of the lithosphere of Eastern Europe* (pp. 624—659). Moscow: GEOS (in Russian).
- Demyanov, V.V., & Savelyeva, E.A. (2010). *Geostatistics: theory and practice*. Moscow: Nauka, 327 p. (in Russian).
- Zuy, V.I., & Zhuk, M.S. (2006). Thermal field of geological structures of Belarus. *Litasfera*, (2), 111—127 (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., & Usenko, O.V. (Eds.). (1999). *Deep heat flow map of the territory of Ukraine. 1 : 2,500,000*. Kiev (in Russian).
- Gordienko, V.V., Smyslov, A.A., & Moiseenko, U.I. (Eds.). (1987). *Heat flow map of the European part territory of the USSR (and Explanatory note to the map). 1 : 5,000,000*. Kiev: Mingeo Ukrainian SSR (in Russian).
- Gordienko, V.V., & Moiseenko, U.I. (Eds.). (1991). *Heat flow map of the USSR territory (and Explanatory note to the map). 1 : 5,000,000*. Kiev (in Russian).
- Gordienko, V.V., & Zavgorodnyaya, O.V. (Eds.). (1993). *Heat flow map of the territory of Ukraine and Moldova (and Explanatory note to the map). 1 : 2,500,000*. Kiev: Geos (in Russian).
- Deep heat flow map. (2007). In *National Atlas of Ukraine*. Kiev: Kartografiya (in Ukrainian).
- Molinari, I., Raileanu, V., & Morelli, A. (2012). A Crustal Model for the Eastern Alps Region and a New Moho Map in Southeastern Europe. *Pure and Applied Geophysics*, 169, 1575—1588.
- Olea, R. (2018). *A practical primer on geostatistics*. U.S. Geological Survey. Open-File Report 2009-1103, Version 1.4, 348 p.