

<https://doi.org/10.15407/gpimo2022.04.041>

В.В. Гордієнко, докт. геол.-мін. наук, проф., зав. відділом

e-mail: gordienkovadim39@gmail.com

Scopus author Id = 7102473958

ORCID 0000-0001-9430-7801

І.В. Гордієнко, канд. геол. наук, пров. наук. співр.

e-mail: tectonos@igph.kiev.ua

ORCID 0000-0002-5619-0486

Scopus authorID=5719836183

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

03680, м. Київ, просп. Паладіна, 32

КАРТИ ГЛИБИННОГО ТЕПЛОГО ПОТОКУ ТА ГЕОТЕРМАЛЬНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ

Розглянуто методику обробки матеріалу, що використаний для складання карти глибинного теплового потоку (ТП) на території України та побудови на її основі карти геотермальних ресурсів. Мова йде саме про глибинний (виправлений) ТП, бо його похибка, що визначається за відмінностями значень у близьких пунктах, помітно менше, ніж спостереженого і тільки його значення можуть бути використані для побудови теплових моделей земної кори і верхньої мантії та вирішення вказаної прикладної задачі. Незважаючи на унікальну вивченість 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 замінити повноцінне дослідження ТП в їх межах. Все ж існуючі методи геостатистики дозволяють шляхом обробки наявної мережі результатів забезпечити побудову карти всієї досліджуваної території. У нашому випадку застосована методика кригінгу. Метод краще всього працює всередині оболонки, яка визначається за периферійними даними. У районах зі стабільною «довжистою хвилею» аномалій ТП можна без великих проблем заповнювати пробіли карти. Природно, з помітним згладжуванням варіацій поля. Саме до даного типу відносилася більша частина оброблених фрагментів карти. Розглядається також нова редакція опису розподілу геоенергетичних ресурсів України. Використовували карту глибинного теплового потоку, оброблену методом кригінгу, та зведення карт по регіонах із розрахунком теплопровідності на глибинах до 6 км на їх контактах. Це дало змогу заповнити прогалини в мережі експериментальних даних та уточнити положення та інтенсивність аномалій параметрів у південній частині Карпат, північно-східному схилі Українського щита, на Донбасі та покращити загальну оцінку геоенергетичних ресурсів (до 1,1 трлн тон умовного палива). Геотермальна енергія з максимально глибокого інтервалу видобутку (5,5–6,0 км) приблизно у 26 разів більше запасів всіх горючих копалин України.

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

Цитування: Гордієнко В.В., Гордієнко І.В. Карти глибинного теплового потоку та геотермальних ресурсів України *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2022. **18**, № 4: 41–52. <https://doi.org/10.15407/gpimo2022.04.041>

Вступ

Вивчення теплового потоку Землі на території України продовжується майже 60 років, в останні 20—30 років автори досліджують глибинний тепловий потік (ТП), отриманий зі спостереженого після усунення численних перешкод. Вивчені та використані у вигляді введення поправок стосовно умов України основні ефекти: буріння свердловин, різноманітні гідрогеологічні впливи, глибинні структури, вплив молодих насувів, швидкої молодої седиментації тощо. Тільки після виправлення величин теплових потоків вони стають придатними для геологічно значущих розрахунків температур на великих глибинах в земній корі та верхній мантії (звісно, з урахуванням нестационарності теплового поля Землі) та обчислень наявних теплових ресурсів.

У ході досліджень були сформульовані уявлення про вимоги до карт різного масштабу, побудовано карти окремих регіонів, України в цілому і великих територій за її межами [1—7, 11—15 та ін.]. Загальна кількість поодиноких визначень теплового потоку велика (близько 13000). Проведене усереднення (у пунктах на відстані близько однієї хвилини географічних координат) призвело до винесення на карти значень трохи менше, ніж у половині пунктів. З часу останніх публікацій (2016—2018 рр.) стає очевидною практична неможливість в найближчому майбутньому отримати експериментальну інформацію (розподіл температури з глибиною та теплопровідність порід) в кількох районах України (рис. 1).

На рис. 1, б видно 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 параметру, що вивчається, за відомими експериментальними даними. Нами для цього застосовувався метод кригінгу [18 та ін.]. В останні роки цей метод, який раніше використовувався переважно з метою оцінки запасів родовищ корисних копалин, набуває популярності і в регіональній геофізиці [17 та ін.].

Елементи методики

Насамперед, необхідно визначити реальну похибку теплового потоку. У нашому випадку (регіональних досліджень для карт масштабу 1 : 2 500 000) найбільш надійним засобом її встановлення є порівняння результатів, отриманих усередненням у групах свердловин, розташованих на відстані до однієї хвилини географічних координат [2 та ін.]. Слід лише зазначити, що це не стосується значень, що формують аномалії на таких самих невеликих майданчиках або дещо більших. Локальні збурення у даному випадку не вивчаються. Йдеться про хаотичні варіації величини ТП, незакономірні відхилення від стабільного фону, які сягають приблизно 4 мВт/м². Це відповідає похибці одиночного визначення близько 3 мВт/м² або приблизно 5—7 % типової величини у районі відбору матеріалу. На такі помилки і треба орієнтуватися, оцінюючи результати кригінгу.

Другий необхідний параметр — виявлення просторово-безперервної випадкової функції з деяким географічним розподілом для використання її у вигляді зразків або вимірювань [18]. Практично у цій якості зручна півдовжина хвилі регіональних варіацій (лінійний розмір великих аномалій), що спостерігаються

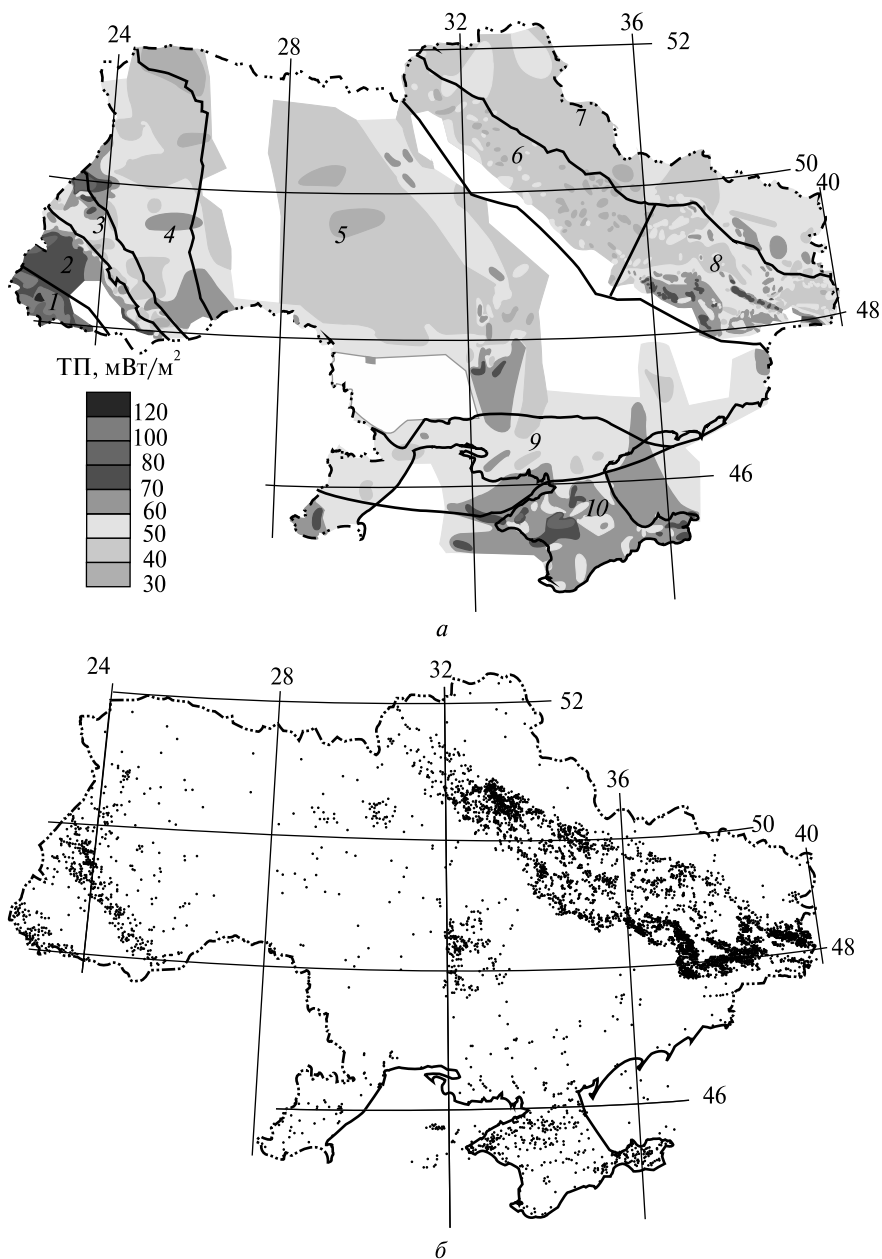


Рис. 1. Карта глибинного теплового потоку України (а) та схема розташування пунктів визначення ТП (б). Тектонічні регіони: 1 – Закарпатський прогин, 2 – Складчасті Карпати, 3 – Передкарпатський прогин, 4 – Волино-Подільська плита, 5 – Український щит та його схили, 6 – Дніпровсько-Донецька западина (ДДЗ), 7 – схил Воронезького кристалічного масиву, 8 – Донбас, 9 – Південно-Українська монокліналь, 10 – Скіфська плита

у реальному полі теплового потоку. Найбільш поширені величини виявляються лише на рівні 60 ± 10 км. Така оцінка точно відповідає розмірам активних блоків тектоносфери, що переміщуються, формуючи, зокрема, і теплові збурення [2 та ін.]. У такі розміри вкладається ширина приблизно двох третин прогалін, для яких очікуються впевнені оцінки результатів кригінгу. В інших випадках спосте-

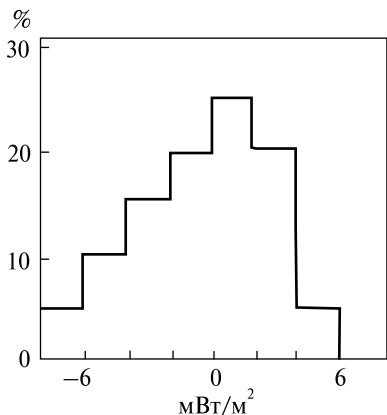


Рис. 2. Гістограма відмінностей між розрахованими та експериментальними ТП

режені розподіли ТП на протилежних краях прогалин дозволяють передбачати можливість поділу поля на фрагменти з різною інтенсивністю ТП (друга напівдовжина хвилі), що і реалізувалося в процесі кригінгу. Тут вже виникають певні проблеми пошуків межі, якщо вона досить помітна у середніх значеннях ТП по краях пробілу.

На відміну від класичної лінійної регресії, кригінг враховує обсяг спостережень та стохастичну залежність між даними. Практично завжди для розрахунків із використанням експериментальних даних на Східно-Європейській платформі (ВЄП) та в Карпатах (на Скіфській плиті помітних «білих плям» немає) придатним виявляється звичайний кригінг, деякі подробиці його застосування наведені у [8].

Гістограма розподілу різниць між розрахунковими та експериментальними визначеннями теплового потоку в регіонах України з різними типовими величинами цього параметру представлена на рис. 2.

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 зі звичайним експериментальним дослідженням теплового потоку в умовах України.

Процедура кригінгу

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

1. Очевидна сприятливість для кригінгу аномалій ТП у Карпатах та Закарпатті, оскільки розрахункові точки інформація оточує з 3—4 сторін. Тільки на румунській території пункти ТП рідкісні і порівняно далекі, однак загалом узгоджуються з відомими в межах України. Тому аномалію протягнуто до краю української території. Відгалуження «білої плями», що розглядається, розташоване на самому півдні Волино-Подільської плити. Північніше та південніше встановлені на територіях України, Румунії та Молдови [5] значення ТП, що практично збігаються (з максимальними відмінностями в кілька мВт/м²). Ними і було заповнено прогалину.

2. Оцінки величин ТП у двох великих пробілах — субмеридіональному між кордонами Білорусі та Молдови та широтному вздовж кордону з Білоруссю — також виявилися добре мотивованими. Крім українського матеріалу тут використовувалися молдовський (отриманий авторами) та білоруський [10], одержано витриманий ТП на рівні приблизно 45 мВт/м² у великій частині субмеридіональної смуги. Виділено невідому негативну аномалію. У широтній смузі вдалося протягти Дніпровську позитивну аномалію до білоруського кордону, за яким це збурення поля продовжується.

3. Прогалину на північ від Одеси заповнити виявилось складніше. Більшість її площі очевидно належить до зони поширення ТП лише на рівні трохи більше

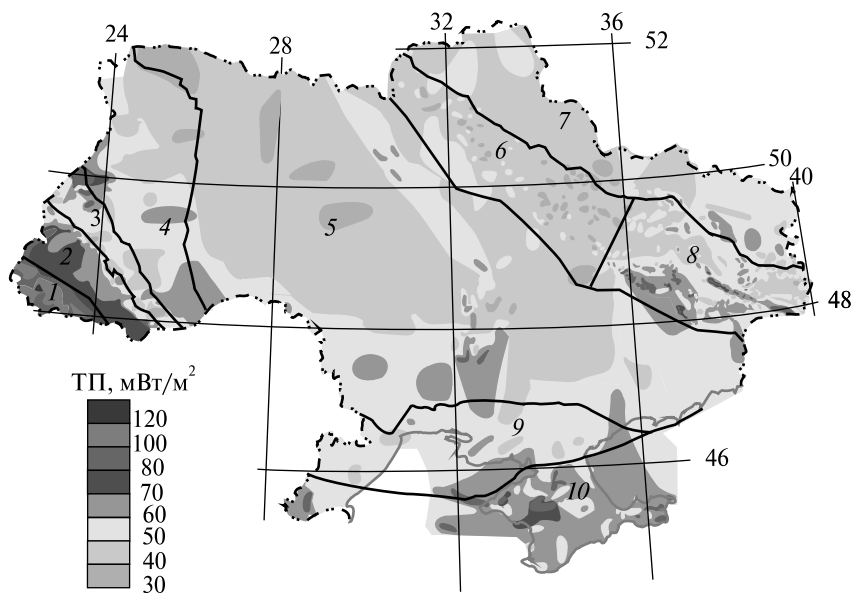


Рис. 3. Карта глибинного теплового потоку України з заповненими пробілами

50 мВт/м², що підтвердилося проведеними обчисленнями. Але на території ще залишилися розрахункові значення (досить віддалені від опорних пунктів), що регулярно опинялися на межі 60 мВт/м². Відповідно, плями поширення значень ТП понад 60 мВт/м², що позначені на рис. 3 можуть мати іншу форму та площу. Але саме їхнє існування, швидше за все, реальне.

4. «Біла пляма», витягнута між Дніпровсько-Донецькою западиною (ДДЗ) та Українським щитом (УЩ), була заповнена без особливих проблем. З боку ДДЗ була щільна мережа ТП з невеликими за площею аномаліями нижче 40 мВт/м² і понад 50 мВт/м² на тлі близько 45 мВт/м². З боку УЩ мережа спостережень значно рідша, але з тих самих ТП. Вдалося досить впевнено описати значну за площею позитивну аномалію (див. рис. 3). Сумніви можуть викликати лише відповідь на запитання: чи приєднується це збурення до регіональної Дніпровської аномалії теплового потоку?

5. Заповнення пробілу на схилі УЩ аж до перехідної зони між ДДЗ та Донбасом, та обмеженого меридіаном 36° с. д. було із особливими труднощами, тут результат невисокої достовірності. На периферіях прогалени ТП поширені по різні боки ізолінії 50 мВт/м², проведення її досягається легко за умови відсутності вказівок на зміну градієнта ТП. Такі особливості виділити не можна. У всьому пробілі вдалося діагностувати лише невелику негативну аномалію.

6. Найсхідніша прогалина на карті має різко змінну ширину. На сході можна впевнено описати розрахункову форму інтенсивної позитивної аномалії Нагольного кряжа. Можна припустити за даними рідкої мережі, побудованої авторами на прилеглий території Ростовського виступу РФ [12 та ін.], що аномалія продовжується до кордону України та південніше швидко скорочується до фону. У широкій частині пробілу розрахунки показують наявність переходу від помірно підвищених ТП (50 мВт/м²) до аномальних на рівні 60–70 і більше мВт/м². Зрозуміло, що можливості кригінгу у розширенні цієї активної зони обмежені. Загалом Карта глибинного теплового потоку території України внаслідок

док застосування кригінгу набуває вигляду, показаного на рис. 3. Максимальні позитивні аномалії всередині пробілу діагностувати не вдається. Але зона ТП 60 мВт/м² досить впевнено виділяється поблизу кордону Донбасу.

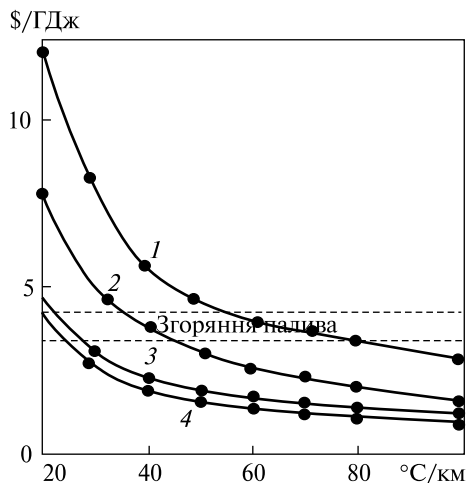
Виконана робота з усунення прогалин на Карті глибинного теплового потоку України за допомогою кригінгу досягла поставленої мети. Виняток становлять лише дрібні фрагменти території на півночі країни. Незважаючи на вивчення ТП на територіях Польщі та Воронезького масиву Росії за участю авторів, у відповідних районах не вдалося відшукати належних прикордонних даних. Якість досягнутого результату можна вважати високою, якщо говорити про оцінку 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 прогалин постановка такого завдання не має сенсу, уявити собі попередню схему поведінки поля можна, але насторожує відсутність надійного способу контролю похибки результату.

Розрахунок щільності геоенергетичних ресурсів

Як вже відзначено вище, у цій роботі йдеться про дослідження регіонального характеру, спрямовані саме на оцінку густини ресурсів (W). Хоча перехід до визначення запасів родовищ вже може бути зроблений в даний час при появі конкретних завдань у низці регіонів України.

За ступенем обґрунтованості ресурси прийнято поділяти на перспективні (C_3) та прогнозні (P_1 та P_2). Оцінюючи ресурси категорії P_2 , розглядається лише можливість наявності у регіоні умов формування родовищ геотермальної енергії. Відомості про розподіл температур у надрах виходять з урахування геолого-геофізичних даних (лише частково — геотермічних), при розрахунках вводиться гранично досяжна глибина буріння (10 км). Передбачається, що масив порід можна охолодити до поверхні. Очевидно, що таким чином можна здійснити лише оцінку по максимуму, мало придатну для виділення конкретних районів, потенційно придатних для видобутку тепла Землі. Оцінюючи ресурси категорії P_1 , вивчають регіони, для яких у принципі зрозуміла можливість видобутку енергії. Обчислення ведуться для реальних зараз глибин буріння (до 6 км) та враховуються вимоги різних споживачів енергії до температури входу теплоносія до теплообмінника та його скидання. Перспективні ресурси C_3 враховують ще й економічну доцільність використання земного тепла, що виявляється в обмеженні їх щільностями, при яких енергія, що отримується, може конкурувати з такою, що постачається традиційними джерелами. Звичайно, враховується необхідність буріння крім добувних, ще і нагнітальних свердловин. Видобута гаряча вода після водообмінника спрямовується назад у експлуатований шар. Кордон між ресурсами категорій P_1 та C_3 зміщується зі зміною технологій та вартості енергії з традиційних джерел. Тому автори поставили за мету провести обчислення на всій території України, обумовивши рівень W , який відображає сучасне положення кордону P_1 та C_3 . У цьому орієнтуватимемося на ресурси, придатні від використання у теплопостачанні, тобто для видобутку з геоциркуляційної системи (ГЦС) води за температури 60 °С та скидання її при 20 °С. Це — максимальні ре-

Рис. 4. Собівартість продукції ГЦС теплопостачання залежно від геотермічних умов та рівня технології. Економічна модель МТІ 1990 [18]; 1–4 — варіанти технології ГЦС (перш за все враховуються співвідношення потужностей відкачки з добувного шару та зворотного нагнітання води в нього).



сурси, тому що для обігріву та отримання електроенергії (пари для турбін) потрібні 100–40 °С та 210–70 °С, відповідно. Ухвалений підхід дозволяє використовувати визнані у світі результати економічних оцінок, виконаних у Масачусетському технологічному інституті, що показані на рис. 4 [18]. Вони свідчать про досягнення рентабельності одержання геотермальної енергії ГЦС для найдосконаліших технологій при рівні геотермічного градієнта (γ) 20–25 °С/км.

Приклад практичного використання теплової енергії в районі з такою величиною є і в Україні, хоча йдеться про ситуацію з використанням свердловини з самовитоком, що була побудована з іншою метою і з точки зору ГЦС не потребувала витрат. Звичайно, реальні витрати на виробку енергії традиційними джерелами сьогодні в умовах України треба визначати спеціально, але не викликає сумніву, що за минулі роки вони дуже зросли, привабливість геоенергетики стала більшою.

Залучення до аналізу даних з території України обумовлено двома причинами: 1) детальною вивченістю, досягнутою переважно роботами авторів (з проведеним кригінгом включно); 2) можливістю показати на цьому прикладі значення геотермальної енергії для звичайного (не вулканічного) регіону. Хоча незначна частина території (Закарпаття) може бути віднесена до перехідного типу недавно завершеного вулканізму з помітними проявами гідротермальної діяльності.

Розрахунок щільності теплових ресурсів виконується так [9]:

$$W = N \cdot K \cdot C_p \cdot \Delta T (H_3 - H_B),$$

де N — норма витрати палива на товарне тепло — $0,34 \cdot 10^{-10}$ тон у.п./Дж (тон умовного палива, в 1 т нафти — 1,47 т у.п., в 1 т кам'яного вугілля — 0,9 т у.п., 1 т конденсату — 1,54 т у.п., 1000 м^3 газу — 1,25 т у.п., 1 т бурого вугілля — 0,49 т у.п.), K — коефіцієнт температурного вилучення (прийнятий зазвичай 0,125), C_p — об'ємна теплоємність порід, її можна вважати практично постійною — $2,5 \cdot 10^6$ Дж/м³ · °С, ΔT — різниця в температурі теплоносія та скидання 40 °С; H_3 — глибина вибою, на якій визначено нижню T . Відповідно $W = 0,000425 (H_3 - H_B)$ у тонах у.п./м² при H в метрах. Глибина H_B — це та температура, на якій забезпечується середня T в інтервалі $H_3 - H_B$, що дорівнює 60 °С. Вона визначається як $(T_3 - T_T)/0,5\gamma$ де T_T — температура теплоносія, γ — середній геотермічний градієнт в інтервалі.

Таким чином, завдання зводиться до розрахунку T для даного регіону (даного розподілу теплопровідності з глибиною) при різних реальних глибинних теплових потоках і подальшому розрахунку W для глибини буріння 6000 м (проведені також обчислення для 4500 і 3000 м). Урахування конкретної температури

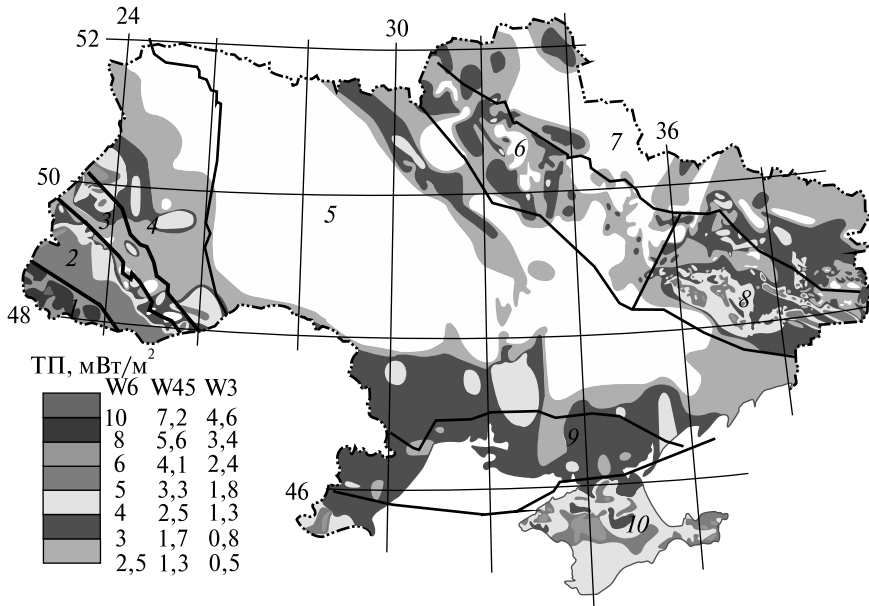


Рис. 5. Карта розподілу W6 на території України

Таблиця 1. Розподіл λ (Вт/°С·м) за глибиною в регіонах України

ΔH , км	1	2	2–3	3	4	5 і 7	5, 7 схили	6 борти	6	8	9	10
0–1,5	1,85	2,65	2,45	1,8	2,1	2,65	1,7	1,8	1,8	2	1,8	1,6
1,5–3	2,65	2,65	2,45	2,25	2,65	2,65	2,65	2,05	2,05	2,1	2,2	2,05
3–4,5	2,65	2,65	2,45	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,2	2,3	2,65	2,5
4,5–6	2,65	2,65	2,45	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,3	2,5	2,65	2,65
0–6	2,39	2,65	2,45	2,28	2,49	2,65	2,32	2,22	2,07	2,21	2,27	2,12

Примітка. Номери регіонів див. на рис. 1.

Таблиця 2. Зіставлення реальних ТП і W6 в різних регіонах України

W6, т у.п./м ²	ТП (мВТ/м ²) в регіонах											
	1	2	2–3	3	4	5 і 7	5, 7 схили	6 борти	6	8	9	10
1						38						
2		48	44	41	45	48	42	40	38	40		
3		59	54	50	55	59	51	49	46	49	50	
4		69	64	60	65	69	60		54	58	59	56
5	73	80	74	69	75	79			62	67	68	64
6		82		79						76		73
7		92								85		81
8	101											
9	111											
10	120											
W6 min	48	53	49	46	50	53	46	44	41	44	45	42

Примітка. W6 min — мінімальний рентабельний рівень, W6 — 2,5 т у.п./м².

поверхні (T_0) в місці розрахунку глибинних T дає варіації значень W до $\pm 4\%$ (наприклад, при заміні 8°C на $6\text{--}10^\circ\text{C}$). Тож у принципі можна у кожному регіоні запровадити одну T_0 під час розрахунку T за ТП.

Очевидно, що коефіцієнт температурного вилучення не є константою. Його необхідно визначити, орієнтуючись на реальні умови процедури, що розглядаються. Розрахунок показує, що є сенс враховувати не всі параметри процесу. Перш за все, температурна аномалія за весь час роботи системи помітно не виходить за межі тріщинуватої зони. Обмеженням може бути час існування (рентабельного функціонування) циркуляційної системи. Він пов'язаний із замулюванням тріщинуватої зони навколо свердловини, через що перестає засвоюватися в потрібній кількості вода, що закачується назад, збільшуються витрати енергії на роботу нагнітальних насосів і т.п. За відомими даними можна прийняти тривалість експлуатації ГЦС в 25 років. Якщо вона не перевищується, то момент припинення вилучення тепла є досягнення в пласті, звідки викачується вода, середньої температури коло 60°C .

З викладеного вище про спосіб розрахунку W та карти теплового потоку (див. рис. 3) можна зробити попередній висновок про досить широке розповсюдження рентабельних щільностей геотермальної енергії на території України.

Являє якийсь інтерес порівняння концентрації W з даними про родовища вуглеводнів. Розглянемо щільність запасів енергії, яку можна отримати у вигляді товарного тепла з великого нафтового родовища у ДДЗ (без урахування витрат енергії на транспортування нафти і при ККД перетворення в корисне тепло 0,8). Використаємо такі реальні параметри родовища: потужність продуктивного шару — 180 м, пористість породи колектора — 0,15, коефіцієнт заповнення пор — 0,75, коефіцієнт вилучення — 0,37, щільність нафти — $0,8\text{ т/м}^3$. Одержуємо $8,8\text{ т у.п./м}^2$. На менш потужному родовищі (яке в умовах України рентабельно експлуатувати при наявності свердловин) запасів на порядок менше. Таким чином, навіть по концентрації геотермальна енергія порівняна в ряді районів з сконцентрованою у традиційно використовуваних місцях видобутку вуглеводнів. Площа ж її розповсюдження незрівнянно більша. Слід відзначити, що для порівняння треба використовувати не значення W_6 , що винесено на карту, а повну енергію, зосереджену в усьому інтервалі глибин, де вона рентабельно вилучається. Вона приблизно у 4 рази більша (див. нижче).

Карта щільності геотермальних ресурсів

Геоенергетичні дослідження виконуються з участю авторів вже протягом більш ніж 20 років [2 та ін.]. Були побудовані карта W_6 для всієї території України (досить схематична) та більш детальні карти для окремих регіонів (W_6 — це щільність енергії у шарі, обмеженому глибинами 5,5—6,0 км). Карти базувалися на розподілах глибинного теплового потоку авторів та інформації про розподіл теплопровідності порід на різних глибинах у головних українських регіонах. Геотермічна вивченість країни в цілому — найвища в світі, кількість значень λ приблизно така ж, як і теплових потоків. Але мережа досліджень вкрай нерівномірна, що обумовлено розподілом придатних для роботи свердловин та формулюванням різного характеру задач при відборі керну. На картах присутні «білі плями» загальною площею біля $100\,000\text{ км}^2$ (1/6 площі країни).

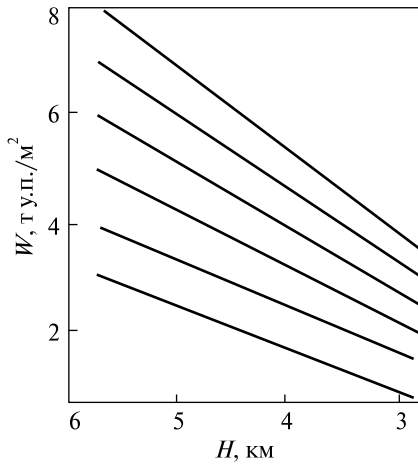


Рис. 6. Зміна геотермальної енергії зі скороченням глибини її видобутку.

Тому, як показано вище, сучасний етап вивчення розподілу геотермальних ресурсів почався з роботи по ліквідації «білих плям» у розподілі теплового потоку. Зараз відбувається перерахунок у W та об'єднання регіональних карт. Це досить складний процес, який потребує встановлення перехідних величин λ на кордонах регіонів. Уяву про мінливість параметру дає табл. 1.

Зрозуміло, що недоліки у використаних параметрах ведуть до помилкових оцінок ТП, що впливає і на результати обчислень геотермальної енергії (табл. 2). Детальна розробка складних елементів карти W планується на майбутнє, після випробування статистичних інструментів оцінки варіацій λ на контакті Донбасу та Приазовського масиву та у західному Донбасі. У даний час можна продемонструвати регіональне розповсюдження щільності ресурсів (рис. 5). Для інших регіонів України таких складностей нема. Справа в тому, що більшість «білих плям» розташована на Українському щиті на його схилах, де немає свердловин для спостережень, і саме тут — мінімальний ТП. Тому недосліджені райони досить часто опиняються у зонах з нерентабельними ресурсами.

Висновки

Очевидна концентрація ресурсів на заході, південному сході та півдні країни, але і в центральній частині, зокрема у районі Києва, зустрічаються місця з непоганими перспективами. Треба лише відзначити, що вони потребують ретельної перевірки, бо інформація одержана з неглибоких свердловин.

Звичайно, енергію можна одержати і на глибинах, менших за 5,5–6,0 км, хоча і в меншій кількості. Про її кількість свідчать дані рис. 6.

Кожна точка на лініях демонструє кількість т.у.п./м², що можна одержати з інтервалу глибин 0,5 км на глибині його центру за умови, що у інтервалі 5,5–6,0 км в цьому пункті одержана зазначена для даної лінії величина W_6 . Підрахунок для всієї території України демонструє суму геоенергетичних ресурсів W_6 1,1 трлн т у.п. Їхня кількість при використанні рентабельно видобутої енергії з усього придатного інтервалу глибин приблизно у 4 рази більше.

Таблиця 3. Запаси енергії родовищ горючих корисних копалин України (у млрд т у.п.)

Вид палива	Запаси	Вид палива	Запаси
Кам'яне вугілля	38,80	Нафта	0,22
Буре вугілля	1,27	Газ	1,61
Торф	0,25	Конденсат	0,12
		Разом	42,27

Оцінка геотермальних ресурсів, які можна використовувати без підігріву, отримуючи пару для отримання електроенергії (Т скидання флюїду дозволяє використовувати його для теплопостачання), показала, що при глибині буріння 4,5 км мінімальні ресурси з'являються в зоні максимального ТП Закарпатського прогину (>120 мВт/м²). При глибині буріння 6 км мінімальні запаси потрібної пари можна знайти крім Закарпаття — у Карпатах, Прикарпатті, Криму та Донбасі, можливо — у Переддобрузькому прогині у зонах з W6 більше 6 т у.п./м². Поза межами нашого розгляду лишається низка технологічних схем комплексного використання енергії. У будь-якому районі з рентабельним видобутком гарячої води вона (точніше, нагрітої нею води з теплообмінника) може поступати на ТЕЦ, скорочуючи витрати палива. На газовому родовищі можна використовувати воду та газ із законтурних сверловин разом, доводячи результат до пари.

Цікаво порівняти загальні запаси геотермальної енергії України з наявними у покладах горючих копалин (табл. 3).

Сума лише W6 перевищує запаси горючих копалин (в основному кам'яного вугілля) у 26 разів (зауважимо, що до обробки кригінгом карти ТП результат складає 24 рази). З урахуванням екологічних переваг геотермальної енергетики, це дозволяє оцінити використання тепла Землі в Україні як дуже перспективний напрямок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Усенко О.В. Тепловое поле территории Украины. Киев: Знання, 2002. 168 с.
3. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Усенко О.В. Геотермический атлас Украины. Киев: Корвин прес, 2004. 60 с.
4. Гордиенко В.В. Гордиенко И., Завгородняя О. Тепловое поле и геознергетические ресурсы Украины. Saarbrücken: LAP, 2016. 108 с.
5. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. Глубинный тепловой поток Украины и Молдовы. Докл. НАН Украины. 1996. № 12. С. 119—123.
6. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Гордиенко Л.Я., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н. Зоны современной активизации территории Украины. *Геофиз. журнал*. 2020. №2. С. 29—52.
7. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Усенко О.В. Тепловое поле Центральной и Восточной Европы. Стрoение и динамика литосферы Восточной Европы. Москва: ГЕОС, 2006. Вып. 2. С. 624—659.
8. Гордиенко В.В. Мантійна гравітаційна аномалія та сучасна активізація на території України. *Геологія та корисні копалини Світового океану*. 2022. №1. С. 3—21.
9. Дядькин Ю.Д. Основы геотермальной технологии. Ленинград: ЛГИ, 1985. 176 с.
10. Зуй В.И., Жук М.С. Тепловое поле геологических структур Беларуси. *Литасфера*. 2006. № 2 (25). С. 111—127.
11. Карта глубинного теплового потока территории Украины. М-6 1 : 2 500 000. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя, О.В., Усенко О.В. Киев: Ин-т геофизики НАНУ, 1999.
12. Карта теплового потока территории Европейской части СССР (и Объяснительная записка к карте). М-6 1 : 5 000 000. Ред. В.В. Гордиенко, А.А. Смыслов, У.И. Моисеенко. Киев: Мингео УССР ЦТЭ, 1987.
13. Карта теплового потока территории СССР (и Объяснительная записка к карте). М-6 1 : 5 000 000. Ред. В.В. Гордиенко, У.И. Моисеенко. Киев: ГКП ЦТЭ, 1991.
14. Карта теплового потока территории Украины и Молдовы (и Объяснительная записка к карте). М-6 1 : 2 500 000. В.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя. Киев: Геос, 1993.

15. Національний атлас України. Карта глибинного теплового потоку. Київ: Картографія, 2007. 440 с.
16. Gordienko V., Gordienko I. and Zavgorodnyaya O. Formation of geothermal energy resources. NCGT Journal. 2017. 4. P. 577—590.
17. Molinari i., Raileanu V., Morelli A. A Crustal Model for the Eastern Alps Region and a New Moho Map in Southeastern Europe. Pure Appl. Geophys. 2012. **169**. P. 1575—1588.
18. Olea, R. A practical primer on geostatistics. U.S. Geological Survey. Open-File Report 2009—1103. Version 1.4. 2018. 348 p.
19. Tester J., Herzog, H. Economic Predictions for Heat Mining: A Review and Analysis of Hot Dry Rock (HDR) Geothermal Energy Technology. MIT-EL 90-001. 1990. 180 p.

Стаття надійшла 18.10.2022

V.V. Gordienko, Dr. Sci. (Geol.&Mineral.), Professor, Head of Dept.

e-mail: gordienkovadim39@gmail.com

ORCID 0000-0001-9430-7801

Scopus author Id = 7102473958

I.V. Gordienko, PhD. (Geol.&Mineral.), Leading Researcher

e-mail: tectonos@igph.kiev.ua

ORCID 0000-0002-5619-0486

Scopus authorID=5719836183

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine

32, Palladin ave., Kyiv, Ukraine. 03142

MAPS OF DEEP HEAT FLOW AND GEOTHERMAL RESOURCES IN UKRAINE

A technique for processing the material used to map the deep heat flow (HF) on the territory of Ukraine and constructing a map of geothermal resources on its basis is considered. We are talking about the deep (corrected) HF, since its error (determined by the differences in values at close points) is noticeably smaller than in the observed one, and only its values can be used to build thermal models of the earth's crust and upper mantle and solve the indicated applied problem. Due to the unique study of Ukraine in 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 means of processing the experimental material in the territories adjacent to such white spots cannot completely replace a full-fledged study of HF within them. Nevertheless, the existing methods of geostatistics allow, by processing the available network of results, to ensure the construction of a map of the entire study area. In our case, the kriging technique was applied. The method works best inside a wrapper defined by peripheral data. In areas with a stable «wavelength» of HF anomalies, it is possible to fill in the gaps of the map without any problems. Naturally, with a noticeable smoothing of field variations. Most of the processed fragments of the map belonged to this type. A new edition of the description of the distribution of Ukraine's geoenergy resources is considered. We used a map of the deep heat flow processed by the kriging method and the construction of maps by region with the calculation of thermal conductivity at depths of up to 6 km at their contacts. This allowed to fill in the gaps in the network of experimental data and clarify the position and intensity of parameter anomalies in the southern part of the Carpathians, the north-eastern slope of the shield, in the Donbass and improve the overall assessment of geoenergy resources (up to 1.1 trillion tons of reference fuel). Geothermal energy from the deepest possible extraction interval (5,5—6,0 km) is about 26 times larger than the reserves of all fossil fuels in Ukraine.

Keywords: *Earth's heat flow, filling in blank spots, density of geothermal resources.*