



Топлинен поток и дълбочинни температури в земната кора на България на основата на числено моделиране

Михаил Хуторской¹, **Наталия Костова²**, Алексей Бендерев², Владимир Христов²

¹ Геологически институт, РАН, Москва 109017, Русия

² Геологически институт, БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 24, София 1113, България

Heat flow and depth temperatures in the Earth crust of Bulgaria based on numerical modelling

Mikhail Khutorskoy¹, **Nataliya Kostova²**, Aleksey Benderev², Vladimir Hristov²

¹ Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 109017 Moscow, Russia; E-mail: mdkh1@yandex.ru

² Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev str., bl. 24, 1113 Sofia, Bulgaria; E-mail: vhh@geology.bas.bg

Abstract. The analysis of heat flow data included in the Catalogue of geothermal data of Bulgaria is made. The study of primary information about the deep temperatures in the wells has allowed determining the most correct values for it, which is further used for two- and three-dimensional modelling. Temperatures in the Bulgarian Earth's crust up to 10 km have been established using numerical simulation. Analysis of the temperature field distribution at different depth levels showed that the southern part of the country (the Rhodopes and Rila Mountains) is characterised by higher temperatures compared to the zone of the folded Balkans and the Moesian Platform. Local temperature anomalies (thermal domes) were discovered on the Moesian Platform in the areas where hydrothermal reservoirs are located.

Keywords: temperature, heat flow, database, numerical modelling.

Резюме. Извършен е анализ на данните за топлинния поток, публикувани в Геотермичния каталог на България. Проучването на първичната информация за температурата в дълбочина, измерена в сондажи, позволява да се определят най-достоверните стойности за топлинния поток, които по-късно са използвани за дву- и тримерното моделиране. С помощта на цифровото моделиране са получени температури в земната кора в България до дълбочина 10 km. Разпределението на температурното поле на различни дълбочинни нива показва, че южната част на страната (района на Родопите и Рила) се характеризира с по-високи температури от зоната на Стара планина и Мизийската платформа. Локални температурни аномалии (топлинни куполи) са открити в района на Мизийската платформа, където са локализирани основните хидрогеоложки хоризонти.

Ключови думи: температура, топлинен поток, база данни, числено моделиране.

Въведение

През последните години значително нарасна значението на възобновяемите енергийни източници, какъвто е и геотермалната енергия. Изясняването на възможностите за нейното използване е свързано с познаване на параметрите на топлинното поле на Земята. Едни от основните показатели, които го характеризират, са разпределението на температурите в дълбочина и топлинният поток (ТП). Основна цел на настоящото изследване е да се получи регионална представа за пространствените промени на тези показатели чрез числено моделиране. Началната информация за съставяне на моделите са данни-

те от термокаротажите, провеждани от различни геоложки и геофизични организации в България, в проучвателни и експлоатационни сондажи на територията на цялата страна, както и в локални изследвания на рудни и нефтени полета. Получените данни са обобщени в Геотермичния каталог на България (Bojadgieva, Gasharov, 2001).

Анализ на изучеността на топлинния поток

Топлинното поле в България е обект на изследване от редица автори (Velinov, 1975, 1986; Velinov, Petkov, 1976; Velinov, Bojadgieva, 1981;

Kostianev et al., 1990; Dobrev et al., 2004; Radichev, Dimovski, 2007 и др.). Карти на дълбочинните температури, геотермичния градиент и топлинния поток са публикувани от Velinov et al. (1979), Petrov et al. (1991), Bojadgieva et al. (1991), Radichev & Dimovski (2007). Несъответствията в информацията за топлинния поток, публикувани в световни източници за територията на България (Chapman et al., 1979; Bojadgieva et al., 1991; Hasterok, 2016), се дължат най-вероятно на извършените обработки и интерпретации на оригиналните данни, взети от каталога на Bojadgieva & Gasharov (2001).

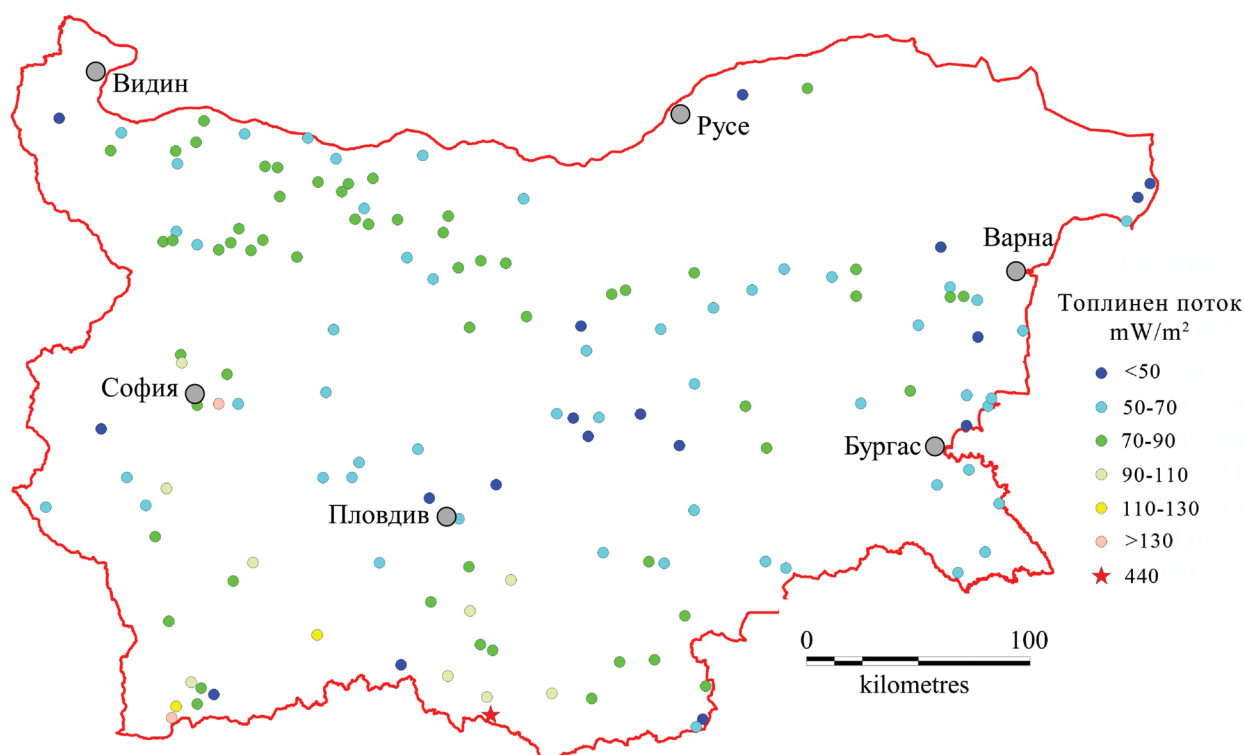
Преди да се пристъпи към изчисляване на дълбочинните температури в земната кора, са анализирани внимателно наличните първични данни за температурните измервания в сондажи. За цифровата симулация на геотермалното поле са взети предвид стойностите на топлинния поток, включени в каталога на Bojadgieva & Gasharov (2001), основани на реални температурни измервания (фиг. 1).

Предпоставка за правилното изчисляване на структурните, геоложките и термофизичните нееднородности, създаващи смущение на дълбочинния топлинен поток, е отчитането на геометрията и структурните граници на комплексите с контрастна топлопроводност. Информация

за дълбоките геоложки структури е получена от сеизмичните профили по МОВ ОДТ (Метод на отразените вълни. Обща дълбочинна точка) (Dachev, 1988), която е използвана за основа при съставянето на термофизични разрези на земната кора по всеки от профилите. Местоположението на седемте най-дълги профила, за които са направени изчисления на дълбочинната температура, е избрано съобразно наличната сондажна и геофизична информация, която е разпределена твърде неравномерно на територията на страната, значително по-пълна в Северна България (фиг. 2).

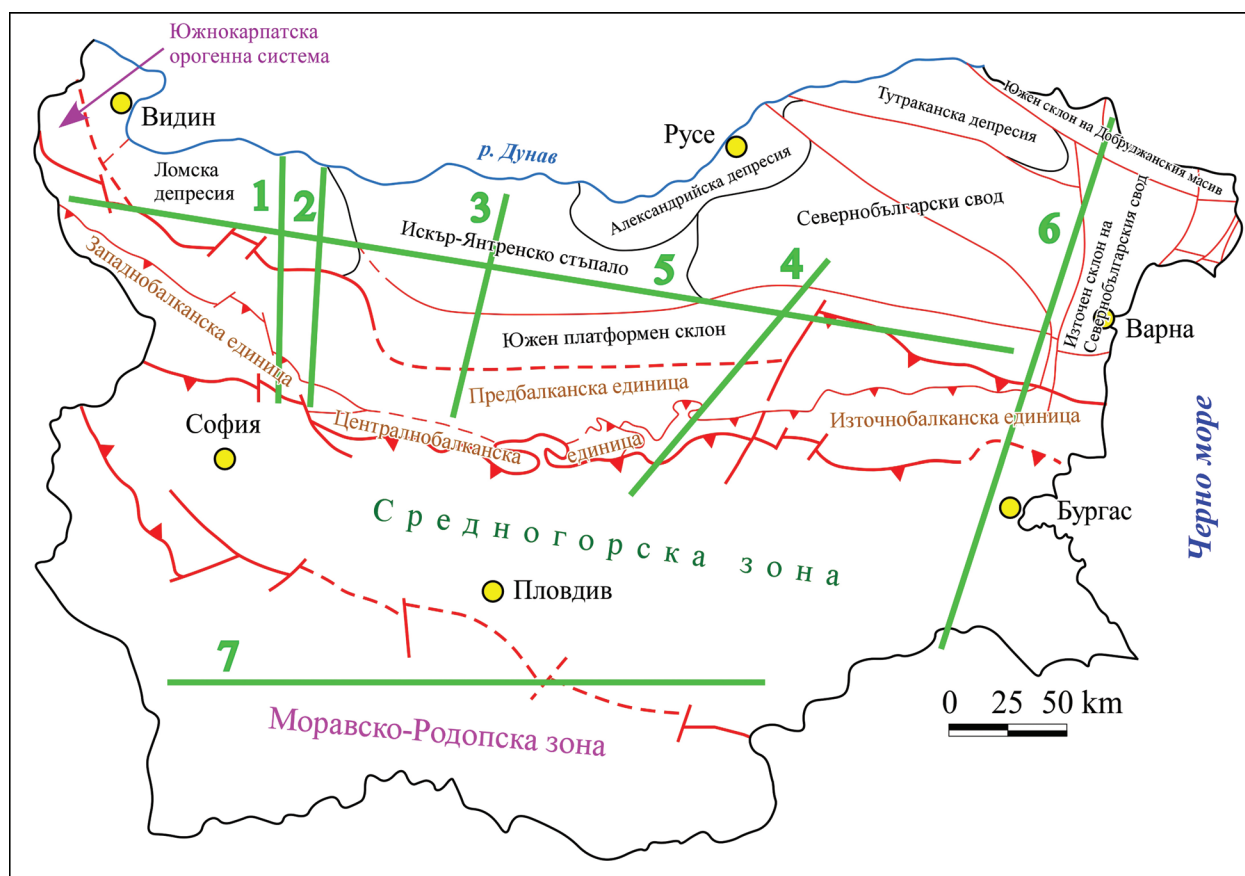
Методи за моделиране на геотермалното поле

За изучаване на разпределението на температурата в разрез, е използван численият метод на крайните елементи с квадратична апроксимация на температурната функция между възлите на правоъгълна мрежа. В оригиналната програма "TERMGRAF", съставена с наше участие (Khutorskoy, 1996), е осигурена мрежа от 41 x 41 клетки (т.е. решава се двумерна задача), като линейните размери на клетката по осите X и Z могат да бъдат променяни според желанието



Фиг. 1. Пунктове за измерване на топлинния поток и стойностите му в mW/m^2 (по Bojadgieva, Gasharov, 2001)

Fig. 1. Heat flow data points in mW/m^2 (after Bojadgieva, Gasharov, 2001)



Фиг. 2. Тектонско райониране на България (по Dabovski, Zagorchev, 2009) с разположение на профилите, по които е изчислявана дълбочинната температура

Профили: 1 – Враца-Козлодуй; 2 – Мездра-Оряхово; 3 – Камено-Остров; 4 – Габрово-Вардим; 5 – Луковица-Джурово; 6 – Тръстеник-Стежерово; 7 – Крайново-Росен

Fig. 2. Tectonic scheme of Bulgaria (after Dabovski, Zagorchev, 2009) with the location of the profiles on which the depth temperature is calculated

Profiles: 1, Vratsa-Kozloduy; 2, Mezdra-Oryahovo; 3, Kameno-Ostrov; 4, Gabrovo-Vardim; 5, Lukovitsa-Dzhurovo; 6, Trstenik-Stezherovo; 7, Kraynovo-Rosen

на оператора. В зоната на симулиране се определят конфигурацията на контрастните среди и техните топлофизични свойства: температуропроводност a (m^2/s), топлопроводност k ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) и топлоемкост на слоя c ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$). В изчислителната част на комплекса са дефинирани линейните размери на зоната на моделиране (L_x и L_z , в km), които определят линейните размери на възела ($L_x/41$ и $L_z/41$), както и интервалът от време за дискретизиране на решението (в Ma). Времето на итеративния процес се избира от програмата и се изчислява като

$$\tau = 10^{-7} \cdot (Z^2/4a),$$

където Z е дебелината на симулационната област (в km).

Цифровото решение на уравнението на топлопроводност е:

$$\left(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(x, z) = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

където: τ е времето, k_x и k_z са коефициентите на топлопроводност, съответно по осите x и z . Извежда се температурата и разпределението на топлинния поток $q(z)$ и $q(x)$ за приетата топлофизична среда в последния момент от етапа на дискретизация на времето.

Полученият файл с резултати се преименува на файл с първоначалната температура и през следващия етап изчисляването започва от крайния момент на предишния етап. Тази процедура може да бъде сравнена с последователното заснемане на движещ се влак от наблюдател на платформата. На всеки кадър позицията на композицията се променя, но може да се определи състоянието му във всеки изминал момент.

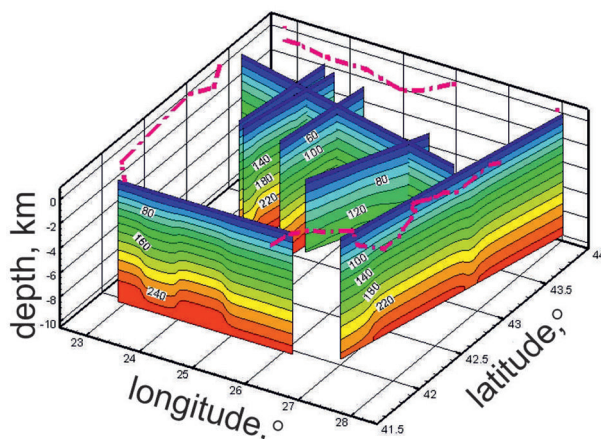
Възможността за дискретизация на решението е удобна, ако е необходимо да се промени топло-физичната среда поради структурна и вещест-вена реорганизация на геоложкия разрез, да се зададе разпределението на нови топлинни из-точници, както и да се видят резултатите от из-числяването на палеотемпературното поле. Ако в модела се изисква да се зададе топлосопре-нос, това може да се симулира чрез определяне на гранични температури и/или адиабатния гра-диент в дълбочинния интервал, на който се раз-пространява адвекцията (преносът на топлина).

При моделирането за всеки профил се за-дава граничната локална температура в горна-та граница в съответствие с метеорологичните данни и топлинния поток – в долната граница ($q_{гр.}$), която съответства на стойността, измерена или оценена в най-близкия сондаж ($q_{набл.}$), минус топлинния поток, определен в земната кора над долната граница на моделираната площ по вре-ме на спонтанното разпадане на дългоживущите радиоизотопи (q_p), т.е.

$$q_{гр.} = q_{набл.} - q_p.$$

Последното се изчислява на основата на се-измична информация за дебелината на слоя (z_i) и неговия състав, както и от общоприетите тра-диционни стойности на специфичното генери-ране на топлина за съответния тип скала: $(q_p)_i = Q(x, z) \cdot z_i$ (Rybach, Buntbarth, 1982; Khutorskoy et al., 2013). При направените изчисления тем-пературата в „неутралния слой“ се приема да бъде 12 °C (средногодишна температура на въз-духа за България), а топлинният поток в долната граница при първото приближение съответства на топлинния поток, който е показан на карта-та (фиг. 1). Стойността на топлинния поток за радиогенните скали е определена само за най-горния слой на седиментните наслаги, чиято дебелина е оценена от структурните профили на МОВ ОДТ. Приема се, че генерирането на топлина е 1 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, което съответства на стой-ността на този параметър за пясъчливо-гли-нести скали, като се вземат предвид средни-те концентрации в тях на ^{238}U и ^{232}Th (Smyslov et al., 1979).

Точността на изчисленията обикновено се оценява по два критерия: 1) от съвпадението на моделно определения топлинен поток и измере-ния в сондажите и 2) чрез съвпадение на тем-пературите в пресечната точка на профилите. В зони, при които липсват преки геотермични измервания в сондажи, е използван само втори-ят критерий. Резултатите от изчисляването на температурите за двумерния модел в диапазона на профилите са показани на фигура 3. „Несъ-



Фиг. 3. Двумерен температурен модел в дълбочина

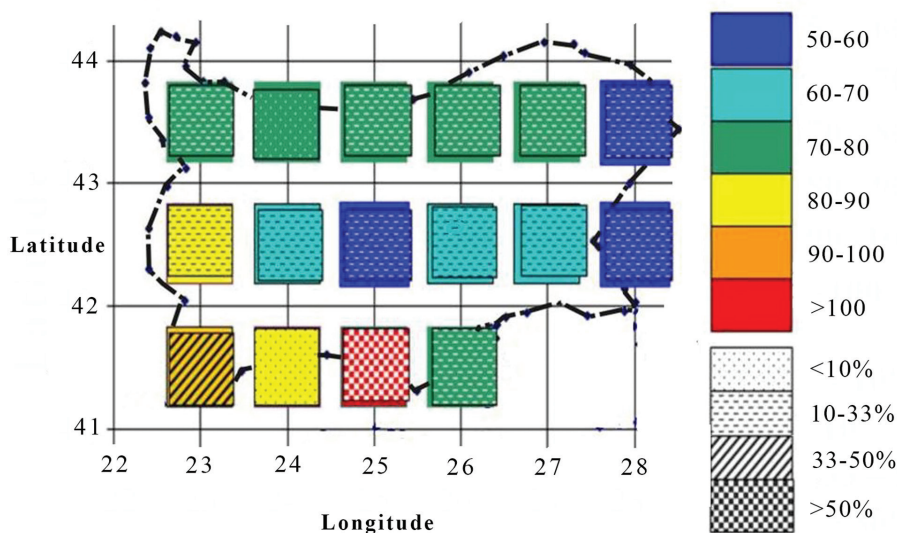
Fig. 3. Two-dimensional temperature model

ответствието“ на изчислените температури при различни дълбочини в точката на пресичане на профили 1, 2, 3 и 4 с профил 5 е не повече от 50 m, т.е. относителната грешка, изчислена по метода на най-малките квадрати, е 0,5%.

Максималните температури в земната кора (270–280 °C на дълбочина 10 km) се достигат в района на Родопите. Там се открояват аномал-но високи единични точки на топлинния поток, където той достига стойности 127–130 mW/m^2 и дори 440 mW/m^2 в пункт Ерма река (41,24° N, 25,21° E). Въпреки това фоновото ниво на топ-линния поток за Южна България е 75–85 mW/m^2 . Малко по-нисък (60–70 mW/m^2) фон е регистри-ран в Мизийската платформа, като там няма от-четливи аномалии. В долната част на профилите 1, 2, 3 и 6, на дълбочина 10 km, температурата е по-ниска с 30–40 °C (т.е. 230–240 °C).

Целесъобразно е регионалният сравнителен анализ на топлинния поток за цялата територия на страната да се извърши с помощта на карта със средните стойности на топлинния поток по квадратите на координатната мрежа. Изчисле-на е средна аритметична стойност за топлин-ния поток ($q_{cp.}$) по квадрати $1^\circ \times 1^\circ$ (фиг. 4), къ-дето коефициентът на вариация $V = S/q_{cp.}$ (S е средноквадратично отклонение) е показан чрез различна шриховка. Тези данни потвърждават заключението за увеличаване на стойностите за топлинния поток в южна посока.

Триизмерният геотермален модел е изграден с помощта на графичен 3D софтуер TECPLOT v.10.0 (Amtec Engineering Inc.), който позволява обемна интерполация на наблюдаваното поле (в случая температура, топлинен поток и структур-ни сеизмични томографски граници) в коорди-



Фиг. 4. Разпределение на средноаритметичните стойности на ТП по квадрати 1°×1°

Диапазонът на средните стойности (mW/m²) е показан на цвѐтова скала, а на коефициента на вариации V (%) – с шрихи

Fig. 4. Average heat flow data calculated per squares 1°×1°

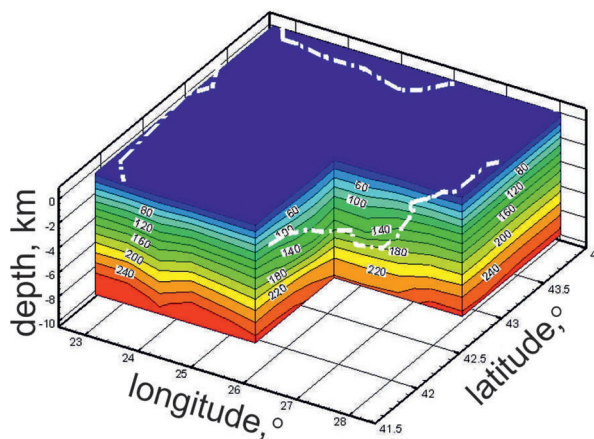
Range of the average values (mW/m²) displayed on a color scale; variable coefficient range V (%) – with strokes

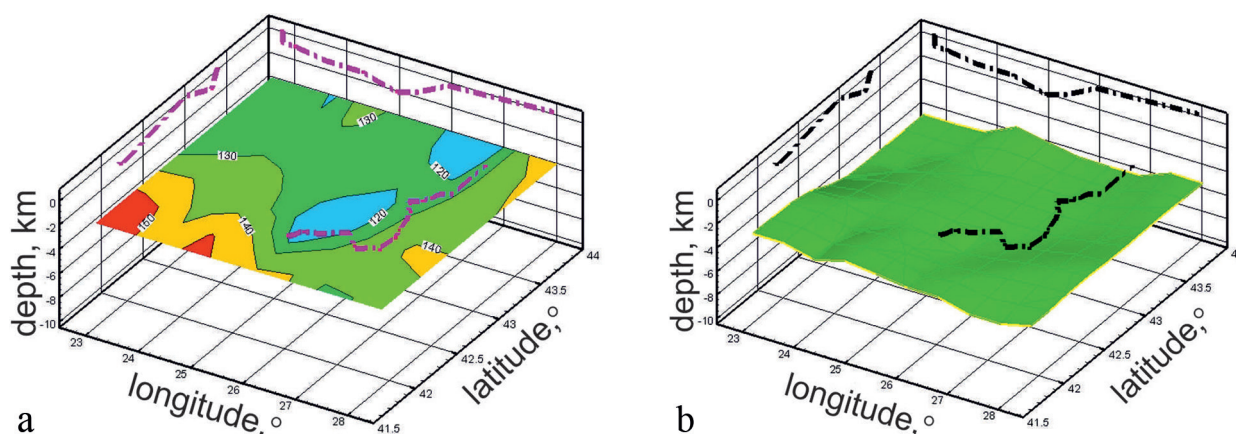
нати ширина-дължина-дълбочина. За подготовката на файловете с данни във формат TESPLOT v.10.0 е изготвена специална програма, която, при определянето на координатите на началото и края на профила, както и дълбочинния интервал, трансформира текстовия файл, съдържащ резултатите от термичното моделиране, във формата на базата данни TESPLOT. Програмата TESPLOT осигурява триизмерна интерполация на мрежата при всяка конфигурация. В повечето случаи се използва неравномерна мрежа, която е „свързана“ със сеизмични профили, по които са извършени двумерни изчисления на температурата в дълбочина. По този начин уравнението (1) се допълва от третата липсваща производна ($k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$) и се „превръща“ в тримерно уравнение на топлопроводност.

Резултатите от изчисляването на температурното поле, с използване на интерполационното приближение, ще се различават от резултатите, получени при решаването на правата задача за триизмерна среда само от размера на изкривяването, причинено от стойностите на топлинния поток по оста Y. Поради това, колкото по-малко е разстоянието между съседни георезистори, толкова по-точно ще е интерполационното приближение към 3D-модела. Дългогодишният опит в двумерното термално моделиране показва, че величината на изкривяването на топлинния поток по оста Y е незначителна. Например, за типичен седиментен басейн хоризонталният компонент

на топлинния поток по оста Y е не повече от 0,04 mW/m², т.е. стойностите са по-ниски с три порядъка от фоновата стойност на дълбочинния топлинен поток. Следователно, полученото триизмерно разпределение на температурата с помощта на обемната интерполация е практически адекватно при решаване на правата задача за изследваното геотермично поле.

Триизмерното разпределение на температурата е показано на фигура 5. То е получено чрез





Фиг. 6. Трансформации на 3D-температурните модели

a – разпределение на температурата на дълбочина 4 km; *b* – пространствено разположение на изотермичната повърхност 180 °C

Fig. 6. Transformations of 3D-temperature models

a, temperature distribution at a depth of 4 km; *b*, space distribution of the isothermal surface 180 °C

обемна интерполация на температурите между профилите с номера 1–7, като се използва методът на „обратни претеглени разстояния“¹ (inverse distance), който най-често се използва в ГИС-технологиите при създаването на различни карти.

Дълбочинни температури в земната кора

Анализирайки температурното разпределение в примерния (3D) модел, може да се отбележи спад на температурите в дълбочина от южната към северната част на страната, а от друга страна само за северната част на България – от запад на изток (фиг. 5). Това потвърждава казаното по-горе, че средната стойност на топлинния поток се увеличава в Ломската депресия, западната част на Предбалканската единица в съседство със Западнобалканската зона, в Искър-Янтренското стъпало и Южния платформен склон в съседство с Предбалканската единица (фиг. 2).

В границите на Ломската, Александрийската и Тутраканската депресия има локални неголеми температурни аномалии под формата на термални куполи. Произходът им може да е свързан

с рефракцията на дълбочинния топлинен поток при условията на структурно-термофизична нееднородност на седиментната покривка на Мизийската платформа, чиято дебелина тук надвишава 6 km.

Прилагайки специализирани техники за преобразуване на 3D-температурния модел, конструирахме карти за температурното разпределение на конкретни дълбочини (фиг. 6a), които показват подобна ситуация за дълбочина 4 km и положението на изотермичната повърхност (тук е представена повърхност 180 °C – фиг. 6b). Тези карти са много полезни за прогнозиране на локализацията и дълбочината на възможни находища, зоните на топлинните условия за регионалния метаморфизъм или други граници.

Заклучение

Досега в страната има около 150 изчислени стойности на топлинния поток за различни пунктове, получени главно чрез изчисления на геотермичния градиент в дълбоки сондажи, базирани на температурни измервания по време на геофизични каротажни работи. Резултатите от цифровото моделиране на дълбочинните температури, които са представени в тази статия, се характеризират със значителна грешка. Въпреки това, те дават представа за тенденцията на температурните промени в дълбоките части на земната кора по време на прехода от една структурна зона към друга. Например, основателно е да се говори с висока степен на увереност за

¹ Методът на „обратното разстояние“ (ID) предполага еднозначно, че обектите, които са разположени в близост, са много подобни един на друг в сравнение с обектите, които са отдалечени на значително разстояние един от друг. Най-близките имат по-голямо въздействие върху прогнозираната стойност, отколкото отдалечените на значително разстояние. ID предполага, че всяка измерена точка оказва локално влияние, което намалява с увеличаване на разстоянието. Това дава по-голяма тежест на точките, които са най-близко до интерполираната площ.

повишаването на температурата на една и съща дълбочина от север на юг в Южна България и в рамките на Мизийската платформа – от запад на изток. Неотектонската активизация, която в значителна степен е засегнала Родопите, очевидно е била свързана с мантийната активност и постъпването на мантийни астеносферни материали от дълбочина в земната кора. Това може да обясни появата на редица аномални точки със стойности на топлинния поток над 120 mW/m² и 440 mW/m², дължащи се основно на хидротермална активност в споменатите точки.

По друг начин е възможно да се тълкува тенденцията на постепенно увеличаване на топлинния поток от Източния склон на Севернобългарския свод (Варненската моноклинала) към Ломската депресия. Източната част на Мизийската платформа е била въввлечена в общата седиментация на Черноморската депресия и съседните континентални структури, което е придружено от увеличаване на скоростта на седиментацията за сметка на разрушаването на рахлите наслаги в южна посока. Екранирането на дълбочинния топлинен поток от акумулирания седиментен слой

предизвиква намаляване на топлинния поток. Основният фактор за това са хидрогеложките условия – наличие на водоносни хоризонти с широко площно разпространение и вертикален обхват.

Геотермалното изследване ще помогне за разбирането на палео- и съвременната геодинамика на тази много контрастна в тектонско отношение територия. Получените резултати до голяма степен потвърждават изводите, направени в предишни изследвания от други автори. Изготвеният 3D модел дава по-детайлна пространствена представа за разпределението на топлинното поле в България.

Благодарности. Тази работа бе подкрепена финансово от руския „Фонд за фундаментални изследвания“ (проект № 18-55-18004) и българския Фонд „Научни изследвания“ (проект № 02/63-2018). Благодарим на руските и българските колеги, които взеха участие по време на полевата и камералната дейност, осигуриха всестранна помощ и подкрепа: А. В. Ермаков, О. Е. Киквадзе, Б. Г. Поляк, В. Б. Свалова, Е. А. Тевелева и Б. Денева.

Литература References

- Bojadgieva, K., S. Gasharov. 2001. *Catalogue of Geothermal Data of Bulgaria*. Sofia, GorexPress, 163 p.
- Bojadgieva, K., P. Petrov, S. Gasharov, T. Velinov. 1991. Bulgaria (National report). – In: Hurtig, E., V. Cermak, R. Haenel, V. Zui (Eds). *Geothermal Atlas of Europe. Explanatory Text*. Hermann Haack Verlagsgesellschaft GmbH, 16–18.
- Chapman, D., H. Pollack, V. Čermák. 1979. Global heat flow with special reference to the region of Europe. – In: Čermák, V., L. Rybach (Eds). *Terrestrial Heat Flow in Europe*. Springer Verlag, 9–21.
- Dabovski, H., I. Zagorchev. 2009. Alpine tectonic subdivision of Bulgaria. – In: Zagorchev, I., H. Dabovski, T. Nikolov (Eds). *Geology of Bulgaria. Part II. Mesozoic Geology*. Sofia, “Prof. Marin Drinov” Publish. House, 30–37 (in Bulgarian with English abstract).
- Dachev, H. 1988. *Structure of the Earth's Crust in Bulgaria*. Sofia, Tehnika, 329 p. (in Bulgarian with English abstract).
- Dobrev, T., S. Dimovski, S. Kostianev. 2004. Level of study of the geothermal field in Bulgaria and a methodical approach towards investigating its depth distribution. – *Ann. Univ. Mining and Geol.*, 47, 1–Geol. and Geophys., 251–258 (in Bulgarian with English abstract).
- Hasterok, D. (Ed.). 2016. *Global Heat Flow Database*. <http://heatflow.org/data>.
- Khutorskoy, M. D. 1996. *Geothermics of the Central-Asian Fold Belt*. Moscow, RUDN Publ., 289 p. (in Russian with English abstract).
- Khutorskoy, M. D., V. R. Akhmedzyanov, A. V. Ermakov, Y. G. Leonov, L. V. Podgornyykh, B. G. Polyak, E. A. Sukhikh, L. A. Tsybulya. 2013. *Geothermics of the Arctic Seas*. Moscow, GEOS, 288 p. (in Russian with English abstract).
- Kostianev, S., T. Dobrev, E. Spassov. 1990. Comparison between the geothermal field and seismicity in the earth's crust of Bulgaria. – *Bulg. Geophys. J.*, 16, 2, 61–66.
- Petrov, P., K. Bojadgieva, S. Gasharov, T. Velinov. 1991. Thermal field and geothermal regime in Bulgaria. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 52, 1, 1–8 (in Bulgarian with English abstract).
- Radichev, R., S. Dimovski. 2007. A study over the specifics in the distribution of the correlation coefficient between geophysical fields. – *Ann. Univ. Mining and Geol.*, 50, 1–Geol. and Geophys., 171–177 (in Bulgarian with English abstract).
- Rybach, L., G. Buntebarth. 1982. Relationships between the petrophysical properties density, seismic velocity, heat generation, and mineralogical constitution. – *Earth Planet. Sci. Lett.*, 57, 367–376.
- Smyslov, A. A., U. I. Moiseenko, T. Z. Chadovich. 1979. *Thermal Regime and Heat Production of the Earth*. Leningrad, Nedra, 212 p. (in Russian).
- Velinov, T. 1975. Elements of Bulgarian thermal field and their relationship with the geological structure. – *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 28, 12, 1673–1676 (in Russian with English abstract).
- Velinov, T. 1986. Geothermal field in Bulgaria. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 47, 1, 1–9 (in Bulgarian with English abstract).
- Velinov, T., K. Boyadgieva. 1981. *Geothermal Research in Bulgaria*. Sofia, Tehnika, 154 p. (in Bulgarian with English abstract).

Velinov, T., K. Boyadjieva, I. Petkov. 1979. Geothermal data of Bulgaria. – In: *Thermal Heat Flow in Europe*. Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 141–143.

Velinov, T., I. Petkov, 1976. Some results of the thermal

investigations in Bulgaria. – In: Adam, A. (Ed.). *Geoelectric and Geothermal Studies (East-Central Europe and Soviet Asia)*. KAPG Geophys. Budapest, Akademia Kiado, 439–442.

Постъпила на 05.02.2019 г., приета за печат на 04.06.2019 г.
Отговорен редактор Клара Бояджиева