

УДК 550.361

DOI: 10.46698/VNC.2024.89.20.008

Оригинальная статья

Тепловое поле Воронежского кристаллического массива

Д.С. Никитин^{id}, Е.Л. Прикащикова^{id}, М.Д. Хуторской^{id}

Геологический институт РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1,
e-mail: ndsnomination@mail.ru

Статья поступила: 03.09.2024, доработана: 31.10.2024, принята к публикации: 03.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Исследование теплового потока дает основную и достоверную информацию о глубинных температурах в земной коре, о фазовом состоянии вещества, что, в конечном итоге, позволяет судить о природе движущих сил тектогенеза. Детальный анализ распределения теплового потока (ТП) в разных структурно-формационных зонах Восточно-Европейской платформы (ВЕП) показывает, что его величина связана со многими геологическими неоднородностями строения фундамента и осадочного чехла платформы, а также обуславливается особенностями истории становления современной структуры регионов. **Цель работы.** В этом аспекте ставилась задача проанализировать распределение теплового потока и его радиогенной компоненты в районе Воронежского кристаллического массива (ВКМ). **Методы.** Исследованы теплопроводность образцов керн из скважины «Воронежская параметрическая» методом оптического сканирования и величина радиогенной теплогенерации за счет спонтанного распада долгоживущих изотопов урана, тория и калия рентгеноспектральным флуоресцентным методом на рентгеновском вакуумном спектрометре. Рассчитанный редуцированный тепловой поток задан как нижнее граничное условие при численном моделировании глубинных температур по профилю, секущему ВКМ. **Результаты.** Определено среднее значение теплового потока на Воронежском выступе (49 ± 4 мВт/м²). Радиогенная компонента теплового потока составляет 24–27 мВт/м², т.е. 50% от его фонового значения. Обнаруженные вариации ТП обусловлены структурно-теплофизическими неоднородностями. Они связаны с проявлениями трещиноватости, микро- и макровключениями в породы фундамента и хорошо заметны при оптическом сканировании теплопроводности практически каждого образца керн. Построена карта распределения теплового потока и рассчитаны глубинные температуры вдоль профиля вкрест простираения Воронежского кристаллического массива.

Ключевые слова: тепловой поток, теплопроводность, теплогенерация, Восточно-Европейская платформа, Воронежский кристаллический массив.

Благодарности: Работа подготовлена в рамках Госбюджетной темы ГИН РАН № 122012700311-2 и при финансовой поддержке Российского научного Фонда, грант № 23-17-00019.

Для цитирования: Никитин Д.С., Прикащикова Е.Л., Хуторской М.Д. Тепловое поле Воронежского кристаллического массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 84–99. DOI: 10.46698/VNC.2024.89.20.008

DOI: 10.46698/VNC.2024.89.20.008

Original paper

The thermal field of the Voronezh crystal massif

D.S. Nikitin^{id}, E.L. Prikatshikova^{id}, M.D. Khutorskoy^{id}

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7/1 Pyzhevskiy Lane,
Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: ndsnomination@mail.ru

Received: 03.09.2024, revised: 31.10.2024, accepted: 03.11.2024

Abstract: Relevance. The heat flow study provides basic and reliable information on the terrestrial temperatures in the Earth's crust, on the matter phase state, which, ultimately, allows us to judge the nature of the tectogenesis driving forces. A detailed heat flow (HF) distribution analysis in different structural and formation zones of the East European Platform (EEP) shows that its magnitude is related to many geological heterogeneities of the basement structure and sedimentary cover of the platform, and is also conditioned by the peculiarities of the formation history of the regions modern structure. **Aim.** In this aspect was set the task to analyze the heat flow distribution in the area of the Voronezh crystalline massif (VCM). **Methods.** The thermal conductivity of core samples from the Voronezh parametric well with optic-scan method and the magnitude of radiogenic heat generation due to spontaneous decay of long-lived isotopes of uranium, thorium and potassium by X-ray fluorescence spectral method on X-ray vacuum spectrometer were investigated. The calculated reduced heat flow is set as a lower boundary condition in the numerical modeling of the depth temperatures along the profile across to the VCM. **Results.** The heat flow average value at the Voronezh massif (49 ± 4 mW/m²) was determined. The radiogenic component of heat flow is 24-27 mW/m², i.e. 50% of its background value. The detected HF variations are caused by structural and thermophysical inhomogeneities. They are associated with fracturing, micro- and macroinclusions in the basement rocks and are clearly visible at optical scanning of thermal conductivity of almost every core sample. The heat flow distribution map was constructed and the depth temperatures were calculated along the profile across the Voronezh crystalline massif.

Keywords: heat flow, thermal conductivity, heat production, East-European platform, Voronezh crystal massif.

Acknowledgments: The work was prepared within the State Budget theme framework of RAS Geological Institute No. 122012700311-2 and with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 23-17-00019.

For citation: Nikitin D.S., Prikatshikova E.L., Khutorskoy M.D. The thermal field of the Voronezh crystal massif. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 84-99. DOI: 10.46698/VNC.2024.89.20.008

Введение

Основной объем материалов о тепловом потоке (ТП) на Восточно-Европейской платформе (ВЕП) был получен в 70-е и в начале 80-х годов XX века. В обобщающих монографиях, посвященных описанию термического режима платформы, указаны пределы его изменения от 35 до 55 мВт/м² [Тепловой режим ..., 1970; Глубинный тепловой поток ..., 1974], что свидетельствовало об относительной однородности ТП. Для докембрийской Восточно-Европейской платформы этот вывод подтверждал установленную ранее генетическую связь величин теплового потока и возраста тектономагматических циклов [Поляк, Смирнов, 1968; Хуторской и др., 2023]. Отмечалось, что наибольшие вариации ТП в указанных пределах приурочены к зонам дислокаций фундамента, а также к экзогональным впадинам платформ с широким развитием солянокупольной тектоники.

Однако детальный анализ распределения теплового поля в разных структурно-формационных зонах ВЕП показывает, что величина ТП связана со многими геологическими неоднородностями строения фундамента и осадочного чехла платформы, а также обуславливается особенностями истории становления современной структуры регионов.

Выступы докембрийского фундамента на ВЕП являются эталонными объектами для характеристики ТП платформы, т.к. в этих структурах искажающее влияние контрастной теплопроводности между осадочными породами чехла и метаморфическими породами фундамента минимально. Воронежский кристаллический массив (ВКМ) является одним из таких выступов.

Согласно существующим представлениям в строении докембрийского фундамента ВКМ выделяются два мегаблока: восточный (Воронежский), сложенный нижнепротерозойскими образованиями, и западный (Курский), характеризующийся преобладанием архейских пород, среди которых нижнепротерозойские отложения наблюдаются лишь в узких синклиналих зонах [Кременецкий и др., 2006] (рис. 1).

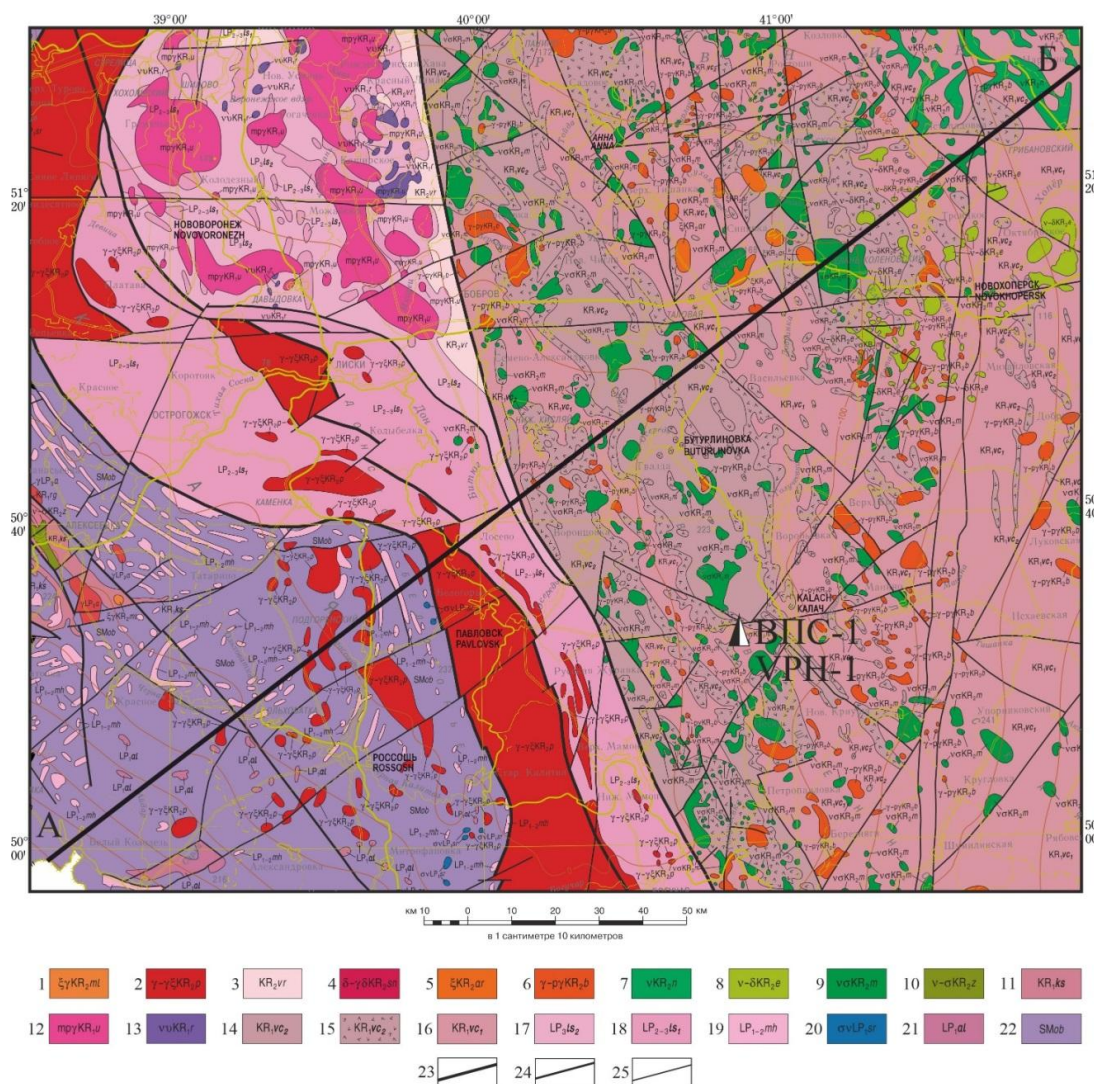


Рис. 1. Геологическая карта докембрийского фундамента в районе бурения ВПС-1 и расположение профиля А-Б:

- 1 – шебекинский габбро-сиенитовый комплекс; 2 – наволоцкий гранит-граносиенитовый комплекс; 3 – воронежская свита, метаэффузивы основного и среднего состава; 4 – стойло-николаевский диорит-гранодиоритовый комплекс; 5 – артюшковский щелочно-сиенитовый комплекс;

6 – бобровский гранит-плагиогранитный комплекс; 7 – новогольский габбро-долеритовый комплекс; 8 – еланский норит-диоритовый комплекс; 9 – мамонский перидотит-габбро-норитовый комплекс; 10 – золотухинский габбро-перидотитовый комплекс; 11 – курская серия: метапесчаники, метаалевролиты; 12 – усманский мигматит-плагиогранитный комплекс; 13 – рождественский комплекс габбро-норит-перидотитовый; 14 – воронцовская серия (нижняя толща): ритмично переслаивающиеся метапесчаники с прослоями сланцев, реже метаалевролитов; 15 – верхняя толща: ритмично переслаивающиеся сланцы, метаалевролиты и метапесчаники (в основании толщи с прослоями углерод- и сульфидсодержащих сланцев); 16 – терригенно-туфогенная толща; 17-19 – лосевская серия: 17 – метадациты, метарьолиты; 18 – метавулканы, амфиболиты; 19 – михайловский метаморфический комплекс; 20 – сергиевский габбро-дунит-перидотитовый комплекс; 21 – александровская серия ортоамфиболитов; 22 – обоянский плутоно-метаморфический комплекс; 23-25 – разломы: 23 – трансрегиональные I порядка, 24 – региональные II порядка, 25 – прочие /

Fig. 1. Precambrian fundament geological map in the area of VPH-1 hole and A-B profile location:

1 – Shebekinsky gabbro-syenite complex; 2 – Pavlovsky granite-granosyenite complex; 3 – Voronezh Formation, metaeffusives of basic and medium composition; 4 – Stoilo-Nikolaevsky diorite-granodiorite complex; 5 – Artyushkovsky alkaline-syenite complex; 6 – Bobrovsky granite-plagiogranite complex; 7 – Novolsky gabbro-dolerite complex; 8 – Elan norite-diorite complex; 9 – Mamonsky peridotite-gabbro-norite complex; 10 – Zolotukhinsky gabbro-peridotite complex; 11 – Kursk series: metasandstones, metasiltstones; 12 – Usman migmatite-plagiogranite complex; 13 – Rozhdestvensky gabbro-norite-peridotite complex; 14 – Vorontsov series (lower strata): rhythmically interbedded metasandstones with interlayers of shales, less frequently metaaleurolites; 15 – upper strata: rhythmically interbedded shales, metaaleurolites and metasandstones, at the base of the strata with interlayers of carbon- and sulfide-bearing shales); 16 – terrigenous-tuffogenic strata; 17-19 – Losev series: 17 – metadacites, metaryolites; 18 – metavolcanites, amphibolites; 19 – Mikhailovsky metamorphic complex; 20 – Sergievsky gabbro-dunite-peridotite complex; 21 – Alexandrovsky series orthoamphibolites; 22 – Oboyansky plutono-metamorphic complex; 23-25 – faults: 23 – transregional I order; 24 – regional II order; 25 – other

Геотермические параметры: методы исследования и результаты

А. Региональный тепловой поток

В этой работе мы рассмотрели распределение всех геотермических параметров, описывающих тепловое поле земной коры в районе Воронежского кристаллического массива, и рассчитали глубинные температуры вдоль фрагмента регионального профиля 1-ЕВ в районе бурения глубокой параметрической скважины ВПС-1.

Воронежская параметрическая скважина пробурена в пределах Воронежского мегаблока, сложенного нижнепротерозойскими метатерригенными образованиями воронцовской серии, которые прорываются ультрамафит-мафитовыми интрузиями мамонского комплекса, а также биотитовыми и двуслюдяными гранитами бобровского комплекса. К востоку и юго-востоку от ВПС-1 расположен Калачевский грабен, выполненный толщей базальтов и андезитобазальтов с прослоями песчаников.

На ВКМ сделано относительно немного измерений теплового потока (табл.1), но все же они дают представление о термическом режиме этой структуры.

Таблица 1 / Table 1

**Распределение теплового потока на Воронежском кристаллическом массиве /
Heat flow distribution in Voronezh crystal massif**

№ п/п	В.д., ° longitude	С.ш., ° latitude	Высота, м Altitude, m	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	Тепловой поток, мВт/м ² Heat flow, mW/m ²
1	36,25	50,25	180		33
2	36,25	50,25	170	3,16	74
3	36,48	50,43	170	1,95	52
4	37,58	50,50	190	3,4	62
5	37,33	50,50	190	2,85	52
6	36,67	50,58	200	1,55	74
7	36,53	50,63	212		50
8	36,83	50,75	210		36
9	36,83	50,75	210	3,01	61
10	36,83	50,75	210		33
11	36,83	50,75	210		59
12	36,83	50,75	210	3,01	56
13	36,83	50,75	210		54
14	38,58	50,75	200	1,79	42
15	36,83	50,75	200		42
16	36,50	50,8	210	2,36	43
17	36,52	50,8	212	2,7	33
18	36,50	50,8	218		46
19	37,17	50,83	220	2,8	56
20	37,17	50,83	220	3,17	56
21	43,80	50,85	220		38
22	37,83	50,92	230		59
23	36,17	51,00	230		63
24	36,17	51,00	230		43
25	36,17	51,00	240	2,55	25
26	36,17	51,00	230		48
27	36,17	51,00	205		80
28	36,17	51,00	205		49
29	36,00	51,42	185	3,12	64
30	37,50	51,58	240	2,55	51
31	40,05	52,18	200		62
32	37,03	52,97	190	2,5	38

В северной и центральной частях ВКМ тепловой поток изменяется от 33 до 47 мВт/м², но на Яковлевском месторождении получены значения 56–59 мВт/м². Геотермический отряд ИФЗ РАН, получивший эти данные [Геотермические..., 1964], предполагал, что вариации связаны со структурным фактором, однако количественные оценки не были приведены. Повышение теплового потока до 60–65 мВт/м² зафиксировано в долине р. Сейм южнее Курска. Среднее значение теплового по-

тока на Воронежском выступе составляет 49 ± 4 мВт/м² (рис. 2). На южном склоне выступа, в сторону Днепровско–Донецкой впадины, тепловой поток повышается до 46–62 мВт/м². Повышение теплового потока здесь связывается с наличием разломов в фундаменте и контактом с палеозойской структурой Большого Донбасса. В самой Днепровско–Донецкой впадине и в Донбассе зафиксированы умеренные значения теплового потока – 40–50 мВт/м². Строение фундамента и осадочной толщи здесь мало влияет на распределение теплового потока. Не проявляются в тепловом поле погружение фундамента в юго-восточном направлении и перемещения отдельных блоков по разломам. На отдельных локальных структурах, приуроченных к соляным куполам или нефтегазоносным структурам, наблюдается повышение теплового потока до 55–65 мВт/м². Особенно заметное повышение потока отмечается в зонах пересечения глубинных разломов.

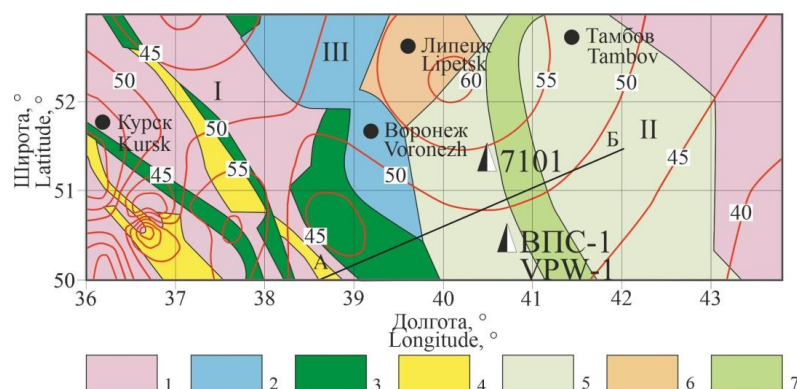


Рис. 2. Тектоническая схема Воронежского кристаллического массива и распределение теплового потока (красные изолинии, мВт/м²):

- 1 – раннеархейские мегаблоки; 2 – зона раннего карелия; 3 – структурные комплексы позднего архея; 4 – структурные комплексы раннего карелия; 5 – Воронцовский эпикратонный прогиб раннего карелия; 6 – Воронежско-Шукавская наложенная грабен-синклиналь; 7 – Калач-Эртильская наложенная структура (реактивизированный рифт). Римскими цифрами показаны мегаблоки: Курский (I), Воронежский (Хоперский) (II), Лосевский (III). Треугольники – положение Воронежской параметрической скважины ВПС-1 и скв. № 7101. Линией показано расположение профиля А-Б (см. рис. 1) /

Fig. 2. Tectonic pattern of the Voronezh crustal massif and heat flow distribution (red isolines, MW/m²): 1 – early Archean megablocks; 2 – early Karelian zone; 3 – structural complexes of the late Archean; 4 – structural complexes of the early Karelia; 5 – Vorontsov epicratonic trough of the early Karelia; 6 – Voronezh-Shukava superimposed graben syncline; 7 – Kalach-Ertel superimposed structure (reactivated rift). The following megablocks are shown in Roman numerals: Kursky (I), Voronezh (Khopersky) (II), Losevsky (III). Triangles are the holes location of VPH-1 and 7101. Line is the A-B profile location (see fig. 1)

При расчете глубинного фонового значения ТП следует количественно оценить наиболее значимые искажающие поверхностные факторы, среди которых влияние структурно-теплофизических неоднородностей геологического разреза на стабильных докембрийских платформах является решающим.

Б. Теплопроводность горных пород

Теплопроводность пород нами изучалась по образцам керна из скважины ВПС-1. Измерения проводились методом оптического сканирования на усовершенствованной установке ТС-14 [Никитин и др., 2016].

Таблица 2 / Table 2

**Результаты измерения теплопроводности образцов /
The thermal conductivity measurements results**

Отбор образцов по скважинам / Sampling by holes				Теплопроводность, Вт/(м·К) / Thermal conductivity, W/(m·K)				Описание пород / Rocks description
№ п/п	№ скважины Hole number	Глубина, м / Depth, m	№ образца / Sample number	Среднее / mean	мин. / min	макс. / max	Дисперсия / dispersion	
1	ВПС-1	150,87	2890	4,14	2,77	4,54	0,11	Диорит-порфирит кварцевый / Diorite-porphyrite quartz
2		250,84	4	3,67	2,67	3,74	0,04	„
3		309,73	292	3,10	2,53	4,05	0,07	„
4		451,74	407	3,50	2,73	4,73	0,24	„
5		500,09	653	3,75	2,23	3,13	0,03	„
6		650	944	2,57	2,43	3,49	0,05	Бiotит-рогово- обманковый диорит / Biotite-hornblende diorite
7		745,22	1354	2,95	2,38	3,45	0,04	„
8		850,84	1385-2	2,78	2,69	4,74	0,15	„
9		942,11	1848-2	3,38	2,39	3,32	0,04	„
10		1050,74	1894	2,83	3,17	4,39	0,06	„
11		1145,29	2366	3,68	3,17	5,00	0,09	„
12		1252,19	2382	3,67	2,48	3,19	0,02	„
13		1347,99	2762	2,85	2,65	3,44	0,02	„
14		1412	2773-2	3,05	3,39	5,69	0,17	Бiotитовый горнблен- дит / Biotite hornblendite
15		1600,69	3125	4,79	3,64	6,97	0,47	Метапесчаник, метаа- левролит / Metasandstone, metalevelite
16		1635,91	3213	3,30	2,84	3,88	0,05	Бiotит-роговообманко- вый диорит / Biotite-hornblende diorite
17		1720	3214	3,48	3,01	4,37	0,07	„
18		1802,67	3391	3,45	2,15	4,93	3,45	Сланцы / Shale
19		1869,91	3532	3,89	3,47	4,58	0,07	„
20		1978	3558	3,79	2,89	5,04	0,26	Метапесчаник, метаа- левролит / Metasandstone, metalevelite
21		2045,53	3772	4,44	3,42	6,29	0,39	„
22		2147,53	3784	3,92	2,90	5,96	0,50	„
23		2147,96	3785	3,63	3,31	3,95	0,03	„
24		2249,97	4100	1,80	1,67	1,96	1,67	„
25		2350	4101	3,57	3,02	4,21	0,05	Сланцы / Shale
26		2403,14	4359	4,47	3,86	5,58	0,09	„
27		2449,69	4553	3,85	3,48	4,21	0,03	„
28		2551,44	4559	4,21	3,52	5,27	0,15	„
29		2650,26	4915	4,81	3,91	6,07	0,21	Метапесчаник, метаа- левролит, переслаивание со сланцами
30		2700,1	5091	5,00	4,13	6,66	0,19	Metasandstone, metasiltstone, interbedded with shale
31		2751,88	5348	4,58	2,27	5,88	0,73	„
32		2850,37	5900-1	4,04	3,22	5,07	0,23	„
33		2948,26	6231	2,95	2,61	3,42	0,02	„
34		3000,41	6405	3,05	2,18	4,16	0,29	„
35		3002,06	6416	2,55	1,95	3,70	0,19	„
36		3003,03	6422	2,90	2,38	3,38	0,07	„

В таблице 2 приведены результаты изучения теплопроводности. Визуально заметно увеличение теплопроводности в интервале глубин 800–2800 м. Однако, статистически значимой корреляции этих параметров мы не установили. Очевидно, что вариации значений теплопроводности образцов обуславливаются микровключениями и микротрещиноватостью, о чем свидетельствуют скан-граммы теплопроводности (рис. 3).

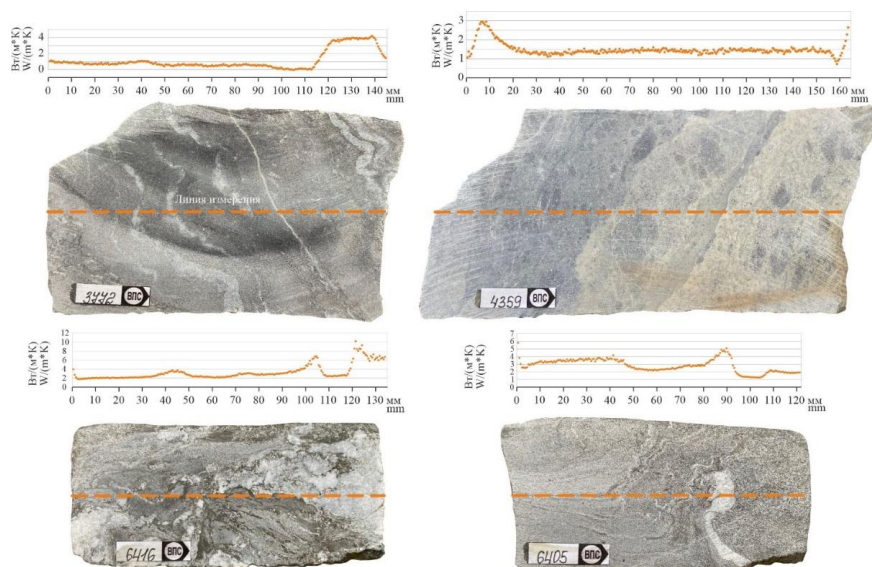


Рис. 3. Результаты оптического сканирования теплопроводности /

Fig. 3. The thermal conductivity optic-scan results

Анализ изучения теплофизических свойств показал, что, несмотря на разные типы горных пород, вскрытых скважиной, статистически значимого различия средних значений в группах пород не наблюдается. Большинство измерений находилось в диапазоне от 2,8 до 3,8 Вт/(м·К) (рис. 4) и фиксировалось как для диоритов и порфиритов, так и для метапесчаников и сланцев.

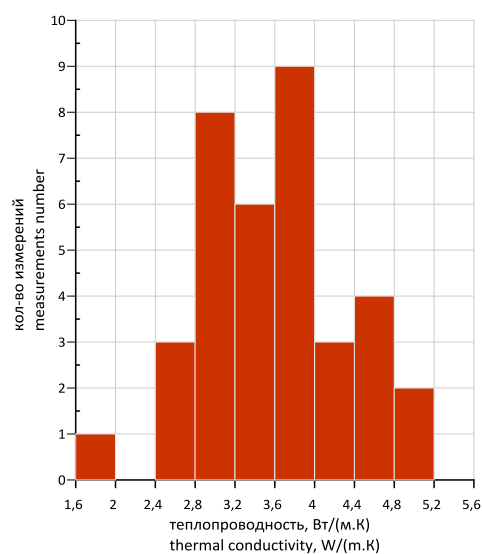


Рис. 4. Гистограмма распределения теплопроводности пород из скважины ВПС-1 /

Fig. 4. The histograms of thermal conductivity distribution from VPH-1 hole

В. Структура теплового потока

Среди архей–протерозойских структур восточного полушария наиболее полно исследованы параметры и компоненты теплового поля Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Детальный анализ радиогенной теплогенерации в отдельных слоях земной коры и в разных структурно-формационных зонах платформы приведен в монографии [Боганик, 1975]. В дальнейшем, некоторые аналитические данные и расчеты были уточнены [Кутас, 1978; Смыслов и др., 1979; Сальников, 1984], что привело даже к изменению идеологии оценки роли корового и мантийного тепла. Так, по данным Н.С. Боганика [1975], на платформе выделяются некоторые области, где наблюдаемый тепловой поток полностью обеспечивается радиогенной теплогенерацией (восточная часть Балтийского щита, Воронежский кристаллический массив, Украинский щит, западная и центральная части Прикаспийской впадины). В большинстве же структур платформы, по его мнению, соотношение корового и «подкорового» тепловых потоков составляет 9:1. Лишь на периферии платформы, вблизи более молодых тектонических структур Карпат, Кавказа и Урала, доля тепла, поступающего к подошве земной коры, увеличивалась до 20%.

«Изменение идеологии» оценки роли коровой и мантийной компонент теплового потока было обусловлено появлением более точных и многочисленных измерений теплового потока на ВЕП, а также совершенствованием аналитической базы для определения концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в образцах керн [Смыслов и др., 1979]. По данным А.А. Смыслова и У.И. Моисеенко, из мантии поступает 30–40% наблюдаемого на поверхности теплового потока, а в Московской синеклизе (данные по скважинам вблизи г. Данилов и г. Солигалич) – 40–45%. Эти оценки уже сопоставимы с теми, которые приводятся для других древних платформ [Pinet et al., 1991; Rudnick, Fountain, 1995; Rudnick et al., 1998; McLennan, Taylor, 1996; Perry et al., 2006].

К сожалению, авторы работ по структуре теплового потока на ВЕП не обсуждают реальные модели вертикального распределения теплогенерации, категорически заявляя, что «...распределение радиоактивных элементов в породах архея, протерозоя, палеозоя и мезо–кайнозоя (*авторское написание*) не подчиняется экспоненциальному закону, причем протерозойский комплекс пород выделяется наиболее высокими содержаниями их. В пределах больших стратиграфических интервалов распределение радиоактивных элементов обуславливается главным образом литологическим составом пород» [Боганик, 1975, с. 35]. Однако там же, приводя данные о радиогенной теплогенерации в карбонатах стратиграфических комплексов ВЕП, указывается на то, что в четвертичных отложениях, да и в среднем для кайнозоя, теплогенерация ($A_{\text{рад.}}$) составляет 1,34 мкВт/м³, а в ордовик–силурийских – 0,44 мкВт/м³.

Уменьшение теплогенерации с глубиной всё же дает основание предположить экспоненциальный характер ее убывания. Учитывая, что параметр D в экспоненциальной модели численно равен глубине, на которой теплогенерация убывает в « e » (2,718) раз, рассчитаем, что на глубине D теплогенерация равна 0,49 мкВт/м³, т.е. глубина D примерно совпадает с кровлей ордовикских отложений, которая в центральной части ВЕП (Московская синеклиза, Абдулино–Серноводская впадина) находится на глубине 4,0–4,5 км.

Таким образом, толщина слоя активной теплогенерации (D), практически, совпадает в структурах Канадского щита, где она оценена по измерениям теплоге-

нерации в метаморфических породах амфиболитовой и гранулитовой фаций, и на ВЕП – по оценкам в карбонатных породах осадочного чехла. Это лишний раз доказывает высказанное довольно давно мнение [Jaupart et al., 1981; Jaupart, Mareschal, 2003], что параметр D устойчив для провинции теплового потока даже в случае дифференцированной эрозии. Объекты, расположенные на выступе фундамента и на поверхности осадочного чехла в пределах одной провинции теплового потока, будут различаться лишь величиной поверхностной теплогенерации.

Для расчета радиогенной компоненты теплового потока нами были проанализированы содержания долгоживущих изотопов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K , которые дают основной вклад в радиогенную теплогенерацию в земной коре (табл. 3). Анализ порошковых проб был выполнен рентгеноспектральным флуоресцентным методом на рентгеновском вакуумном спектрометре в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН¹. Пробы пород были отобраны из керна скважины № 7101, расположенной в 135 км юго-восточнее г. Воронеж (см. рис. 2). Скважина вскрыла толщу роговообманковых габбро и габброноритов Хоперского комплекса среднего протерозоя, поэтому априорно не ожидалось высокие значения радиогенной теплогенерации.

Таблица 3 / Table 3

**Определение концентрации радионуклидов и теплогенерации керна из скв. № 7101 /
Radionuclide concentration determination and rocks heat production from VPH-1 hole**

№ п/п	Глубина (м) / Depth, m	^{238}U / (г/т)	^{232}Th (г/т) / ^{232}Th (g/t)	^{40}K (%)	$A_{\text{рад.}}$ (мкВт/м³) / $A_{\text{рад.}}$ (μW/m³)
1	226,40	0,49	1,60	1,20	0,39
2	412,20	1,38	4,30	1,20	0,62
3	445,40	1,35	4,90	1,20	0,66
4	520,80	3,64	8,90	2,40	1,33
5	541,20	1,34	4,80	1,40	0,69
6	556,30	1,73	5,50	1,70	0,83
7	574,50	0,71	1,90	1,20	0,43
8	599,50	0,61	1,40	1,20	0,39
9	618,50	0,33	1,60	1,20	0,38
10	650,60	1,61	2,90	1,40	0,60
11	660,90	0,72	5,30	0,70	0,52
12	689,80	3,81	8,30	3,00	1,44
13	867,40	0,64	1,00	1,20	0,37
14	871,60	0,73	2,90	1,50	0,55
15	874,00	0,62	2,30	1,20	0,45
16	877,80	0,93	2,00	1,30	0,47
17	887,00	0,44	2,10	1,40	0,46
18	894,60	0,38	3,80	2,20	0,73
19	912,60	0,92	2,70	1,20	0,49
20	947,40	0,94	5,10	0,60	0,50
21	997,00	2,74	6,40	3,10	1,27
22	999,60	1,07	2,70	1,20	0,50
23	1015,30	0,47	2,60	1,30	0,47
24	1020,00	1,30	5,10	1,10	0,64
25	1064,20	1,36	4,30	1,80	0,75
26	1078,50	0,32	1,00	1,20	0,35
27	1095,00	0,52	1,00	1,30	0,38
28	1106,60	0,25	1,60	1,20	0,38
29	1128,30	1,34	3,30	1,50	0,63
30	1193,00	0,79	10,20	1,20	0,92

¹ Аналитики: С.М. Ляпунов и Е.П. Шевченко.

Рассчитанная на относительно небольшом интервале глубин 200–1200 м теплогенерация не позволяет судить о типе зависимости теплогенерации от глубины. Можно в первом приближении считать, что в этом диапазоне глубин существует средняя теплогенерация $0,62 \text{ мкВт/м}^3$ (рис. 5).

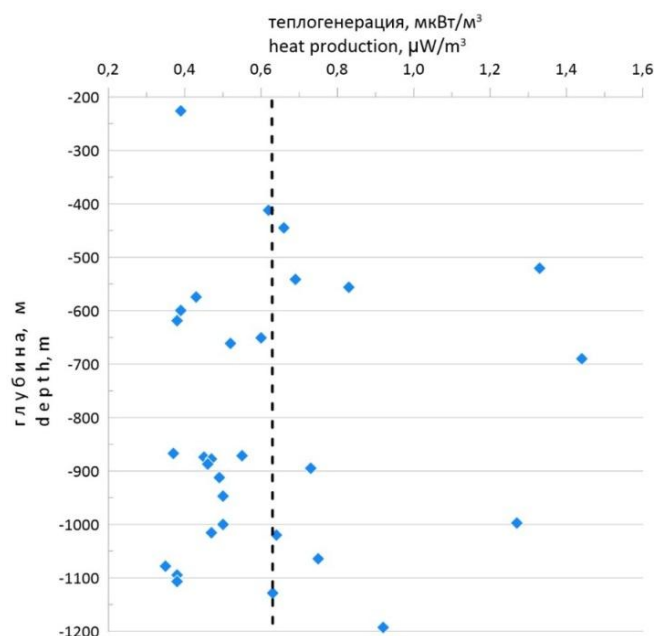


Рис. 5. Распределение теплогенерации по глубине скважины № 7101

Пунктирная линия – среднее значение A_{rad} .

Fig. 5. The heat production distribution along the depth of N7101 hole

The dotted line is the average value of A_{rad} .

Расчеты показали, что на ВКМ радиогенное тепло, продуцируемое в чехле, в наблюдаемом ТП обеспечивает только $3,7\text{--}5,0 \text{ мВт/м}^2$. В фундаменте массива генерируется $20\text{--}22 \text{ мВт/м}^2$. Таким образом, полный радиогенный тепловой поток здесь составляет $24\text{--}27 \text{ мВт/м}^2$, или 50% от значения фонового среднего ТП, который для ВКМ оценивается величиной 49 мВт/м^2 .

Г. 2D-температурное моделирование по профилю А-Б

Для решения задачи о распределении температур в разрезе используется численный метод конечных элементов с квадратичной аппроксимацией функции температуры между узлами прямоугольной сетки. В программе предусматривается сетка 41×41 узел (т.е. решается двухмерная задача), линейные размеры узла по осям X и Z возможно изменять по требованию оператора². Внутри области моделирования задается конфигурация контрастных сред и их теплофизические свойства: температуропроводность $\alpha (\text{м}^2/\text{с})$, теплопроводность $k (\text{Вт}/(\text{м} \times \text{К}))$ и нормированная плотность тепловых источников $Q/(c \times r) (\text{К}/\text{с})$. В расчетной части комплекса задаются линейные размеры области моделирования (L_x и L_z , в км), которые определяют линейные размеры узла ($L_x/41$ и $L_z/41$), а также временной интервал дискретизации решения (в млн лет). Временной шаг итерационного процесса автоматиче-

² Температурное поле вдоль профиля рассчитывалось с помощью программы для нестационарного моделирования теплового поля «TERMGRAF» [Хуторской, 1996].

ски выбирается программой и рассчитывается как $t=10^{-7} \times (Z^2/4a)$, где Z – толщина области моделирования.

В результате решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов:

$$(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + A(x, z) = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где k , c , ρ – соответственно, теплопроводность, теплоемкость и плотность слоев литосферы, $A(x, z)$ – плотность источников тепла в слое, t – время, мы получаем распределение температур и тепловых потоков $q(z)$ и $q(x)$ для принятой теплофизической среды в конечный момент временного этапа дискретизации. Полученный файл результатов переименовывается в файл начальных температур, и на следующем этапе начинается расчет с конечного момента предыдущего этапа. Таким образом, решение не прерывается, а просто делается «фотография» состояния системы расчетов в конечный момент временного шага. Возможность дискретизации решения удобна, если необходимо изменить теплофизическую среду в связи со структурно-вещественными перестройками геологического разреза, задать распределение новых источников и стоков тепла, а также просмотреть результаты расчета палеотемпературного поля. Если в модели требуется задать тепломассоперенос, то его можно имитировать установкой граничных температур и/или адиабатического градиента в интервале глубин, на которые распространяется конвекция.

Для каждого профиля при моделировании задается значение краевой температуры на верхней границе (как правило, на подошве гелиотермозоны) в соответствии с метеорологическими данными, и редуцированный тепловой поток – на нижней границе ($q_{ред.}$), соответствующий его измерениям в ближайших скважинах ($q_{набл.}$) за вычетом теплового потока, генерируемого в вышележащем слое земной коры при спонтанном распаде долгоживущих радиоизотопов (q_p), т.е. $q_{ред.} = q_{набл.} - q_p$.

Радиогенный тепловой поток (q_p) рассчитывается на основании сейсмической информации о мощности слоя (z_i) и его составе, а также на основе расчета этой величины из аналитически определенных концентраций содержания долгоживущих радионуклидов: ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K . $(q_p)_i = A(x, z) \cdot z_i$ [Roy et al., 1968].

Точность расчетов оценивается в данном случае, по совпадению модельного и измеренного в скважинах теплового потока. Метод наименьших квадратов, примененный для оценки погрешности определения глубины нахождения изотерм, показал, что она составляет 0,5–0,6%, т.е. при средней глубине расчета температур 3 км относительная погрешность составит ± 15 –20 м.

При расчете теплового потока по профилю А-Б были заданы следующие граничные условия: на верхней границе поддерживалась температура 6 °С – это среднегодовая температура на подошве гелиотермозоны в районе Воронежа; на нижней границе (глубина 3 км) задавался редуцированный тепловой поток (20 мВт/м²), который был нами определен в этом исследовании. Незначительный контраст теплопроводности структурных комплексов данного разреза обусловил слабые вариации теплового потока (рис. 6). Вдоль профиля на расстоянии 280 км его значения укладываются в диапазон 47–52 мВт/м².

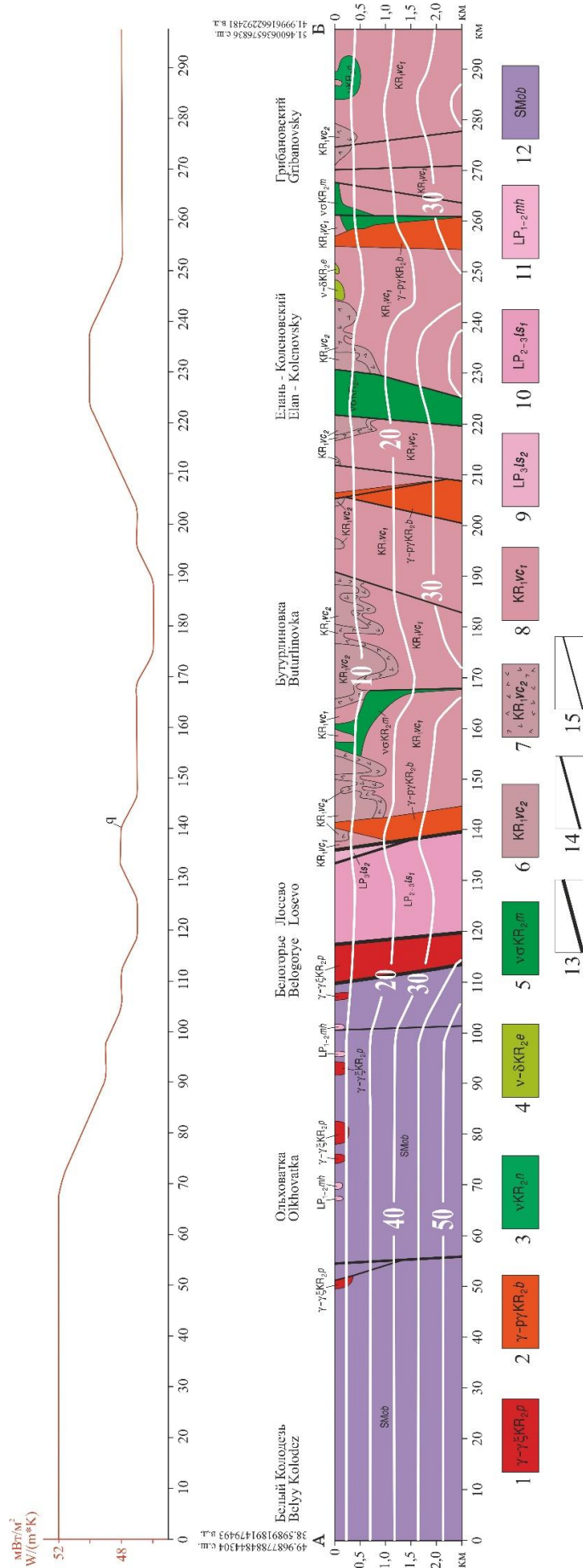


Рис. 6. 2D-температурная модель (изотермы, $^{\circ}\text{C}$) (внизу) и профиль теплового потока (q , mW/m^2) (вверху) по линии А-В (условные обозначения – см. рис. 1) / Fig. 6. 2D-temperature pattern and heat flow profile (q , mW/m^2) along A-B line

Заключение

Мы рассмотрели особенности распределения теплового потока и глубинных температур в пределах Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Результаты этого анализа позволяют сделать главный вывод о том, что сходная история геологического развития и времени становления архей-протерозойского фундамента разных частей ВКМ объясняют стабильность геотермического режима и однородность значений теплового потока. Средняя величина ТП составляет 49 ± 4 мВт/м².

Но существует в каждом сегменте более дробная дифференциация теплового потока – вариации «второго порядка», обусловленные структурно-теплофизическими неоднородностями. Они связаны с проявлениями трещиноватости, микро- и макровключениями в породы фундамента и хорошо заметны при оптическом сканировании теплопроводности практически каждого образца керна.

Комплексный анализ всех компонентов, определяющих геотермическое поле, позволяет наиболее корректно определить фоновый тепловой поток в регионе и оценить возможности использования глубинного тепла в качестве альтернативного источника энергии.

Литература

1. Боганик Н.С. Радиогенное тепло земной коры Русской платформы и ее складчатого обрамления. М.: Наука, 1975. – 159 с.
2. Геотермические исследования. / Отв. редактор Е.А. Любимова. М.: Наука, 1964. – 175 с.
3. Глубинный тепловой поток Европейской части СССР. / Отв. редакторы С.И. Субботин, Р.И. Кутас. Киев: Наукова думка, 1974. – 190 с.
4. Кременецкий А.А., Скрябин В.Ю., Терентьев Р.А. и др. Воронежская параметрическая скважина – новый этап познания глубинного строения ВКМ. // Разведка и охрана недр. – 2006. – №9-10. – С. 109–117.
5. Кутас Р.И. Поле тепловых потоков и термическая модель земной коры. Киев: Наукова думка, 1978. – 148 с.
6. Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Никитин А.С. Бесконтактные измерения теплофизических свойств горных пород на установке ТС14. // Процессы в геосредах. – 2016. – Т. 7. № 3. – С. 246–254.
7. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. Связь глубинного теплового потока с тектоническим строением континентов. // Геотектоника. – 1968. – № 4. – С. 3–19.
8. Сальников В.Е. Геотермический режим Южного Урала. М.: Наука, 1984. – 89 с.
9. Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.З. Тепловой режим и радиоактивность Земли. Л.: Недра, 1979. – 191 с.
10. Тепловой режим недр СССР. / Под редакцией Ф.А. Макаренко, Б.Г. Поляка. М.: Наука, 1970. – 224 с.
11. Хуторской М.Д., Гнатусь Н.А., Демежко Д.Ю. и др. Геотермия: XX-XXI век. // Труды геологического института. – 2023. – Т. 636. – С. 7–435.
12. Jaupart C., Sclater J.G., Simmons G. Heat flow studies: constraints on the distribution of uranium, thorium and potassium in the continental crust. // Earth and Planetary Science Letters. – 1981. – Vol. 52. – pp. 328–344.
13. Jaupart C., Mareschal J.-C. Constraints on Crustal Heat Production from Heat Flow Data. // Treatise on Geochemistry. – 2003. – Vol. 3. – pp. 65–84.
14. McLennan S.M., Taylor S.R. Heat flow and the chemical composition of continental crust. // Journal of Geology. – 1996. – Vol. 104. No. 4. – pp. 369–377.

15. Perry H., Jaupart C., Mareshal J.C., Bienfait G. Crustal heat production in the Superior Province, Canadian Shild, and in North America inferred from heat flow data. // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2006. – Vol. 111. Issue B4. – pp. 893–903.
16. Pinet C., Jaupart C., Mareshal J.C. et al. Heat flow and structure of the lithosphere in the Eastern Canadian shild. // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 1991. – Vol. 96. – pp. 19941–19963.
17. Roy R.F., Blackwell D.D., Birch F. Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1968. – Vol. 5. – pp. 1–12.
18. Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. // *Reviews of Geophysics*. – 1995. – V. 33. No. 3. – pp. 267–309.
19. Rudnick R.L., McDonough W.F., O'Connell R.J. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. // *Chemical Geology*. – 1998. – Vol. 145. – pp. 395–411.

References

1. Boganik N.S. Radiogenic heat of the Russian Platform Earth's crust and its folded frame. Moscow. Nauka. 1975. 159 p. (In Russ.)
2. Geothermal studies. Ed. E.A. Lyubimova. Moscow. Nauka. 1964. 175 p. (In Russ.)
3. Terrestrial heat flow of the European part of the USSR. Eds. S.I. Subbotin, R.I. Kutas. Kiev. Naukova Dumka. 1974. 190 p. (In Russ.)
4. Kremenetsky A.A., Skryabin V.Yu., Terentyev R.A. et al. Voronezh parametric well – a new stage of knowledge of the VCM deep structure. Exploration and protection of subsoil. 2006. Nos. 9-10. pp. 109–117. (In Russ.)
5. Kutas R.I. Heat flow field and thermal model of the Earth's crust. Kiev. Naukova Dumka. 1978. 148 p. (In Russ.)
6. Nikitin D.S., Khutorskoy M.D., Nikitin A.S. Non-contact thermal-physical properties measurements of rocks on TC14 device. Processes in geospheres. 2016. Vol. 7. No. 3. pp. 246–254. (In Russ.)
7. Polyak B.G., Smirnov Y.B. Relationship of the deep heat flow with the continents tectonic structure. *Geotectonics*. 1968. No. 4. pp. 3–19. (In Russ.)
8. Salnikov V.E. Geothermal regime of the Southern Urals. Moscow. Nauka. 1984. 89 p. (In Russ.)
9. Smyslov A.A., Moiseenko U.I., Chadovich T.Z. Thermal regime and radioactivity of the Earth. Leningrad. Nedra. 1979. 191 p. (In Russ.)
10. Thermal regime of the subsurface of the USSR. Eds. F.A. Makarenko, B.G. Polyak. Moscow. Nauka. 1970. 224 p. (In Russ.)
11. Khutorskoy M.D., Gnatus N.A., Demezhko D.Yu. et al. Geothermics: XX-XXI century. Proceedings of the Geological Institute. 2023. Vol. 636. pp. 7–435. (In Russ.)
12. Jaupart C., Selater J.G., Simmons G. Heat flow studies: constraints on the distribution of uranium, thorium and potassium in the continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*. 1981. Vol. 52. pp. 328–344.
13. Jaupart C., Mareschal J.-C. Constraints on Crustal Heat Production from Heat Flow Data. *Treatise on Geochemistry*. 2023. Vol. 3. pp. 65–84.
14. McLennan S.M., Taylor S.R. Heat flow and the chemical composition of continental crust. *Journal of Geology*. 1996. Vol. 104. No. 4. pp. 377–396.
15. Perry H., Jaupart C., Mareshal J.C., Bienfait G. Crustal heat production in the Superior Province, Canadian Shild, and in North America inferred from heat flow data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2006. Vol. 111. Issue B4. pp. 893–903.
16. Pinet C., Jaupart C., Mareshal J.C. et al. Heat flow and structure of the lithosphere in the Eastern Canadian shild. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1991. Vol. 96. pp. 19941–19963.

17. Roy R.F., Blackwell D.D., Birch F. Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. *Earth and Planetary Science Letters*. 1968. Vol. 5. pp. 1–12.
18. Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*. 1995. V. 33. No. 3. pp. 267–309.
19. Rudnick R.L., McDonough W.F., O’Connell R.J. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. *Chemical Geology*. 1998. Vol. 145. pp. 395–411.