

Тепловой режим земной коры в зоне перехода от Балтийского щита к Баренцевоморской плите

В. Н. Глазнев^{1, 2✉}, Н. Е. Козлов², Н. О. Сорохтин^{2, 3},
В. И. Жаворонкин¹, М. А. Агаркова¹

¹Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация
²Геологический институт Кольского научного центра РАН,
ул. Ферсмана, 14, 184209, Апатиты, Российская Федерация
³Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН,
Нахимовский просп., 36, 117997, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение: Рассматриваются проблемы изучения термического режима земной коры в зоне перехода от Балтийского щита к Баренцевоморской плите. Выполненный анализ опирается на результаты температурных измерений в глубокой скважине П-1, пробуренной на перешейке между полуостровами Средний и Рыбачий, данных о естественной радиоактивности вскрытых ею пород и их теплопроводности.

Методика: Приведены общие сведения о строении верхней части земной коры в районе бурения скважины по материалам геологических и сейсмических исследований. Дано краткое описание комплекса геофизических исследований и геолого-технологических испытаний по стволу скважины П-1 с акцентом на результаты полевых температурных измерений в скважине. Выполнены лабораторные измерения теплопроводности образцов керна по скважине П-1, которые демонстрируют некоторые различия между терригенными породами рифея и архейскими кристаллическими породами. Даны обобщённые результаты определения концентрации радиогенных элементов в породах керна скважины, показывающие значимую дифференциацию терригенных пород рифея и кристаллических пород архея.

Результаты и обсуждение: По данным комплексных исследований показана незначительная роль гидрогеологического режима в возмущении температурного поля по скважине. Методом Хорнера рассчитаны невозмущённые температуры на забоях буровых интервалов скважины и приведена оценка геотермического градиента для глубоких архейских горизонтов разреза, где величина теплового потока оценивается в 32 мВт/м². Для рифейского терригенного комплекса разреза скважины П-1 величина невозмущённого теплового потока оценивается в 20 мВт/м², что свидетельствует о влиянии приповерхностной температуры в период последнего оледенения. Рассчитанные по данным о содержании радиогенных элементов величины теплогенерации пород позволили оценить полную величину невозмущённого поверхностного теплового потока в районе скважины П-1 на уровне примерно 34 мВт/м².

Выводы: Сформулированы основные результаты исследования совокупности характеристик теплового режима земной коры в зоне перехода от Балтийского щита к Баренцевоморской плите.

Ключевые слова: температурный режим, теплофизические свойства, тепловой поток, Балтийский щит, Баренцевоморская плита.

Источник финансирования: грант РФФИ № 20-05-00190



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Глазнев Виктор Николаевич, e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

Для цитирования: Глазнев В.Н., Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Жаворонкин В.И., Агаркова М.А. Тепловой режим земной коры в зоне перехода от Балтийского щита к Баренцевоморской плите // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2022. №3. С. 76–88. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/76-88>

Введение

Изучение теплового режима верхней части континентальной земной коры имеет большое значение при создании интегральных геофизических моделей коры, глубинной интерпретации геофизических данных и построении содержательных геологических моделей изучаемой среды. Для территории севера Балтийского щита и области перехода от щита к Баренцевоморской платформе в последние три десятилетия получены обширные новые результаты измерений поверхностного теплового потока и теплофизических свойств пород коры [1–5], которые позволили построить обобщённые двухмерные и трёхмерные термические модели литосферы региона, базирующиеся на результатах комплексной интерпретации геофизических данных [6–11]. Однако, в этих построениях собственно зона перехода от Балтийского щита к Баренцевоморской платформе, представляющая собой достаточно сложную область, как в тектоническом, так и в геологическом отношении [12–15], детально не изучалась геотермическими методами. Подобные исследования стали возможны только после проходки глубокой скважины П-1 [16], расположенной на пере-

шейке между полуостровами Средний и Рыбачий (рис. 1) и вскрывшей мощную толщу рифейских пород Баренцевоморского шельфа, залегающих на архейских кристаллических породах северо-востока Балтийского щита.

В рамках данного исследования рассматриваются результаты температурных измерений по стволу скважины П-1 и результаты лабораторных петрофизических исследований теплопроводности образцов керна рифейских и архейских пород верхней коры в области сочленения Балтийского щита и Баренцевоморской платформы. Кроме того, по данным гамма-спектрометрии образцов керна определены значения теплогенерации типичных пород, вскрытых скважиной. На основе совокупности всех геотермических материалов дана оценка величины теплового потока по стволу скважины и определены возможные вариации потока по вертикали. Полученные новые данные о термическом режиме земной коры региона исследований позволят в дальнейшем обратиться к созданию более детальных тепловых моделей литосферы в зоне перехода от Балтийского щита к Баренцевоморской платформе.

Геолого-геофизическая характеристика района

Бурение параметрической скважины П-1 первоначально было нацелено на обнаружение месторождения углеводородов в рифейских терригенных отложениях полуостровов Средний и Рыбачий (рис. 1). Расположение скважины задавалось по данным интерпретации сейсмических работ МОВ ОГТ [17], в результате которых было выдвинуто предположение о

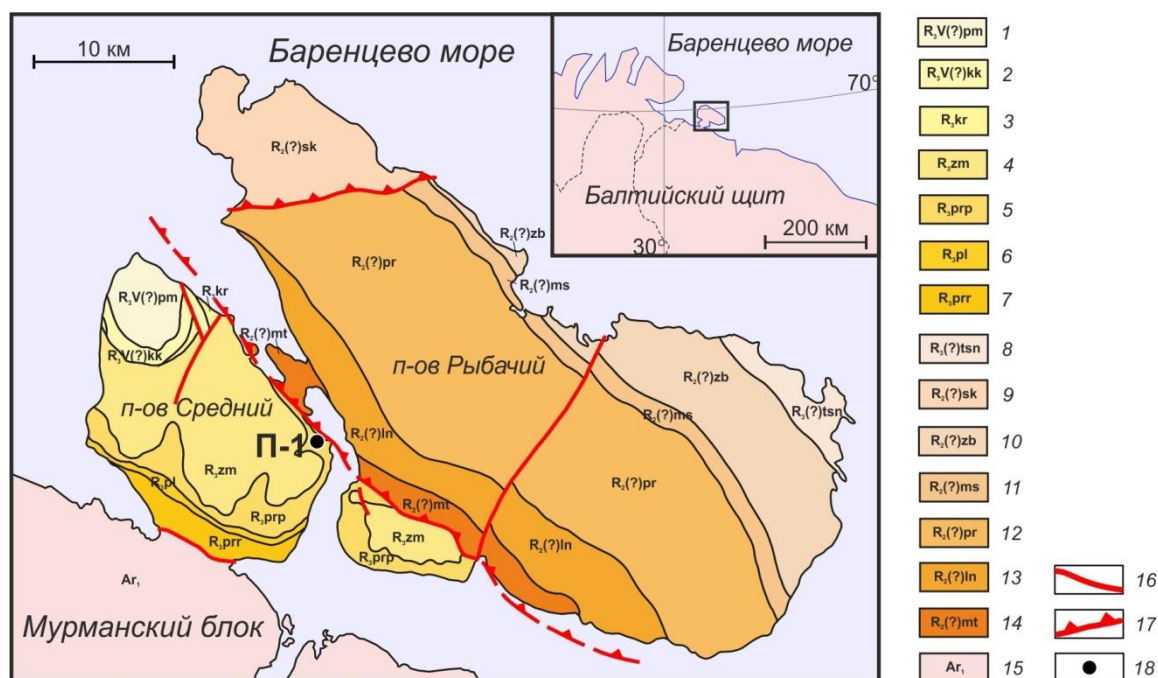


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района исследований по [16]. Условные обозначения. Волоковская серия: 1 – пуманская свита; 2 – куюканская свита. Кильдинская серия: 3 – каруярвинская свита; 4 – землепахтинская свита; 5 – поропелонская свита; 6 – палвинская свита; 7 – прярярвинская свита. Баргоутная серия: 8 – ципнаволоцкая свита; 9 – скарбеевская свита; 10 – зубовская свита; 11 – майская свита. Эйновская серия: 12 – перевальная свита; 13 – лонская свита; 14 – мотовская свита. 15 – нерасчленённый комплекс тоналит-гранодиоритов архея. 16 – разломы; 17 – тектонические надвижки; 18 – скважина П-1.

[Fig. 1. Schematic geological map of the research area according to [16]. Legend. Volokovaya Series: (1) – Pumanskaya Suite; (2) – Kuyakanskaya Suite. Kildinskaya Series: (3) – Karujarvinskaya Suite; (4) – Zemlyapakhtenskaya Suite; (5) – Poropelonskaya Suite; (6) – Palva Suite; (7) – Pärjarvinskaya Suite. Bargout Series: (8) – Tsiptavolok Suite; (9) – Skarbeyevskaya Suite; (10) – Zubovskaya Suite; (11) – Maysky Suite. Einovskaya Series: (12) – Perevalnaya Suite; (13) – Lonskaya Suite; (14) – Motovskaya Suite. (15) – is an undivided complex of tonalite-granodiorites of the Archean. (16) – faults; (17) – tectonic overhangs; (18) – well P-1.]

наличия на глубине 1700–1800 м антиклинальной структуры в рифейском чехле с размерами в плане до 3 км и амплитудой поднятия в центре до 150 метров. В процессе проходки скважины было установлено, что мощность терригенных рифейских пород составляет около 1090 м, а сейсмические аномалии типа «антиклинальная структура» обусловлены силлом долеритов мощностью около 20 м, залегающим в архейских породах фундамента. Отметим, что природа подобных ошибочных трактовок материалов МОВ ОГТ, детально рассмотренная в [18], во многом связана с неучётом авторами сейсмической интерпретации [17], реальных физических свойств пород по территории исследований. Тем не менее, проходка скважины П-1 была продолжена до глубины 5200 м, поскольку данные газового каротажа позволяли предполагать наличие углеводородов в трещиноватых кристаллических породах архея [16].

В районе исследований архейский кристаллический фундамент Мурманского блока (рис. 1) представлен гранитогнейсами, тоналитами и гранодиоритами [14, 15, 19], суммарная мощность которых составляет около 10–12 км [10, 20]. В зоне перехода к Баренцево-морской плите архейский кристаллический фундамент перекрыт рифейскими терригенными породами, мощность которых, по результатам геофизической интерпретации [10, 16], закономерно возрастает от нуля, в области перешейка между п-овом Средний и Кольским п-овом, до 4–6 км в области северо-восточного побережья п-ова Рыбачий.

Терригенно-осадочный комплекс п-ова Средний (рис. 1) представлен вендскими и верхнерифейскими отложениями: полимиктовыми и кварцевыми псефитами и гравелитами; разнородными псаммитами, алевролитами и пелитами; в меньшей мере доломитами, мергелями, обломочными фосфоритами [16]. Среднерифейские отложения активного континентального склона п-ова Рыбачий (рис. 1) сложены однородным комплексом терригенных осадков от псефитов до гравелитов, с тенденцией уменьшения доли грубообломочных пород снизу вверх по разрезу, частично обогащённых доломитами, мергелями, обломочными фосфоритами [16].

Контакт между верхнерифейским комплексом п-ова Средний и архейскими породами Мурманского блока – тектонический. Контакт между комплексами п-овов Средний и Рыбачий (рис. 1) по современным представлениям [16] является тектоническим надвигом.

Геотермические исследования в скважине

Проходка скважины П-1 осуществлялась отдельными этапами с июня 2004 г. по ноябрь 2006 г. В перерывах между ними в пройденных интервалах разреза выполнялись комплексные геофизические исследования в стволе скважины. Комплекс ГИС, проводившийся специалистами ЗАО «Поморнефтегазгеофизика» и ОАО НПЦ «Тверьгеофизика», включал в себя: инклинометрию, профилометрию, гамма-каротаж, нейтронный гамма-каротаж, нейтрон-нейтронный каротаж, гамма-гамма-плотностной каротаж, индукционный каротаж, широкополосный акустический каротаж, каротаж потенциала самополяризации, боковой каротаж и термометрию. Помимо ГИС в скважине проводился широкий комплекс геолого-технологических исследований, среди которых необходимо выделить определение плотности промывочной жидкости и её температуры на входе в ствол скважины и выходе из него в процессе проходки отдельных интервалов разреза.

Собственно термометрия пройденных интервалов по стволу (этапов бурения) выполнялась прибором ТЭГ-60 по стандартной методике при первом спуске прибора в скважину на малой скорости. Измерения температуры в скважине проводились почти сразу после завершения соответствующего этапа бурения, что отвечает условиям неустановившегося температурного режима. Приведённые на рис. 2 термограммы имеют специфический вид с характерным повышением (или понижением) температуры к забое изученного бурового интервала.

В целом, результаты полевых температурных измерений по стволу скважины характеризуют её неустановившийся термический режим с максимальной температурой пород на забое скважины примерно равной 68 С. Такая величина соответствует среднему температурному градиенту около 1.3 С на каждые 100 м углубления скважины, что достаточно близко к значениям среднего температурного градиента, установленного в глубоких скважинах региона: Кольской СГ-3 на Печенгской структуре [4, 21] и скважине С-1 на западе Кейвской структуры [22].

Изучение теплофизических свойств пород

В процессе бурения скважины П-1 эпизодически проводился отбор керна пород, характеризующих наиболее представительные интервалы разреза, детальное описание которого приведено в монографии [16]. В рамках нашего исследования выполнено изучение теплопроводности рифейских и архейских пород разреза скважины на образцах, изготовленных в виде пластин толщиной 1.5–2.5 см ориентированных по нормали к оси керна [23]. Для измерения теплопроводности использовался прибор ИТС-1, который был откалиброван на эталонах с известными значениями теплопроводности в диапазоне реально ожидаемых значений изменяемых величин. Для каждого образца, после насыщения водой, выполнялся цикл

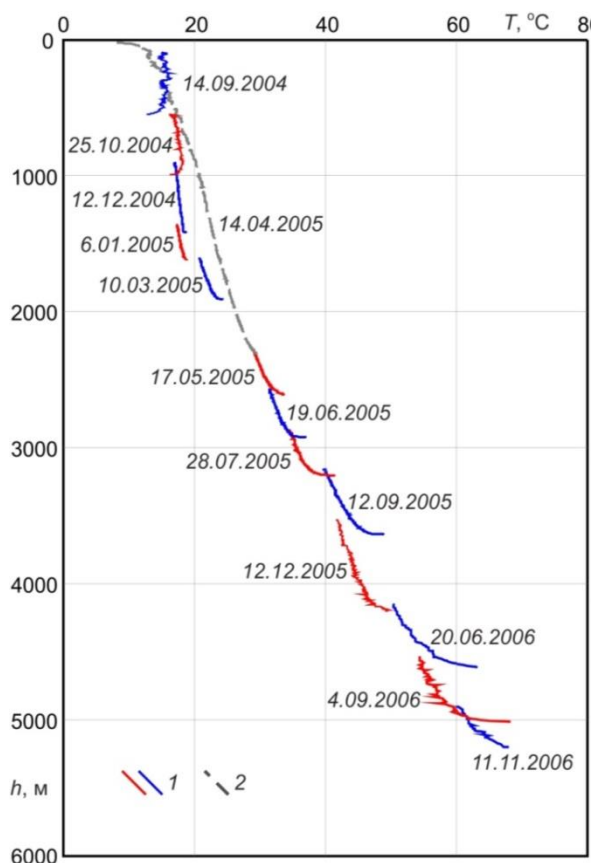


Рис. 2. Термограммы по скважине П-1 (показаны даты проведения измерений). Условные обозначения: 1 – данные измерений по единичному интервалу бурения; 2 – данные измерений после шестого этапа бурения.

[Fig. 2. Thermograms for well P-1 (dates of measurements are shown). Legend: (1) – measurement data for a single drilling interval; (2) – measurement data after the sixth stage of drilling.]

измерений, при различной его ориентировке, и рассчитывалось среднее значение теплопроводности. Погрешность измерений, полученная по независимым контрольным наблюдениям, составила $\pm 0,03$ Вт/м·К, что является вполне приемлемой величиной для природных материалов.

Обобщённые результаты измерений теплопроводности образцов пород, приведённые в таблице 1, показывают, что для терригенных пород максимальные значения выявлены у аргиллитов и песчаников, причём у последних диапазон изменений величины почти в два раза больше. Для кристаллических пород наибольшие значения теплопроводности отмечаются у гранитов, а минимальные характерны для образцов габбро. Диапазоны вариаций теплопроводности примерно одинаковы для всех кристаллических пород. Отметим, что терригенные породы рифея имеют несколько большие значения теплопроводности, чем кристаллические архейские породы, для образцов которых отмечается незначительная трещиноватость и эффект «дискования» керна [4], отобранного с глубоких горизонтов разреза. В целом полученные значения теплопроводности по разрезу скважины П-1 достаточно хорошо отвечают известным результатам для кристаллических пород северо-востока Балтийского щита [4, 10, 21, 22] и пород верхней части чехла прилегающих областей Баренцевоморской плиты [5, 24].

Табл. 1. Значения теплопроводности для типов пород
[Table 1. Thermal conductivity values for rock types]

Породы [Rocks]	Кол-во образцов [Number of samples]	Теплопроводность (λ), Вт/м·К [Heat conductivity (λ), W/m·K]	
		диапазон [range]	среднее [average]
<i>Терригенные (рифей):</i> [Terrigenous (Riphean):]			
алевролиты [siltstones]	1	1,88	-
аргиллиты [mudstones]	3	1,22 – 3,17	2,17
песчаники [sandstone]	4	2,21 – 3,05	2,51
<i>Кристаллические (архей):</i> [Crystalline (Archaean):]			
граниты [granite]	19	1,67 – 2,54	2,16
граносиениты [granosyenites]	8	1,27 – 2,22	1,97
диориты [diorites]	2	1,71 – 2,20	1,94
габбро [gabbro]	3	1,46 – 1,83	1,63

Естественная радиоактивность пород

Непосредственно в ходе бурения специалистами ОАО НПЦ «Тверьгеофизика» проводилось выборочное изучение естественной радиоактивности керна и шлама пород скважины П-1. Гамма-спектрометрические измерения выполнялись с дискретностью 0,1–0,2 м и экспозицией 3–5 минут в каждой точке наблюдений, что вполне достаточно для получения общей картины распределения радиогенных элемен-

тов. Данные исследования спектра гамма-излучения позволили рассчитать массовые содержания радиогенных элементов K^{40} , U^{238} и Th^{232} по разрезу скважины.

Обобщённые результаты усреднённых по интервалам опробования 936 точечных определений концентрации радиогенных элементов в породах керна скважины П-1 приведены в таблице 2. Терригенные породы рифейского осадочного чехла отмечаются повы-

шенным Th/K отношением характерным для пород, в состав которых входят слюдястые и глинистые минералы [25]. Кристаллические породы архея, вскрытые в разрезе скважины, характеризуются типичными для кислых, средних и основных интрузивных разностей содержаниями радиогенных элементов. Отношение Th/U в архейских гранитоидах варьирует от 1,64 до

4,63 со средним значением 2,8 – типичным для древних магматических пород Балтийского щита [26]. Отметим также, что усреднённые результаты по шламу показывают аналогичные соотношения, но диапазон вариаций содержаний U и Th примерно на половину порядка больше.

Табл. 2. Содержание радиогенных элементов в керне пород
[Table 2. Content of radiogenic elements in the rock cores]

Породы [Rocks]	Массовое содержание, среднее / (диапазон) [Mass content, medium / (range)]		
	K ⁴⁰ , %	U ²³⁸ , ppm	Th ²³² , ppm
<i>Рифей:</i> [Riphean:]			
Алевриты [siltstones]	2,38 / (0,89-3,35)	3,28 / (0,45-3,61)	13,41 / (0,60-4,89)
Аргиллиты [mudstones]	2,37 / (0,53-3,55)	3,64 / (0,98-5,66)	10,08 / (3,41-15,05)
Песчаники [sandstone]	1,60 / (0,47-2,84)	1,99 / (0,45-5,07)	6,75 / (0,41-16,16)
<i>Архей:</i> [Archaean:]			
Граниты [granites]	0,77 / (0,12-1,57)	0,41 / (0,01-2,22)	1,90 / (0,01-20,11)
Граносиениты [granosyenites]	0,73 / (0,26-1,22)	0,82 / (0,02-2,53)	2,26 / (0,01-21,06)
Сиениты [syenites]	0,48 / (0,18-0,98)	0,81 / (0,23-1,27)	1,33 / (0,30-3,14)
Диориты [diorites]	0,83 / (0,32-1,43)	0,71 / (0,12-1,26)	1,54 / (0,23-3,23)
Габбро [gabbro]	0,41 / (0,18-1,58)	0,76 / (0,24-1,38)	1,17 / (0,22-2,32)

Обсуждение результатов

Как отмечалось выше, результаты температурных измерений (рис. 2) демонстрируют неустойчивый термический режим в скважине, при этом роль гидрогеологических процессов в таком режиме – весьма мала. По данным комплексной интерпретации ГИС в рифейском чехле разреза выявлены четыре интервала на глубинах: 100–174, 292–360, 630–685 и 794–804 метров, характеризующиеся незначительной трещиноватостью [16]. На полевых термограммах им соответствуют слабые аномалии понижения температуры, при этом данные геолого-технологических испытаний по стволу скважины не показали значимого притока жидкости в указанных интервалах. Кроме того, изучение фильтрационно-ёмкостных свойств керна терригенных пород чехла [16] показало их низкую проницаемость – от сотых долей мД до 7 мД.

В архейских кристаллических породах фундамента по результатам комплексного анализа материалов ГИС выявлен целый ряд интервалов незначительно трещиноватых пород и для трёх из них: 1648–1668, 2407–2414 и 2448–2468 метров, на полевых термограммах установлены слабые аномалии локального снижения температуры. Результаты геолого-технологических испытаний по стволу скважины не показали заметного притока жидкости в этих интервалах. Изучение фильтрационно-ёмкостных свойств керна кристаллических пород фундамента [16] выявили их весьма низкую проницаемость – от тысячных долей мД до 0,4 мД.

Отметим, что для архейского разреза, в интервале 4950–5198 м, установлено существенное увеличение кавернозности стенок скважины [16], что может быть связано с формированием зон трещиноватости при

воздействии неоднородного напряженного состояния в среде вблизи ствола скважины [4] без существенной циркуляции растворов в этой зоне. Данные геолого-технологических исследований глубоких горизонтов показали отсутствие аномальных изменений плотности промывочной жидкости на выходе, а также отсутствие резких колебаний её температуры на входе и выходе, что говорит о достаточно спокойном гидрогеологическом режиме в стволе скважины.

Таким образом, можно обоснованно утверждать, что характер распределения температуры в скважине П-1 (рис. 2), с выраженным резким изменением температуры к забою изученного бурового интервала, связан с технологией проходки скважины. Эта специфика нестационарного режима в глубоких скважинах, носит название «вариаций температур на забое» [27], и обусловлена интенсивной прокачкой бурового раствора, отличающегося по температуре от окружающей среды. Развитые методы учёта такого воздействия [28, 29], основанные на решении классической задачи об эволюции температуры в среде от теплового источника в виде тонкого бесконечного стержня, требуют изучения временных изменений температуры на забое после остановки прокачки бурового раствора.

В нашем случае, такие режимные наблюдения на забое не выполнялись, но детальная документация всех операций на скважине даёт значения времени между остановкой прокачки промывочной жидкости и измерением призабойной температуры для соответствующего бурового интервала. Кроме того, по данным геолого-технологических исследований в процессе бурения для глубоких интервалов скважины П-1, известен характер изменения температуры промывочной жидкости на входе и выходе. Разность этих

величин, приведённая на рис. 3, показывает закономерный рост прогрева промывочной жидкости по мере возрастания глубины. Наилучшая аппроксимация

такой зависимости получена для степенной функции вида

$$\Delta T(h) = 4 \cdot 10^{-13} \cdot h^{3,5616} \quad (1)$$

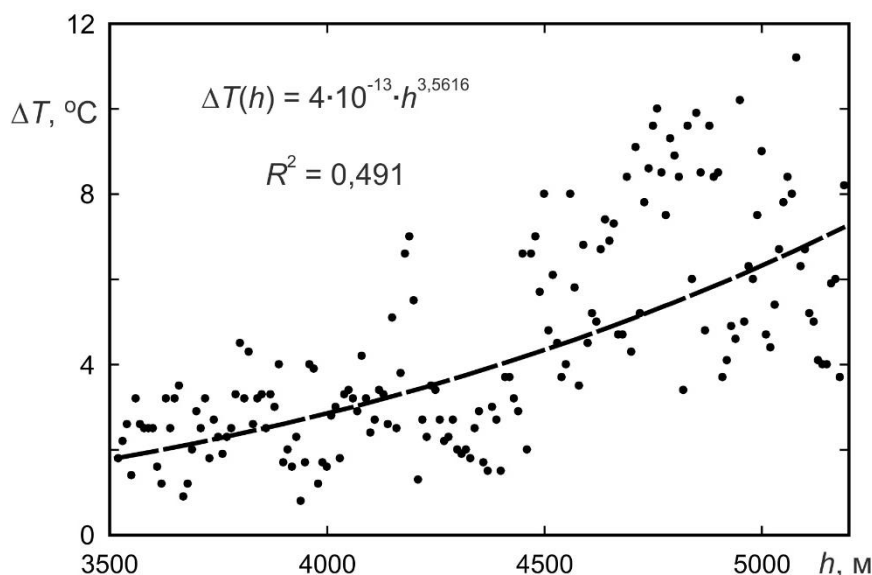


Рис. 3. Разность температуры промывочной жидкости: $\Delta T = T_{\text{OUT}} - T_{\text{IN}}$ в зависимости от глубины. Показана аппроксимация данных $\Delta T(h)$ и величина её достоверности R^2 .

[Fig. 3. Temperature difference of the washing fluid: $\Delta T = T_{\text{OUT}} - T_{\text{IN}}$ depending on the depth. The approximation of the data $\Delta T(h)$ and the value of its reliability R^2 are shown.]

Опираясь на эти данные и их экстраполяцию в область несколько меньших глубин, а также сведения о временном режиме операций на скважине, были получены оценки минимальной коррекции температур на забое буровых интервалов методом Хорнера [28, 29]. Для коррекции температур использовалась программная утилита BHT Horner Correction компании ZETAWARE [30], с помощью которой были рассчитаны откорректированные температуры на забоях

буровых интервалов, приведённые в таблице 3. Линейная аппроксимация откорректированной (стационарной) температуры на забоях интервалов бурения (T_B), в зависимости от глубины h , описывается выражением вида

$$T_B(h) = 0,0169 \cdot h - 9,5504 \quad (2)$$

которое характеризуется величиной достоверности связи с $R^2 = 0,9808$.

Табл. 3. Откорректированная температура на забое T_B
[Table 3. Corrected downhole temperature T_B]

Глубина, м [Depth, m]	2610	2934	3200	3640	4190	4615	4980	5200
Температура, С [Temperature, C]	35,9	37,0	44,8	54,7	58,9	70,7	76,3	76,1

Полученные оценочные данные откорректированных температур на забое буровых интервалов, показанные на рис. 4 вместе с исходными термограммами, позволяют обратиться в проблеме оценки величины теплового потока по скважине П-1. С этой целью были сформированы усреднённые значения теплопроводности типичных пород (см. табл. 1) по разрезу. Усреднение выполнялось только для групп близко расположенных образцов керна однотипных пород, описание которых приведено в [16], а для отдельных образцов, характеризующих относительно однородные мощные толщи, в качестве значений принимались результаты непосредственных измерений теплопроводности [23]. Сводные данные, включающие средние значения теплопроводности и диапазоны её изменений для групп или отдельных образцов, также

вынесенные на рис. 4, демонстрируют значимое различие терригенных и кристаллических пород по величинам их теплопроводности.

Собственно оценка теплового потока дана для интервала 2600–5200 м, на котором установлена линейная зависимость температуры T_B от глубины (2), показанная на рис. 4, где коэффициент при переменной h , равный 0,0169 К/м, фактически характеризует значение стационарного геотермического градиента по скважине П-1. Поскольку среднее значение теплопроводности пород для мощной толщи гранитоидов и диоритов (рис. 4) в указанном интервале составляет 1,88 Вт/м·К, то оценка величины теплового потока составляет около 32 мВт/м². Принимая во внимание диапазон вариаций теплопроводности пород, средние значения минимальных и максимальных величин

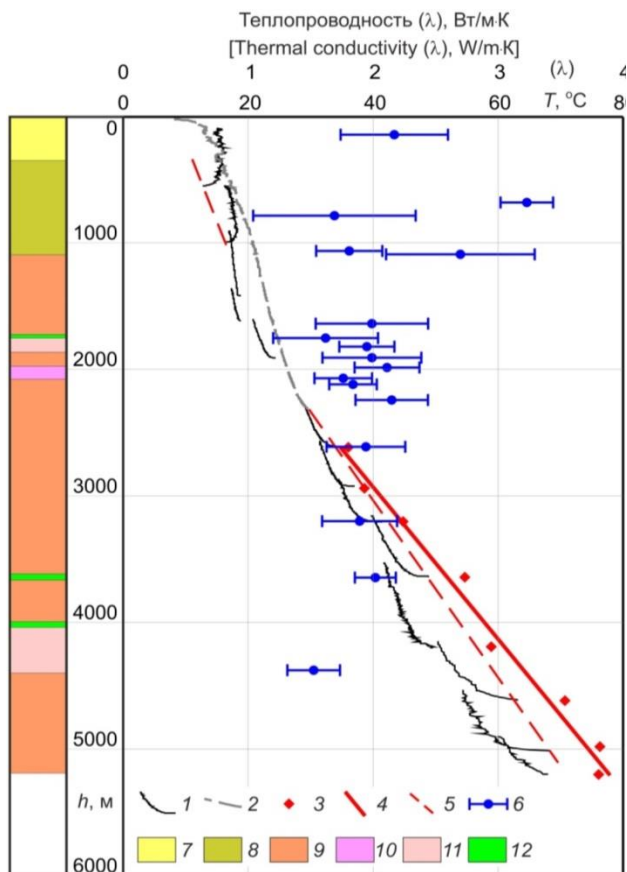


Рис. 4. Откорректированные температуры на забое и термограммы по скважине П-1. Условные обозначения: 1 – термограммы по интервалам бурения; 2 – сводная термограмма от 14.04.2005; 3 – значения температур на забое T_B по методу Хорнера [30]; 4 – аппроксимация данных T_B в форме (2); 5 – оценки “максимального градиента” по [31]; 6 – среднее значение и диапазон изменений теплопроводности пород λ ; 7 – песчаники, алевролиты; 8 – аргиллиты, алевролиты, песчаники; 9 – граниты, гранитогнейсы; 10 – сиениты, граносиениты; 11 – диориты, гранодиориты; 12 – габброиды.

[Fig. 4. Corrected downhole temperatures and thermograms for well P-1. Legend: (1) – thermograms by drilling intervals; (2) – consolidated thermogram of 14.04.2005; (3) – values of temperatures at the bottom T_B according to the Horner’s method [30]; (4) – approximation of T_B data in the form (2); (5) – estimates of the “maximum gradient” by [31]; (6) – the average value and range of changes in the thermal conductivity of rocks λ ; (7) – sandstones, siltstones; (8) – mudstones, siltstones, sandstones; (9) – granites, granitogneisses; (10) – syenites, granosyenites; (11) – diorites, granodiorites; (12) – gabbroids.]

которых равны 1,57 Вт/м·К и 2,13 Вт/м·К на указанном интервале глубин, вариация значений теплового потока лежит в диапазоне 26–36 мВт/м². Ещё одну оценку градиента температур по скважине можно получить “методом максимального градиента” [31], который представляет собой линейную аппроксимацию точек максимальных температур на забоях буровых интервалов, также показанную на рис. 4. Величина геотермического градиента для этого варианта равна примерно 0,0166 К/м, что для указанных выше величин теплопроводности даёт оценку теплового потока примерно 31 мВт/м² с диапазоном вари-

аций 25–35 мВт/м². Приведённые оценки теплового потока, характеризующие примерно стационарное состояние термического режима коры, соответствуют ранее полученным результатам для глубоких горизонтов скважины С-1 [22], расположенной на удалении 270 км к юго-востоку, где величина теплового потока равна 30 мВт/м² с диапазоном вариаций 22–38 мВт/м².

Для верхних горизонтов скважины П-1, на глубинах менее 2000 метров, полевые термограммы имеют аномальный характер с заметным уменьшением температуры к забое буровых интервалов (рис. 4). Разумеется, такой характер термограмм демонстрирует нестационарности теплового режима в процессе бурения скважины, но, тем не менее, и в этом случае можно получить оценку теплового потока, используя формальный подход [31]. В интервале 350–1090 метров на рис. 4 показана линейная аппроксимация точек минимальных температур на забоях двух верхних буровых интервалов, для которой оценка геотермического градиента даёт значение 0,0083 К/м, что примерно соответствует градиенту в этом интервале по сводной термограмме от 14.04.2005, полученной после некоторой “выстойки” скважины. Среднее значение теплопроводности нижнего отдела терригенных пород (рис. 4) составляет 2,36 Вт/м·К при среднем значении минимальных и максимальных величин равном 1,92 Вт/м·К и 2,75 Вт/м·К. Указанные значения дают оценку величины теплового потока около 20 мВт/м² с диапазоном вариаций 16–23 мВт/м², что существенно меньше чем значение теплового потока на более глубоких горизонтах разреза П-1. Отметим, что подобные специфические аномальные вертикальные вариации теплового потока характерны для территории Северной Евразии [22, 32–34], подвергшейся воздействию последнего оледенения.

Модельные значения климатически невозмущённого поверхностного теплового потока в районе скважины П-1 можно рассчитать, опираясь на данные о концентрации радиогенных элементов в образцах керна пород (табл. 2), пересчитанные в значения теплогенерации пород. Величины теплогенерации вычислялись согласно выражению [35, 36]

$$q = 10^{-5} \cdot \rho \cdot (3.4302 \cdot C_K + 2.6368 \cdot C_{Th} + 9.8314 \cdot C_U) \quad (3)$$

где q – теплогенерация в мкВт/м³, ρ – плотность породы в кг/м³, C – концентрации элементов: калия - в весовых процентах; тория и урана - в ppm. Результаты вычисления теплогенерации пород керна скважины П-1, полученные с учётом детальных данных [16] о плотности пород, приведены на рис. 5, где показаны средние значения и диапазоны вариаций теплогенерации для изученных образцов верхней части разреза в интервале от нуля до 2500 метров.

Терригенные породы рифея характеризуются наиболее высокими величинами теплопроводности

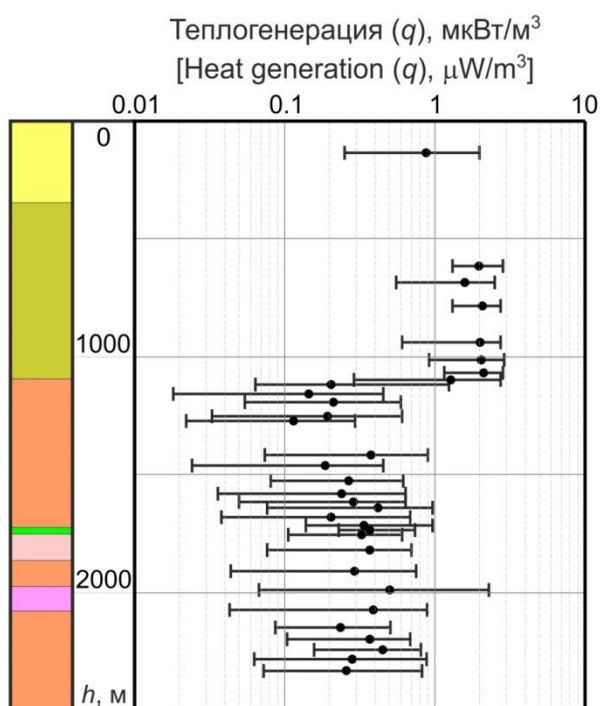


Рис. 5. Теплогенерация пород по скважине П-1 (показаны средние значения и диапазон вариаций величин). Условные обозначения для геологической колонки см. рис. 4.

[**Fig. 5.** Heat generation of rocks according to the well P-1 (average values and range of variations of values are shown). For the symbols for the geological column, see Fig. 4.]

по разрезу скважины П-1. Причём среди этих пород песчаники имеют среднее значение теплогенерации около $1,1 \text{ мВт/м}^3$ (с диапазоном вариации значений $0,27\text{--}2,35 \text{ мВт/м}^3$), а аргиллиты и алевролиты – примерно $2,0 \text{ мВт/м}^3$ (диапазон вариации $0,98\text{--}2,75$

мВт/м^3). Кристаллические породы архея верхней части разреза скважины П-1 характеризуются существенно меньшими величинами теплопроводности: среднее значение по всем образцам составляет примерно $0,3 \text{ мВт/м}^3$ с диапазоном вариаций $0,07\text{--}0,78 \text{ мВт/м}^3$. При этом породы преимущественно сиенитового состава выделяются относительно повышенной теплогенерацией со средним значением около $0,5 \text{ мВт/м}^3$ и диапазоном вариаций $0,07\text{--}2,28 \text{ мВт/м}^3$. Отметим, что полученные величины теплогенерации архейских кристаллических пород по скважине П-1 хорошо согласуются с результатами определений для аналогичных пород Балтийского щита [2, 3, 10, 22] и фундамента Восточно-Европейского кратона [37, 38].

Приведённые сводные данные о теплогенерации были использованы для оценки вклада пород верхней части разреза в общий тепловой поток. Такая оценка, представляющая сумму произведений мощности геологических комплексов на значение средних теплогенераций в них, приведена в таблице 4, в предположении, что до глубины 4000 м (см. рис. 4) породы гранитоидного состава имеют аналогичные (рис. 5) значения теплогенерации. Полученные оценки теплового эффекта верхней части разреза, совместно с приведёнными выше оценками теплового потока в нижней части разреза, позволяют предполагать общую величину невозмущённого поверхностного теплового потока в районе скважины П-1 на уровне примерно 34 мВт/м^2 с диапазоном вариаций $26\text{--}40 \text{ мВт/м}^2$. Такие величины хорошо согласуются с результатами измерений теплового потока именно для периферии Балтийского щита [5, 38] и подтверждают ранее предполагавшийся характер теплового потока в области сочленения Балтийского щита и Баренцевоморской платформы [1, 10].

Табл. 4. Тепловой поток верхней части разреза скважины П-1
[**Table 4.** Heat flow of the upper part of the section of the well P-1]

Породы [Rocks]	Мощность, м [Thicknesses, m]	Теплогенерация среднее / (диапазон), мВт/м^3 [Heat generation average / (range), $\mu\text{W/m}^3$]	Тепловой поток, среднее / (диапазон), мВт/м^2 [Heat flow, average / (range), W/m^2]
Песчаники, алевролиты [Sandstones, siltstones]	350	1,1 / (0,27-2,35)	0,39 / (0,1-0,83)
Аргиллиты, алевролиты [Mudstones, siltstones]	750	2,0 / (0,98-2,75)	1,5 / (0,74-2,06)
Гранитоиды, диориты [Granitoids, diorites]	2900	0,3 / (0,07-0,78)	0,87 / (0,2-2,26)
Сумма: [Total:]			2,76 / (1,04-5,15)

Выводы

По результатам обобщения материалов геотермических исследований и данных о теплофизических свойствах пород скважины П-1 дана сводная характеристика теплового режима земной коры в зоне перехода от Балтийского щита к Баренцевоморской плите.

1. По результатам изучения образцов керна скважины П-1 впервые получены данные о теплопровод-

ности рифейских терригенных пород, залегающих в основании осадочного чехла Баренцевоморской плиты, а также новые данные о теплопроводности архейских пород, которые существенно дополняют сведения о тепловых свойствах кристаллического фундамента Балтийского щита.

2. Рассмотрены сводные результаты температурных измерений по стволу скважины П-1 и отмечена

нестационарность термического режима, обусловленная технологической схемой её проходки. Выполненная коррекция температур на забоях буровых интервалов по стволу скважины, позволила дать оценку стационарного геотермического градиента для глубоких горизонтов разреза, составляющую примерно 0,017 К/м.

3. Опираясь на оценку стационарного геотермического градиента и данные по теплопроводности архейских кристаллических пород для нижних горизонтов скважины, получена оценка величины теплового потока в интервале 3000–5000 м, составляющая примерно 32 мВт/м² с диапазоном вариаций потока 26–36 мВт/м², что согласуется с данными измерений в глубоких скважинах северо-востока Балтийского щита.

4. Для верхней части разреза, в интервале залегания рифейских терригенных пород, откорректированный геотермический градиент равен 0,0083 К/м, что даёт оценку величины теплового потока в 20 мВт/м² с диапазоном изменения 16–23 мВт/м². Такие величины, значимо меньшие, чем на более глубоких уровнях разреза, свидетельствуют о наличии вертикальных вариаций теплового потока, обусловленных специфической климатической обстановкой в период последнего оледенения.

5. Результаты изучения образцов керна скважины П-1 впервые позволили определить величину теплогенерации рифейских терригенных пород, среди которых песчаники в среднем имеют значение 1,1 мкВт/м³ (диапазон вариаций 0,27–2,35 мкВт/м³), а аргиллиты и алевролиты 2,0 мкВт/м³ (диапазон вариации 0,98–2,75 мкВт/м³). Архейские кристаллические породы имеют среднее значение теплопроводности примерно 0,3 мкВт/м³ (диапазон вариаций 0,07–0,78 мкВт/м³).

6. Опираясь на данные о теплогенерации рассчитана величина невозмущённого поверхностного теплового потока в районе скважины П-1, составляющая примерно 34 мВт/м² (диапазон вариаций 26–40 мВт/м²), которая хорошо согласуется с результатами других измерений потока на северо-востоке Балтийского щита.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазнев В.Н., Скопенко Г.Б., Подгорных В.Л. Температура земной коры зоны перехода от Балтийского щита к Баренцево-моровской плите // *Геофизический журнал*. 1985. Т. 7. № 3. С. 58–64.
2. Kremenetsky A.A., Milanovsky S.Y., Ovchinnikov L.N. A heat generation model for continental crust based on deep drilling in the Baltic Shield // *Tectonophysics*. 1989. Vol. 159. I. 3–4. P. 231–246. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90130-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90130-3)
3. Kukkonen I.T. Heat production map of northern and central part of the Fennoscandian Shield based on geochemical surveys of heat producing elements // *Tectonophysics*. 1993. Vol. 225. I. 1–2. P. 3–14. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90243-D](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90243-D)
4. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / Под ред.: Орлов В.П., Лавров Н.П. М.: Технонефтегаз, 1998. 260 с.
5. Левашкевич В.Г. Закономерности распределения геотермического поля окраин Восточно-европейской платформы (Баренцево-моровский и Белорусско-Прибалтийский регионы): дисс. д-ра геол. мин. наук. М.: 2005. 332 с.
6. Буянов А.Ф., Глазнев В.Н., Раевский А.Б., Скопенко Г.Б. Комплексная интерпретация данных гравиметрии, сейсмометрии и геотермии // *Геофизический журнал*. 1989. Т. 11. № 2. С. 30–39.
7. Glaznev V.N., Raevsky A.B., Sharov N.V. A model of the deep structure of the north-eastern part of the Baltic Shield based on joint interpretation of seismic, gravity, magnetic and heat flow data // *Tectonophysics*. 1989. Vol. 162. I. 1–2. P. 151–164. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90361-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90361-2)
8. Mitrofanov F.P., Sharov N.V., Zagorodny V.G., Glaznev V.N., Korja A. Crustal structure of the Baltic shield along the Pechenga - Kostomuksha - Lovisa geotraverse // *International Geology Review*. 1998. Vol. 40. I. 11. P. 990–997. DOI: <https://doi.org/10.1080/00206819809465250>
9. Glaznev V.N. Raevsky A.B., Skopenko G.B. A three-dimensional integrated density and thermal model of the Fennoscandian lithosphere // *Tectonophysics*. 1996. Vol. 258. I. 1–4. P. 15–33. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00147-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00147-6)
10. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: КаЭМ, 2003. 252 с.
11. Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M., Sokolova E.Yu. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations // *Geoscience Frontiers*. 2020. Vol. 11. I 3. P. 999–1023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.003>
12. Балаганский В.В., Глазнев В.Н., Осипенко Л.Г. Раннепротерозойская эволюция северо-востока Балтийского щита: террейновый анализ // *Геотектоника*. 1998. № 2. С. 16–28.
13. Шипилов Э.В., Тюремнов В.А., Глазнев В.Н., Голубев В.А. Палеогеографические обстановки и тектонические деформации Баренцево-моровской континентальной окраины в кайнозое // *Доклады РАН*. 2006. Т. 407. № 3. С. 378–383.
14. Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н., Козлова Н.Е., Иванов А.А., Кудряшов Н.М., Мартынов Е.В., Тюремнов В.А., Матюшкин А.В., Осипенко Л.Г. Геология архея Балтийского щита. СПб.: Наука, 2006. 329 с.
15. Sorokhtin N.O., Kozlov N.E., Glaznev V.N. Martynov E.V. A Study in Earth's Geological Evolution. The Baltic Shield. USA. Hoboken: John Wiley & Sons. 2020. 588 p.
16. Сорохтин Н.О., Козлов Н.Е., Глазнев В.Н., Куликов Н.В., Чикирев И.В., Мартынов Е.В., Марчук Т.С. Архей и неопротерозой полуостровов Рыбачий и Средний (Балтийский щит): геология, геодинамика, нефтегазоносность и алмазоносность. СПб.: Наука, 2022. (В печати).
17. Симонов А.П., Губерман Д. М., Яковлев Ю.Н., Снетко П.П., Берзин Р.Г., Сулейманов А.К., Андрущенко Ю.Н., Заможняя Н.Г. Полуостров Рыбачий (Баренцево море): новые данные о тектонике и перспективах нефтегазоносности рифейских отложений прибрежной зоны Кольского полуострова // *Доклады РАН*. 2002. Т. 284. № 6. С. 795–801.
18. Глазнев В.Н., Сорохтин Н.О., Раевский А.Б., Козлов Н.Е. Идентификация коровых отражений в зоне перехода от Балтийского щита к Баренцево-моровской плите как основа прогнозирования полезных ископаемых // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2014. № 1. С. 95–102.

19. Минц М.В., Глазнев В.Н., Конилов А.Н., Кунина Н.М., Никитичев А.П., Раевский А.Б., Седых Ю.Н., Ступак В.М., Фонарев В.И. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: Палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры. Труды ГИН РАН. М.: Научный мир. Вып. 503. 1996. 287 с.
20. Минц М.В., Глазнев В.Н., Раевский А.Б. Трёхмерная модель геологического строения верхней коры района Кольской сверхглубокой скважины и сопредельных территорий Кольского полуострова // *Геотектоника*. 1994. № 6. С. 3–22.
21. Popov Y.A., Pevzner S.L., Pimenov V.P., Romushkevich R.A. New geothermal data from the Kola Super Deep well SG-3 // *Tectonophysics*. 1999. Vol. 306. I. 3–4. P. 345–366. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00065-7)
22. Глазнев В.Н., Кукконен И.Т., Раевский А.Б., Ёкинен Я. Новые данные о тепловом потоке в центральной части Кольского полуострова // *Доклады РАН*. 2004. Т. 396. № 1. С. 102–104.
23. Агаркова М.А. Теплопроводность пород земной коры северо-запада Мурманской области. *Геофизические и петрофизические исследования: методика и геологическая интерпретация данных*. Воронеж: ИПЦ «Научная книга». 2022. С. 5–10.
24. Бекасова Н.Б., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А. Теплопроводность осадочных пород Баренцевоморского региона. Препринт Геологического института. Апатиты: КНЦ АН СССР. 1990. 48 с.
25. Баюшкин И. М., Трофимов Н.С. Геохимия и минералогия урана и тория. М.: ВИМС. 2016. 260 с.
26. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. Л.: Недра. 1974. 231 с.
27. Prenskey S. Temperature measurements in boreholes: an overview of engineering and scientific applications // *The Log Analyst*. 1992. Vol. 33. I. 3. P. 313–333.
28. Pasquale V., Chiozzi P., Gola G., Verdoya M. Depth-time correction of petroleum bottom-hole temperatures in the Po Plain, Italy // *Geophysics*. 2008. Vol. 73. I. 6. P. E187–E196. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.2976629>
29. Peters K.E., Nelson P.H. Criteria to determine borehole formation temperatures. *Analyzing the thermal history of sedimentary basins: methods and case studies*. SEPM Special Publication. 2012. I. 103. P. 5–15.
30. ZetaWare Utilities – Bottom Hole Temperature Horner Correction [Электронный ресурс] URL: <http://zetaware.com/utilities/bht/horner.html> (дата обращения 21.07.2022)
31. Deighton I., Tibocha E., Dotsey P. MaxG basin temperature modelling using bottom hole temperature datasets. *Unconventional Resources Technology Conference*. Denver, Colorado, USA. 2014. P. 273–288. DOI: <https://doi.org/10.15530/urtec-2014-1920520>
32. Kukkonen I.T., Rath V., Kivekäs L., Šafanda J., and Čermak V. Geothermal studies of the Outokumpu Deep Drill Hole, Finland: Vertical variation in heat flow and palaeoclimatic implications // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2011. Vol. 188. I. 1–2. P. 9–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.06.002>
33. Демежко Д.Ю., Горностаева А.А. Реконструкции долговременных изменений теплового потока через земную поверхность по данным геотермии глубоких скважин // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 12. С. 1841–1846. DOI: <https://doi.org/10.15372/GiG20141211>
34. Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Антипин А.Н. Геотермические оценки теплового режима в основаниях позднеплейстоценовых ледниковых щитов. Ч. II. Скандинавский щит // *Уральский геофизический вестник*. 2018. № 2(32). С. 20–33. DOI: <https://doi.org/10.25698/ugv.2018.2.3.20>
35. Rybach L. Determination of the heat production rate. *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1988. P. 125–142. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-2847-3>
36. Ruedas T. Radioactive heat production of six geologically important nuclides // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2017. Vol. 18. I. 9. P. 3530–3541. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GC006997>
37. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Минц М.В., Чернышова Д.М. Теплогенерация пород фундамента центральной части Восточно-Европейского кратона // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 3. С. 60–78. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3651>
38. Fuchs S., Norden B., International Heat Flow Commission. The Global Heat Flow Database: Release 2021. *GFZ Data Services*. DOI: <https://doi.org/10.5880/figeo.2021.01>

Thermal regime of the earth's crust in the transition zone from the Baltic Shield to the Barents Sea Plate

V. N. Glaznev^{1, 2✉}, N. E. Kozlov², N. O. Sorokhtin^{2, 3}, V. I. Zhavoronkin¹, M. A. Agarkova¹

¹*Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation*

²*Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
14 Fersmana st., Apatity 184209, Russian Federation*

³*Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences,
36 Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The problems of studying the thermal regime of the earth's crust in the zone of transition from the Baltic shield to the Barents Sea plate are discussed. The performed analysis is based on the results of temperature measurements in the deep borehole P-1, drilled on the isthmus between the Sredny and Rybachy peninsulas, data on the natural radioactivity of the rocks exposed by it, and their thermal conductivity.

Methodology: General information about the structure of the upper part of the earth's crust in the area of drilling a well is provided based on the materials of geological and seismic studies. A brief description of the complex of geophysical surveys and geological and technological tests along the P-1 well bore is provided with an emphasis on the results of field temperature measurements in the well. Laboratory measurements of the thermal conductivity of core samples from well P-1, which demonstrated some differences between the terrigenous rocks of the Riphean and the Archean crystalline rocks were performed. The generalized results of determination of the concentration of radiogenic elements in the core rocks of the well, showing a significant differentiation of the terrigenous rocks of the Riphean and the crystalline rocks of the Archean are presented.

Results and discussion: Based on the data of complex studies, an insignificant role of the hydrogeological regime in the perturbation of the temperature field along the well was shown. The Horner's method was used to calculate the unperturbed temperatures at the bottom-holes of the drilling intervals of the well and to estimate the geothermal gradient for deep Archean horizons of the section, where the heat flux was estimated at 32 mW/m². For the Riphean terrigenous complex of the P-1 well section, the value of the undisturbed heat flux was estimated at 20 mW/m², which indicates the influence of near-surface temperature during the last glaciation. The values of heat generation of rocks calculated based on the data on the content of radiogenic elements allowed to estimate the total value of the unperturbed surface heat flow in the area of well P-1 at a level of approximately 34 mW/m².

Conclusions: The main results of the study of the totality of characteristics of the thermal regime of the earth's crust in the transition zone from the Baltic Shield to the Barents Sea Plate were formulated.

Keywords: temperature regime, thermophysical properties, heat flow, Baltic shield, Barents Sea plate.

Funding: grant No. 20-05-00190 supported by Russian Foundation for Basic Research.

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Victor N. Glaznev, e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

For citation: Glaznev V.N., Kozlov N.E., Sorokhtin N.O., Zhavoronkin V.I., Agarkova M.A. Thermal regime of the earth's crust in the transition zone from the Baltic Shield to the Barents Sea Plate. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 3, pp. 76–88. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/76–88>

REFERENCES

1. Glaznev V.N., Skopenko G.B., Podgornyykh V.L. Temperatura zemnoy corri zone perejoda ot Baltiyskogo Shchita k Barentsevomorskoy Plite [Temperature of the earth's crust of the zone of transition from the Baltic Shield to the Barents Sea Plate]. *Geophysical zhurnal – Geophysical journal*, 1985, vol. 7, no. 3, pp. 58–64. (In Russ.)
2. Kremenetsky A.A., Milanovsky S.Y., Ovchinnikov L.N. A heat generation model for continental crust based on deep drilling in the Baltic Shield. *Tectonophysics*, 1989, vol. 159, I. 3–4, pp. 231–246. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90130-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90130-3)
3. Kukkonen I.T. Heat production map of northern and central part of the Fennoscandian Shield based on geochemical surveys of heat producing elements. *Tectonophysics*, 1993, vol. 225, I. 1–2, pp. 3–14. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90243-D](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90243-D)
4. *Kolskaya sverhglubokaya. Nauchnye rezultate i opyt issledovaniy* [Kola Superdeep. Scientific results and research experience]. Orlov V.P., Laverov N.P. (eds.). Moscow, Technoneftegaz publ., 1998, 260 p. (In Russ.)
5. Levashkevich V.G. *Zakonomernosty raspredelenia geotermalnaya polya okraine Vostochno-Evropeyskoy platform (Barentsevomorskoy i Belarusian-Pribaltiyskoy region)*. Diss. d-ra. geol. min. nauk [Patterns of distribution of the geothermal field of the outskirts of the East European platform (Barents Sea and Belarusian-Baltic regions)]. Moscow, 2005, 332 p. (In Russ.)
6. Buyanov A. F., Glaznev V. N., Raevskii A. B., Skopenko G. B. Kompleksnaya interpretatsiya dannykh gravimetrii, seismometrii i geotermii [Complex interpretation of gravimetry, seismometry and geothermal data]. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical journal*, 1989, vol. 11, no. 2, pp. 30–39. (In Russ.)
7. Glaznev V.N., Raevsky A.B., Sharov N.V. A model of the deep structure of the north-eastern part of the Baltic Shield based on joint interpretation of seismic, gravity, magnetic and heat flow data. *Tectonophysics*, 1989, vol. 162, I. 1–2, pp. 151–164. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90361-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90361-2)
8. Mitrofanov F.P., Sharov N.V., Zagorodny V.G., Glaznev V.N., Korja A. Crustal structure of the Baltic shield along the Pechenga - Kostomuksha - Lovisa geotraverse. *International Geology Review*, 1998, vol. 40, I. 11, pp. 990–997. DOI: <https://doi.org/10.1080/00206819809465250>
9. Glaznev V.N., Raevsky A.B., Skopenko G.B. A three-dimensional integrated density and thermal model of the Fennoscandian lithosphere. *Tectonophysics*, 1996, vol. 258, I. 1–4, pp. 15–33. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00147-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00147-6)
10. Glaznev V.N. *Kompleksnyye geofizicheskie modeli litosfery Fennoskandii* [Complex geophysical models of the lithosphere of Fennoscandia]. Apatity, «KaeM» publ., 2003, 252 p. (In Russ.)
11. Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M., Sokolova E.Yu. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations. *Geoscience Frontiers*, 2020, vol. 11, I. 3, pp. 999–1023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.003>
12. Balagansky V.V., Glaznev V.N., Osipenko L.G. Ranneproteroziskaya evoluchiy severo-vostoka Baltiyskogo shchita: terran analysis [Early Proterozoic evolution of the north-east of the Baltic Shield: terrain analysis]. *Geotektonika – Geotectonics*, 1998, no. 2, pp. 16–28. (In Russ.)
13. Shipilov E.V., Tyuremnov V.A., Glaznev V.N., Golubev V.A. Paleogeographyceae obstanovki yi tectonical deformation Barentsevomorskoy continental okraine v Kaynozoye [Paleogeographical situations and tectonic deformations of the Barents Sea continental margin in the Cenozoic]. *Doklady RAN – RAS Reports*, 2006, vol. 407, no. 3, pp. 378–383.
14. Kozlov N.E., Sorokhtin N.O., Glaznev V.N., Kozlova N.E., Ivanov A.A., Kudryashov N.M., Martynov E.V., Zalitsev V.A., Matyushkin A.V., Osipenko L.G. *Geology archaea Baltiyskogo shchita* [Geology of the Archaea of the Baltic Shield]. Saint Petersburg, «Science» publ., 2006, 329 p. (In Russ.)
15. Sorokhtin N.O., Kozlov N.E., Glaznev V.N., Martynov E.V. A Study in Earth's Geological Evolution. The Baltic Shield. USA. Hoboken: John Wiley & Sons publ., 2020, 588 p.
16. Sorokhtin N.O., Kozlov N.E., Glaznev V.N., Kulikov N.V., Chikirev I.V., Martynov E.V., Marchuk T.S. *Archei i neoproterozia poluostrovov Rybachy i Sredny (Baltiysky shchit): geology, geodynamics, neftegazonosnost i almazonosnyy* [Archaea and Neoproterozoic peninsulas Rybachy and Sredny (Baltic Shield): geology, geodynamics, oil and gas and diamond content]. Saint Petersburg, «Science» publ., 2022, (in press). (In Russ.)
17. Simonov A.P., Guberman D.M., Yakovlev Yu.N., Snetko P.P., Berzin R.G., Suleymanov A.K., Andryushchenko Yu.N., Zamozhnyaya N.G. Poluostrov Rybachy (Barentsevo more): novye dannye au tectonics i perspectives neftegazonosnosti rifeiskikh otlozheny pribrezhnoy zone Kolskogo poluostrova [Rybachy Peninsula (Barents Sea): new data on tectonics and prospects for oil and gas content of Riphean sediments of the coastal zone of the Kola Peninsula]. *Doklady RAN – RAS Reports*, 2002, vol. 284, no. 6, pp. 795–801. (In Russ.)
18. Glaznev V.N., Sorokhtin N.O., Raevsky A.B., Kozlov N.E. Identificachiya korovykh otrazhenii v zone perejoda ot Baltiyskogo shchita k Barentsevomorskoy plite kak osnova prognosirovaniya poleznykh iscopaemic [Identification of crustal reflections in the transition zone from the Baltic Shield to the Barents Sea Plate as the basis for forecasting minerals]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 1, pp. 95–102. (In Russ.)
19. Mints M.V., Glaznev V.N., Konilov A.N., Kunina N.M., Nikitichev A.P., Raevsky A.B., Sedykh Yu.N., Stupak V.M., Fonarev V.I. Rannii dockembrea severo-vostoka Baltiyskogo shchita: paleogeodynamics, stroenie i evolution continental corri [Early Precambrian of the north-east of the Baltic shield: paleogeodynamics, structure and evolution of the continental crust]. *Trudy geological institute RAN – Proceedings of the Geological Institute of the RAS*, no. 503, Moscow, «Scientific world» publ., 1996, 287 p. (In Russ.)
20. Mints M.V., Glaznev V.N., Raevsky A.B. Trechmernaya model geologicheskogo stroenia verkhney corri rayona Kolskoy Superchubockey skvazhiny yi sopredelnykh territorium Kolskogo poluostrova [Three-dimensional model of the geological structure of the upper crust of the Kola ultra-deep well area and adjacent territories of the Kola Peninsula]. *Geotektonika – Geotectonics*, 1994, no. 6, pp. 3–22. (In Russ.)
21. Popov Y.A., Pevzner S.L., Pimenov V.P., Romushkevich R.A. New geothermal data from the Kola Super Deep well SG-3. *Tectonophysics*, 1999, vol. 306, I. 3–4, pp. 345–366. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00065-7)
22. Glaznev V.N., Kukkonen I.T., Raevskii A.B., Ekinen Ya. Novye dannye o teplovom potoke v tsentral'noi chasti Kol'skogo

- poluostrova [New data on the heat flow in the central part of the Kola Peninsula]. *Doklady RAN – RAS Reports*, 2004, vol. 396, no. 1, pp. 102–104. (In Russ.)
23. Agarkova M.A. Teploprovodnost porod zemnoy corri severo-zapada Murmanskoy oblasti. *Geophysical yi petrophysical issledovania: methodics yi geological interpretation dannykh* [Thermal conductivity of rocks of the earth's crust of the north-west of the Murmansk region. *Geophysical and petrophysical research: methodology and geological interpretation of data*]. Voronezh, «Nauchnaya kniga» publ., 2022, pp. 5–10. (In Russ.)
24. Bekasova N.B., Popov Yu.A., Romushkevich R.A. *Teploprovodnost osadochnykh porod Barentsevomorsky region. Preprint Geological Institute*. [Thermal conductivity of sedimentary rocks of the Barents Sea region. Preprint of the Geological Institute]. Apatity, Kola Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1990, 48 p. (In Russ.)
25. Bayushkin I.M., Trofimov N.S. *Geochemistry i mineralogy urana i toriya* [Geochemistry and mineralogy of uranium and thorium]. Moscow, VIMS, 2016, 260 p. (In Russ.)
26. Smyslov A.A. *Uran i toriy v zemnoy kore* [Uranium and thorium in the earth's crust]. Leningrad, Nedra publ., 1974, 231 p. (In Russ.)
27. Prenskey S. Temperature measurements in boreholes: an overview of engineering and scientific applications. *The Log Analyst*, 1992, vol. 33, no. 3, pp. 313–333.
28. Pasquale V., Chiozzi P., Gola G., Verdoya M. Depth-time correction of petroleum bottom-hole temperatures in the Po Plain, Italy. *Geophysics*, 2008, vol. 73, no. 6, pp. E187–E196. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.2976629>
29. Peters K.E., Nelson P.H. Criteria to determine borehole formation temperatures. *Analyzing the thermal history of sedimentary basins: methods and case studies*. SEPM Special Publication, 2012, no. 103, pp. 5–15.
30. ZetaWare Utilities - Bottom Hole Temperature Horner Correction [Electronic resource]: Available at: <http://zeta-ware.com/utilities/bht/horner.html> (accessed 21.07.2022)
31. Deighton I., Tibocha E., Dotsey P. MaxG basin temperature modelling using bottom hole temperature datasets. *Unconventional Resources Technology Conference*. Denver, Colorado, USA. 2014, pp. 273–288. DOI: <https://doi.org/10.15530/urtec-2014-1920520>
32. Kukkonen I.T., Rath V., Kivekäs L., Šafanda J., and Čermak V. Geothermal studies of the Outokumpu Deep Drill Hole, Finland: Vertical variation in heat flow and palaeoclimatic implications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, vol. 188, no. 1–2, pp. 9–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.06.002>
33. Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A. Reonstruchiy dolgovremennykh izmeneny teplovogo potoka cherez zemnyuy poverkhnost po dannym geothermia glubokikh skvazhin [Reconstructions of long-term changes in heat flow through the earth's surface according to the geothermia of deep wells]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 12, pp. 1841–1846. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15372/GiG20141211>
34. Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Antipin A.N. Geotermicheskii otsenki teplovogo regima v osnovaniyah pozdnepleistocenovskh lednikov shchitov. Chact. II. Scandinavian shchit [Geothermal estimates of the thermal regime at the bases of late Pleistocene ice sheets. Part II: Scandinavian Shield]. *Uralsky geophysicheskii vestnik – Ural Geophysical Bulletin*, 2018, no. 2(32), pp. 20–33. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25698/ugv.2018.2.3.20>
35. Rybach L. Determination of the heat production rate. *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 1988, pp. 125–142. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-2847-3>
36. Ruedas T. Radioactive heat production of six geologically important nuclides. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 3530–3541. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GC006997>
37. Glaznev V.N., Muravina O.M., Mints M.V., Chernyshova D.M. Teplogeneratchiya porod fundamenta tsentralnoy chasti Vostochno-Evropeyskogo kratona [Heat generation of basement rocks in the central part of the East European Craton]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 3, pp. 60–78. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3651>
38. Fuchs S., Norden B., International Heat Flow Commission. *The Global Heat Flow Database: Release 2021*. GFZ Data Services. DOI: <https://doi.org/10.5880/figeo.2021.01>

Глазнев Виктор Николаевич – Воронежский государственный университет, заведующий каф. геофизики; Геологический институт КНЦ РАН г. Апатиты, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук; e-mail: glaznev@geol.vsu.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1016-1866>

Козлов Николай Евгеньевич – Геологический институт КНЦ РАН г. Апатиты, директор, профессор, доктор геолого-минералогических наук; e-mail: kozlov@geoksc.apatity.ru

Сорохтин Николай Олегович – Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН г. Москва, гл. научный сотрудник; Геологический институт КНЦ РАН г. Апатиты, главный научный сотрудник доктор геолого-минералогических наук; e-mail: nsorokhtin@mail.ru

Жаворонкин Валерий Иванович – Воронежский государственный университет, доцент кафедры геофизики, кандидат геолого-минералогических наук; e-mail: vzhavoronkin@yandex.ru

Агаркова Мария Андреевна – Воронежский государственный университет, студент; e-mail: masha_agarkova03@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Victor N. Glaznev – Voronezh State University, head of the caf. Geophysics, Geological Institute of KSC RAS, Apatity, Chief Researcher, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; e-mail: glaznev@geol.vsu.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1016-1866>

Nikolay E. Kozlov – Geological Institute of KSC RAS, Apatity, Director, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; e-mail: kozlov@geoksc.apatity.ru

Nikolay O. Sorokhtin – Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Chief Researcher, Geological Institute of the KSC RAS, Apatity, Chief Researcher, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; e-mail: nsorokhtin@mail.ru

Valery I. Zhavoronkin – Voronezh State University, Associate Professor of the Geophysical Chair, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; e-mail: vzhavoronkin@yandex.ru

Maria A. Agarkova – Voronezh State University, student; e-mail: masha_agarkova03@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.