УДК 550.361

ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ «БЕЛОЕ ПЯТНО» НА НОВОЙ ЗЕМЛЕ ИСЧЕЗЛО С КАРТЫ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Никитин Д.С., Хуторской М.Д.
Геологический институт РАН, 119017, Москва, Россия
e-mail: ndsnomination@mail.ru

В результате измерения температуры в буровых скважинах на месторождении «Павловское» (арх. Новая Земля), определения теплопроводности горных пород из разрезов скважин и оценки радиогенной теплогенерации в интервале бурения рассчитан тепловой поток. Это первые определения теплового потока на архипелаге. Обсуждается структура теплового потока Новой Земли в аспекте сравнительного анализа с другими складчатыми палеозойскими поясами Северной Евразии.
Ключевые слова: тепловой поток, теплопроводность горных пород, архипелаг Новая Земля, геотермия.

GEOTHERMAL «BLANK SPOT» OF THE NEW LAND ELIMINATED FROM HEATFLOW MAP

Nikitin D.S., Khutorskoy M.D.
Geological Institute Russian Academy of Sciences, 119017, Moscow, Russia

The paper presents the first heat flow definitions on Russian archipelago Novaya Zemlya. They have been derived from temperature measurements in boreholes of the Pavlovskoye deposit and estimations of rocks' thermal conductivity and heat production inside the drilled interval. Heat flow structure of Novaya Zemlya archipelago is discussed in aspect of the comparative analysis with other Northern Eurasian Paleozoic fold belts.
Keywords: heat flow, thermal conductivity of rocks, archipelago Novaya Zemlya, geothermy.

Потребности экономики страны и истощение запасов природных ресурсов в освоенных районах объективно предопределяют увеличение интенсивности поисково-разведочных работ в арктической зоне РФ. В настоящее время арктический регион России становится самостоятельным объектом государственной политики в области недропользования. В этом регионе сосредоточены основные запасы ряда важнейших полезных ископаемых, которые являются определяющими для развития экономики страны.

В результате общей оценки минеральных ресурсов архипелага Новая Земля, проведенной Полярной морской геологоразведочной экспедицией совместно с ВНИИОкеанология (Каленич А.П., Гласс И.Д., Павлов Л.Г., Иванов Г.И. и др.) определены наиболее масштабные на сегодняшний день сырьевые объекты – это Рогачевско-Тайнинский марганцеворудный район и Безымянный рудный полиметаллический узел. Все это обусловило повышенный интерес отечественной и зарубежной горнорудной промышленности к архипелагу.

Разведочные работы, включавшие бурение нескольких относительно глубоких скважин, начались пятнадцать лет назад на Павловском свинцово-цинковом месторождении Безымянного полиметаллического узла. Оно расположено на северо-западе Южного острова архипелага Новая Земля в бассейне р. Безымянная в 16-18 км к востоку от ее впадения в Баренцево море (губа Безымянная) (рис. 1).

Исследуемый район расположен в зоне сочленения крупнейших разрывных структур Пайхойско-Новоземельской минерагенической провинции: Главного Новоземельского и Байдарацкого разломов. Месторождение локализуется в карбонатных отложениях грибовской свиты нижнего девона, слагающих юго-восточное крыло крупной Безымянской антиклинали, полого погружающейся под углами 25-45° в южном и юго-восточном направлениях [1].

В пределах месторождения установлены три структурно обособленные рудные залежи – Центральная, Восточная и Правобережная, сложенные линзовидными или лентовидными рудными телами внутри пластов пород рудовмещающей толщи. Внутреннее строение рудных тел характеризуется неравномерным распределением рудных минеральных агрегатов различных генераций и стадий: вкрапленной, прожилковой, брекчиевой и массивной текстуры, а также осложняется разноориентированными кварц-карбонатными жилами, швами брекчирования, разлинзования (будинирования) и рассланцевания вмещающих пород и руд (рис. 2).

Отмеченные структурно-геологические неоднородности разреза обусловили существование контрастных теплофизических комплексов. Этот факт нам предстояло учесть количественно при изучении термического режима и термической истории месторождения.

Теплофизические свойства горных пород всегда рассматриваются как важнейшие параметрические данные для геотермического изучения и моделирования осадочных бассейнов и складчатых поясов при оценке глубинных температур и плотности теплового потока. Прогнозные оценки температур горных пород важны при решении различных

Рис. 1. Схема расположения месторождения «Павловское» и Безымянного рудного полиметаллического узла
1 – Четвертичные отложения нерасчлененные (*Q*); 2 – Рейская свита ($D_{1\text{-}2}rs$). Базальты, туфы; 3 – Тайнинская свита ($D_{1\text{-}2}tn$). Аргиллиты, глинистые известняки, алевролиты; 4 – Грибовская свита нерасчлененная (D_1gr). Известняки глинистые и доломитистые, осадочные брекчии; 5 – Паньковская свита (S_2–D_1pn3). Верхняя пачка. Сланцы филлитовидные, песчаники кварцевые; 6 – Паньковская свита (S_2–D_1pn2). Средняя пачка. Песчаники кварцевые, алевролиты; 7 – Паньковская свита (S_2–D_1pn1). Нижняя пачка. Песчаники кварцевые; 8 – Дайки долеритов(D_3ks); 9 – Выход рудных тел на поверхность; 10 – Устья скважин; 11 – Разрывные нарушения; 12 – Безымянный рудный полиметаллический узел

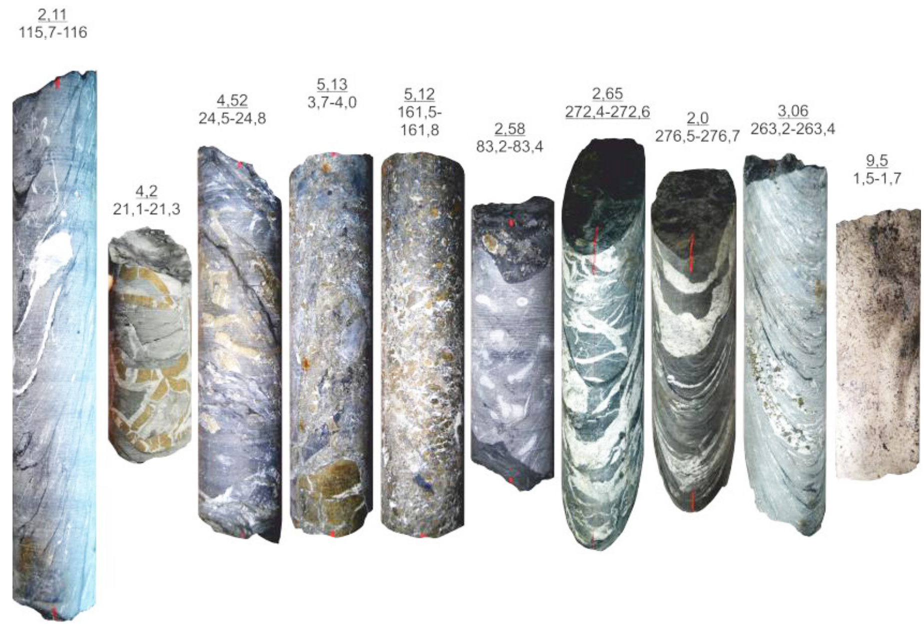

Рис. 2. Теплопроводность, Вт/(м·К) (в числителе) образцов керна горных пород из различных интервалов глубин (в знаменателе)

задач, связанных с использованием природных ресурсов, с оценкой фазового состояния глубинных геосфер, гидрогеологических особенностей недр, расчленения литологического разреза и для определения перспектив использования глубинного тепла в качестве альтернативного источника энергии.

Применение технических средств, обеспечивающих возможность массовых измерений теплопроводности образцов горных пород и руд [2,3], позволило приступить к детальным геотермическим исследованиям различных геологических объектов, включая рудные месторождения.

Определение коэффициента теплопроводности горных пород проводилось по образцам кернового материала методом оптического сканирования (МОС) при помощи новой установки ТС14, разработанной и сконструированной в лаборатории тепломассопереноса Геологического института РАН (г. Москва) (рис. 3) [2].

Установка ТС14 позволяет измерять теплопроводность горных пород в диапазоне 0.2-50.0 Вт/(м·К) с погрешностью не более ±3-5%. МОС способен обнаруживать структурные неоднородности и минералогические микровключения, отличающиеся по теплопроводности от вмещающей породы (рис. 4).

Цикл измерений состоял из бесконтактного нагрева движущимся источником тепловой энергии двух эталонов плавленого кварца КВ-1 и нескольких исследуемых образцов керна; измеренная инфракрасным пирометром «избыточная температура» в точке нагрева обратно пропорциональна теплопроводности исследуемого образца. Коэффициент пропорциональности рассчитывается с помощью обработки данных измерения эталонов. При помощи установки ТС14 были изучены основные теплофизические характеристики горных пород свинцово-цинкового месторождения «Павловское» (табл. 1, 2).

Образцы были отобраны из двух скважин СГ-5 (глубина 493.1 м.) и СГ-3 (глубина 175.0 м.). Общая выборка составила 165 образцов.

В разрезе месторождения вскрыты девонские аргиллиты и известняки, осложненные присутствием крупных включений метасоматитов. Они характеризуются неравномерным прожилковым вкраплением рудных минералов: галенита, сфалерита и пирита.

Анализ значений k_{max}, k_{mean} и k_{min} показывает, что в разрезе скважин по теплофизическим свойствам выделяются именно эти структурно-теплофизические комплексы, имеющие контрастную теплопроводность (см. табл. 1, 2). Это аргиллиты (диапазон изменения теплопроводности – от 1.18 до 3.50 Вт/(м·К)), известняки (диапазон изменения теплопроводности – от 2.07 до 3.97 Вт/(м·К)) и метасоматиты (k_{mean}>4 Вт/(м·К)).

Для первых двух комплексов коэффициент тепловой неоднородности:

$$\beta = k_{mean}/(k_{max} - k_{min})$$

изменяется в пределах 20-30%, в отличие от

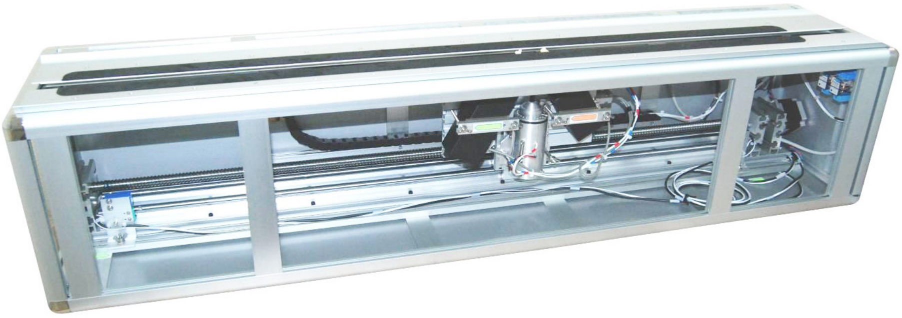

Рис. 3. Установка ТС14 для измерения теплофизических свойств горных пород

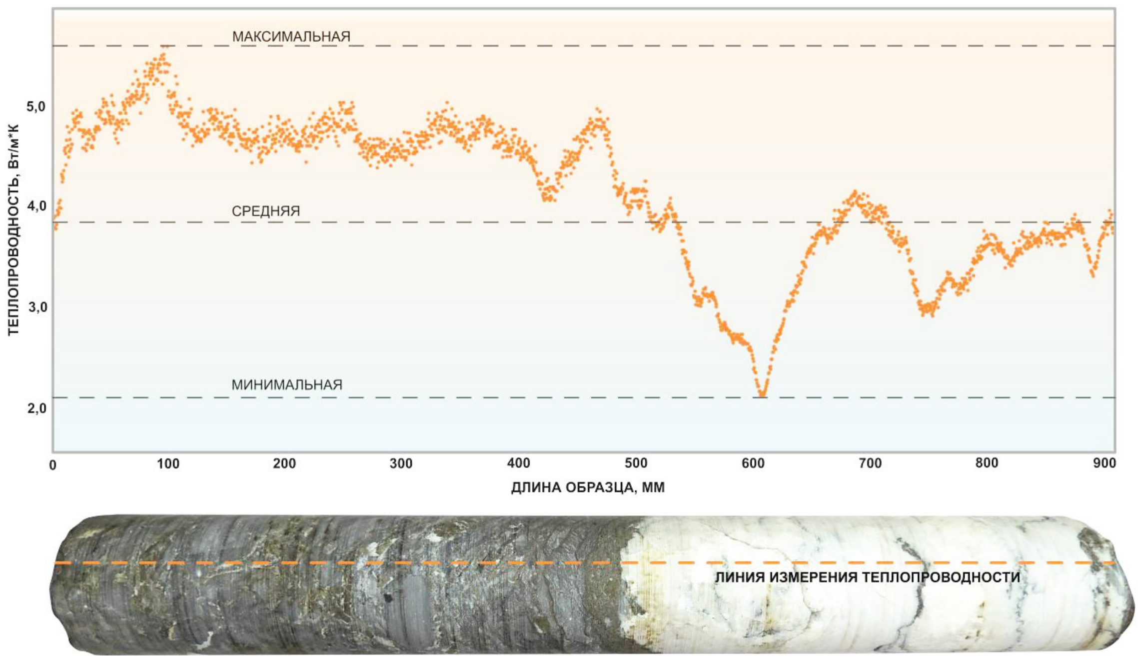

Рис. 4. Пример измерения теплопроводности (СГ-3, интервал 31.1-31.6 м)

Таблица 1

Результаты изучения теплофизических свойств горных пород по скв СГ-3

Глубина, м		Описание породы	Геол индекс	Интервал опробования, м		Теплопроводность (k), Вт/(м·К)			Дисперсия	Тепловая неоднородность, β
от	до			от	до	k, mean	k, max	k, min		
2.5	13.7	Руды брекчиевидно-пятнистые до массивных (40-60%), очень прочные, очень плотные, морозные, галенит-сфалерит-пиритовые с кремнисто-карбонатной матрицей. Породы невыветрелые. Нижний контакт по трещине под углом 30 к о.к.	D1gr4	3.7	4	5.14	7.51	3.20	0.71	0.84
				8.2	8.4	5.83	7.58	4.08	0.92	0.60
				11.7	12	6.28	7.38	5.00	0.30	0.38
15.7	19.4	Руды галенит-сфалерит-пиритовые с кремнисто-карбонатной матрицей (сульфидов от 40 до 60%). Породы морозные, очень прочные, очень плотные, невыветрелые. Нижний контакт раздроблен.	D1gr4	16.5	16.7	3.97	4.96	2.64	0.26	0.58
20.2	32.3	Руды галенит-сфалерит-пиритовые с углеродисто-кремнисто-карбонатной матрицей (сульфидов 30-50%). Породы морозные, очень прочные, очень плотные, невыветрелые. Нижний контакт по трещине под углом 60 к о.к.	D1gr4	20.4	20.7	4.87	6.30	3.64	0.38	0.54
				24.5	24.8	4.53	6.93	3.46	0.61	0.77
				30.7	30.9	4.00	4.95	2.27	0.28	0.67
32.6	37.8	Руды прожилково-сетчатые, морозные, очень прочные, очень плотные. сфалерит-пиритовые (сульфидов 30-40%), с реликтами доломитизированных известняков. составляющих 15-20% от объема. Нижний контакт по трещине под углом 70 к о.к.	D1gr4	33.1	33.5	4.11	5.60	2.13	0.54	0.85
				36.1	36.4	5.26	14.09	3.45	0.57	2.02
37.8	42.4	Известняки органогенные, пелитоморфные, темно-серого цвета, массивные, морозные, очень прочные, очень плотные, углеродсодержащие по массе. Вкрапленная минерализация сульфидов 5-7% от объема. Грунт морозный. Нижний контакт по трещине под углом 50 к о.к.	D1gr4	39.8	40.1	3.66	4.28	3.11	0.06	0.71
44.3	50.3	Руды брекчиевидно-пятнистые до массивных, морозные, очень прочные, очень плотные, галенит-сфалерит-пиритовые с углеродисто-кремнисто-карбонатной матрицей (сульфидов 30-70%). Породы невыветрелые. Нижний контакт по трещине под углом 75 к о.к.	D1gr4	45.4	45.6	5.69	6.26	5.15	0.04	0.20

Таблица 1 (продолжение)

50.9	80	Руды брекчиевидно-пятнистые до массивных, морозные, очень прочные, очень плотные, галенит-сфалерит-пиритовые с углеродисто-кремнисто-карбонатной матрицей (сульфидов 30-70%). Породы невыветрелые. Нижний контакт по трещине под углом 55 к о.к.	D1gr4	51.6	51.8	5.11	5.82	4.63	0.05	0.23
				56.2	56.4	5.77	6.57	4.93	0.94	0.28
				61.4	61.6	10.64	14.99	8.51	1.18	0.61
				67.4	67.6	6.97	8.24	5.69	0.21	0.37
				72.7	73.2	4.04	4.97	3.28	0.11	0.42
				79.2	79.6	6.21	8.35	4.41	0.47	0.63
82.3	88.2	Известняки органогенные пелитоморфные, морозные, очень прочные, плотные, серые, массивные, углеродсодержащие по массе. Сульфидов 1-2%. Породы невыветрелые. Грунт морозный. Нижний контакт по трещине под углом 40 к о.к.	D1gr4	83.2	83.4	2.58	4.04	1.99	0.28	0.79
88.4	101.6	Известняки органогенные пелитоморфные темно-серого цвета, массивные. Породы невыветрелые, очень прочные, плотные. Грунт морозный. Нижний контакт нечеткий. извилистый по углом 15 к о.к.	D1gr4	88.4	88.6	2.21	2.47	1.94	0.00	0.24
				93.1	93.4	2.14	2.44	1.85	0.03	0.28
				100.5	100.8	2.33	2.54	2.14	0.01	0.17
101.6	125.9	Известняки органогенные пелитоморфные, морозные, прочные, плотные, невыветрелые, темно-серые до черного цвета, линзовидно-слоистой под углом 5-20 к о.к. текстуры. Нижний контакт извилистый под углом 20 к о.к.	D1gr4	105.5	105.8	2.09	2.36	1.83	0.01	0.25
				111.2	111.4	2.06	2.54	1.35	0.06	0.58
				115.7	116	2.11	2.32	1.86	0.01	0.22
				123.7	124	2.15	2.49	1.68	0.03	0.37
125.9	140.6	Известняки органогенные пелитоморфные темно-серые, массивные, углеродсодержащие по массе. Породы невыветрелые, очень прочные, плотные. Грунт морозный. Нижний контакт нечеткий. извилистый по углом 15 к о.к.	D1gr4	129.2	129.5	2.10	2.43	1.80	0.02	0.30
				135	135.3	2.16	2.47	1.98	0.01	0.22
				137.2	137.4	2.69	2.94	2.49	0.01	0.17
140.8	144.6	Известняки органогенные пелитоморфные, морозные, очень прочные, очень плотные, невыветрелые, темно-серые, массивные. Вкрапленная минерализация сульфидов 2-3% от объема. Нижний контакт по трещине по углом 15 к о.к.	D1gr4	143.7	143.9	2.56	3.42	2.13	0.07	0.50
149.7	157.4	Руды брекчиевидно-пятнистые до массивных, галенит-сфалерит-пиритовые с углеродисто-кремнисто-карбонатной матрицей (сульфидов 30-70%). Породы невыветрелые, очень прочные, очень плотные. Грунт морозный. Нижний контакт под углом 15-20 к о.к.	D1gr4	150.3	150.6	5.27	7.31	2.93	0.65	0.83
				155.7	156	3.01	3.62	2.50	0.07	0.37

Таблица 1 (продолжение)

158.7	159.6	Брекчии по органогенным известнякам серые до темно-серого цвета. Цемент пирит-кварц-карбонатный. углеродистый, составляет 10-20% от объема. Порода невыветрелая, прочная, плотная. Грунт морозный. Нижний контакт по трещине под углом 30 к о.к.	D1gr4	159.5	159.7	2.74	3.22	2.36	0.05	0.31
160.4	166.4	Руды брекчиевидно-пятнистые до массивных, галенит-сфалерит-пиритовые с углеродисто-кремнисто-карбонатной матрицей (сульфидов 30-70%). Породы невыветрелые, очень прочные, плотные. Грунт морозный. Нижний контакт по трещине под углом 50 к о.к.	D1gr4	161.5	161.8	5.12	7.33	3.82	0.29	0.68
				164.5	164.7	6.14	9.19	3.95	0.99	0.85
169.1	170.5	Зона дробления руд. Щебенистый с глыбами. морозный грунт. Зона дробления брекчиевидно-пятнистых и массивных, галенит-сфалерит-пиритового состава на углеродисто-кремнисто-карбонатной матрице. Нижний контакт раздроблен.	D1gr4	170.1	170.3	5.00	6.41	4.03	0.27	0.48
170.5	174.4	Руды брекчиевидно-пятнистые до массивных, галенит-сфалерит-пиритовые с углеродисто-кремнисто-карбонатной матрицей (сульфидов 30-70%). Породы невыветрелые, очень прочные, очень плотные. Грунт морозный, Нижний контакт по трещине под углом 45 к о.к.	D1gr4	173.5	173.8	8.11	10.55	6.11	0.65	0.55
				174.2	174.4	5.04	7.45	3.25	0.65	0.83
176.1	179.2	Известняки органогенные, пелитоморфные, серые до темно-серого цвета, массивные, углеродсодержащие по массе, сульфидов 3-4%. Порода невыветрелая, очень прочная, плотная. Грунт морозный. Нижний контакт по трещине под углом 45 к о.к.	D1gr4	176.2	176.3	2.30	2.62	2.06	0.03	0.24

Таблица 2

Результаты изучения теплофизических свойств горных пород по скв СГ-5

Глубина, м		Описание породы	Геол. индекс	Интервал опробования, м		Теплопроводность (*k*), Вт/м·К)			Дисперсия	Тепловая неоднородность, β
от	до			от	до	*k*, mean	*k*, max	*k*, min		
3.0	7.0	аргиллит черный углистый рассланцованный, морозный, очень прочный, плотный, невыветрелый, участками массивный, с прожилками кальцита, по поверхности трещин графит, контакт с нижележащими по степени трещиноватости.	D1-2tn	6.8	7	1.70	1.81	1.59	0.00	0.13
7.0	19.0	аргиллит черный углистый рассланцованный, морозный, прочный, плотный, невыветрелый, участками массивный, с прожилками кальцита, контакт с нижележащими по трещиноватости.	D1-2tn	9.8	10	1.92	2.03	1.84	0.00	0.10
				14	14.2	1.68	1.93	1.47	0.02	0.28
				16	16.2	1.74	1.99	1.52	0.01	0.27
20.2	25.0	аргиллит черный, углистый, невыветрелый, массивный, морозный, прочный, плотный, с прожилками кальцита, контакт с нижележащими по степени трещиноватости.	D1-2tn	21.8	22	2.48	2.70	2.33	0.01	0.15
				23.5	23.7	2.01	2.14	1.86	0.00	0.14
				24.3	24.4	3.09	3.46	2.82	0.03	0.20
25.8	33.3	аргиллит чёрный. полосчатый, углистый, морозный, очень прочный, плотный, по отдельным крутопадающим трещинам зеркала скольжения, выполнеые графитом. Контакт с нижележащими по трещиноватости.	D1-2tn	27	27.2	2.22	2.33	2.10	0.00	0.10
				30.8	31	2.39	2.55	2.02	0.00	0.22
				31.6	31.8	1.65	1.74	1.55	0.00	0.12
34.4	40.0	аргиллит чёрный, полосчатый, углистый, морозный, очень прочный, плотный. Контакт с нижележащими по трещиноватости.	D1-2tn	37.8	38	1.95	2.10	1.82	0.00	0.14
40.0	62.5	аргиллит чёрный, массивный, углистый, морозный, очень прочный, плотный. Нижний контакт, по изменению количества Q-CA прожилков, в сторону увеличения их в нижележащих породах.	D1-2tn	41.2	41.4	2.42	3.04	1.91	0.10	0.47
				44	44.2	2.05	2.35	1.90	0.01	0.22
				48.8	49	1.96	2.09	1.85	0.00	0.12
				51.6	51.8	1.82	2.05	1.61	0.01	0.24
				52.6	52.8	1.93	2.14	1.68	0.00	0.24
				62	62.2	1.18	1.21	1.08	0.00	0.11
				62.2	64.4	2.53	2.82	2.24	0.01	0.23
62.5	70.1	аргилит тёмно-серый до чёрного, известковистый, плойчатой текстуры, морозный, очень прочный, плотный, по сколам крутопадающих трещин (70-90° грд к о.к.) зеркала скольжения, выполненные графитом.	D1-2tn	68.5	68.7	3.59	4.30	3.06	0.07	0.35
70.1	73.2	Известняк пелитоморфный. чёрный, глинистый, массивный, морозный, очень прочный, очень плотный, участками тонкослоистый с прожилками кальцита, редко пирита, контакт с нижележащими по изменению текстуры.	D1-2tn	71	71.2	2.09	2.20	2.01	0.00	0.09

Таблица 2 (продолжение)

73.2	81.5	Известняк пелитоморфный глинистый, тонкополосчатый под углом 60° к оси керна, тёмно-серый и чёрный, морозный, очень прочный, очень плотный, с прожилками кальцита, редко пирита, контакт с нижележащими по степени трещиноватости.	D1-2tn	77.6	77.8	2.64	3.35	2.11	0.08	0.47
81.5	83.7	Зона дробления. Щебенистый грунт, с морозными глыбами. Дробление черных расланцованных известковых аргиллитов, контакт с нижележащими по степени трещиноватости.	D1-2tn	83.6	83.8	2.02	2.21	1.90	0.01	0.15
83.7	91.8	Тонкое переслаивание известняков глинистых и аргиллитов известковых, с прожилками кальцита, участками рассланцованное, породы морозные, очень прочные, плотные, контакт с нижележащими породами нечёткий, по степени карбонатизации.	D1gr	88.4	88.6	3.10	3.56	2.60	0.05	0.31
91.8	111.3	Известняк глинистый, массивный пелитоморфный, морозный, очень прочный, плотный, с большим количеством органических остатков с прожилками кальцита, контакт с нижележащими по степени трещиноватости.	D1gr	92.8	93	2.75	2.83	2.66	0.00	0.06
				99	99.2	2.87	4.73	2.26	2.87	0.86
				107.4	107.6	2.31	2.69	1.96	0.04	0.32
				110.3	110.5	2.02	2.20	1.92	0.00	0.14
119.5	123.4	Брекчия тектоническая по известнякам слабоглинистым доломитистым, соотношение обломки/цемент 80/20, морозная, очень прочная, очень плотная, нижний контакт раздроблен при укладке керна.	D1gr	121.6	121.8	3.36	3.82	2.98	0.03	0.25
123.4	130.8	Известняк серый, пелитоморфный, массивный, морозный, очень прочный, плотный, с кварц-карбонатными прожилками мощностью до 5см. Контакт с нижележащими постепенный.	D1gr	126.4	126.6	2.68	2.83	2.55	0.00	0.11
				130.6	130.8	2.58	2.73	2.43	0.00	0.12
131.8	148.4	Известняк серый, пелитоморфный, массивный, морозный, очень прочный, плотный, с многочислеными кварц-карбонатными прожилками мощностью до 5 см. Контакт с нижележащими постепенный.	D1gr	134.2	134.4	3.69	4.44	3.14	0.07	0.35
				138.2	138.4	3.24	3.45	3.06	0.00	0.12
				141.2	141.4	1.39	1.62	1.19	0.01	0.31
				143.8	144	3.00	3.35	2.71	0.02	0.21
				146.8	147	2.94	3.13	2.66	0.01	0.16
148.4	156.6	Известняк серый, слабоглинистый, пелитоморфный, массивный, морозный, очень прочный, плотный. Контакт с нижележащими по изменению трещиноватости.	D1gr	149.8	150	3.54	3.86	3.24	0.02	0.18
				151.6	151.8	3.23	3.39	2.98	0.01	0.13
				153.7	153.9	3.44	3.59	3.25	0.00	0.10
				156.4	156.6	3.29	3.52	3.01	0.01	0.15
158.0	174.3	Известняк серый. пелитоморфный, массивный, морозный, очень прочный, плотный с небольшим количеством кварц-карбонатных прожилков, мощностью до 5 см. Контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	159.8	160	2.75	3.17	2.30	0.04	0.32
				165.8	166	2.54	2.64	2.41	0.00	0.09
				171.8	172	3.66	4.12	3.33	0.02	0.22

Таблица 2 (продолжение)

174.3	177.3	Известняк глинистый, массивный, морозный, очень прочный, плотный, слабо-рассланцованный, пелитоморфный, контакт с нижележащими постепенный.	D1gr	174.4	174.6	3.08	3.27	2.93	0.01	0.11
				176.2	176.4	2.92	4.98	1.69	0.67	1.13
177.3	187.6	Аргиллит известковистый, морозный, прочный, плотный, тонкослоистый, рассланцованный (в основном по слоистости под углом около 40 к.о.к). Контакт с нижележащими постепенный.	D1gr	182	182.2	2.05	2.25	1.74	0.02	0.25
				185.4	185.6	1.84	2.11	1.70	0.01	0.22
				187.4	187.6	2.01	2.10	1.91	0.00	0.10
189.4	207.4	Аргиллит черный углистый, морозный, прочный, плотный, сланцеватый, по трещинам скола – зеркала скольжения, выполненные графитом, контакт с нижележащими по изменению состава породы.	D1gr	189.8	190	2.06	2.20	1.92	0.00	0.14
				192.6	192.8	2.15	2.30	2.05	0.00	0.12
				195.4	195.6	1.38	1.79	1.03	0.01	0.55
				198.4	198.6	1.92	2.31	1.03	0.06	0.67
				202.3	202.5	1.96	2.10	1.86	0.00	0.12
				205.4	205.6	1.99	2.19	1.78	0.01	0.21
207.4	209.1	Брекчия тектоническая по известнякам, морозная, очень прочная, плотная. Известняки слабоглинистые, доломитистые, соотношение обломки/цемент 90/10, контакт с нижележащими по брекчированию.	D1gr	207.8	208	2.73	2.90	2.51	0.01	0.14
209.1	211.5	Зона повышенной трещиноватости по чёрным, массивным известнякам. Щебенистый, морозный грунт с глыбами. Контакт с нижележащими по степени разрушенности.	D1gr	210.4	210.6	2.04	2.31	1.79	0.01	0.26
212.1	222.4	Брекчия тектоническая по известнякам доломитистым, морозная, очень прочная, плотная, цемент – кварц-карбонатный, реже глинистый, редко-пирит, соотношение обломки/цемент 80-90/20-10%. Контакт с нижележащими по брекчированию.	D1gr	214.4	214.6	3.17	3.50	2.74	0.02	0.24
				218.6	218.8	3.77	4.03	3.48	0.02	0.15
				220.2	220.4	3.47	5.13	2.75	0.34	0.69
222.4	224.8	Известняк черный глинистый, пелитоморфный, массивный, морозный, прочный, плотный. Контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	222.6	222.8	3.06	3.28	2.84	0.01	0.14
224.8	233.2	Зона дробления. Щебенистый, морозный грунт с глыбами аргиллитов чёрных, углистых, рассланцованых, по трещинам скола – зеркала скольжения, выполненные графитом, контакт с нижележащими по изменению состава породы.	D1gr	228.8	229	1.82	2.03	1.64	0.01	0.21
233.2	235.6	Брекчия тектоническая по известняку, доломитистому, цемент кварц-карбонатный. соотношение обломки/цемент 90/10%. порода морозная, очень прочная, плотная, контакт с нижележащими по брекчированию.	D1gr	234.8	235	2.59	3.06	2.14	0.03	0.36

Таблица 2 (продолжение)

235.6	239.8	Известняк черный, глинистый, массивный, морозный, прочный, плотный, пелитоморфный, контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	236.6	236.8	4.03	5.17	2.91	0.24	0.56
				237.4	237.6	2.30	2.65	1.93	0.02	0.32
240.4	246.3	Переслаивание известняков с аргиллитами, грунты морозные, очень прочные, плотные с вкрапленностью пирита, контакт с нижележащими постепенный.	D1gr	240.4	240.6	2.64	3.50	1.78	0.13	0.65
				244.6	244.8	2.51	3.01	2.18	0.03	0.33
246.3	254.8	Переслаивание известняков с аргиллитами, с остатками фауны, порода рассланцована, с "гнездами" пирита (до 5-7%), порода морозная, прочная, плотная, углистая, контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	247.3	247.6	2.47	2.74	2.08	0.03	0.27
				249.6	249.8	3.19	3.66	2.79	0.05	0.27
				252.8	253	2.88	3.20	2.57	0.02	0.22
254.8	258.4	Брекчия тектоническая по известнякам, морозная, очень прочная, плотная. Известняки доломитистые, цемент – кварц-карбонатный, соотношение обломки/цемент 90/10%, контакт с нижележащими по брекчированию.	D1gr	255.8	256	3.54	4.21	3.12	0.05	0.31
258.4	260.2	Известняк слабоглинистый. пелитоморфный, доломитистый, морозный, очень прочный, плотный, с кварц-карбонатными прожилками(мощн.до 3см). контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	258.8	259	2.69	2.90	2.30	0.02	0.22
260.2	265.0	Тонкое переслаивание известняков с аргиллитами, с редкими остатками фауны, порода морозная, прочная, плотная, умеренно рассланцована, с вкрапленностью пирита, углистая, контакт с нижележащими по смене породы и степени рассланцевания.	D1gr	261.2	261.4	2.02	2.20	1.84	0.01	0.18
				263.2	263.4	3.06	4.27	2.43	0.33	0.60
265.0	293.4	Зона дробления аргиллитов чёрных, углистых. Щебенистый, морозный грунт, с глыбами. Аргиллит рассланцованный, с прожилкаими кальцита, с прослойками глинистого известняка, контакт с нижележащими по рассланцеванию.	D1gr	267.5	267.7	2.50	2.62	2.41	0.00	0.08
				270.2	270.4	2.59	2.74	2.46	0.00	0.11
				272.4	272.6	2.65	2.86	2.47	0.01	0.15
				275.8	276	2.08	2.46	1.56	0.04	0.44
				276.5	276.7	2.00	2.59	1.29	0.29	0.65
				280	280.2	2.80	2.95	2.65	0.00	0.11
				283	283.2	3.02	3.50	2.75	0.02	0.25
				286.6	286.8	3.26	4.15	2.68	0.16	0.45
				288.4	288.6	2.16	2.25	2.05	0.00	0.09
293.4	300.4	Переслаивание известняков пелитоморфных брекчированных и аргиллитов черных углистых, с остатками фауны. Порода морозная, очень прочная, плотная, с вкрапленностью пирита, контакт с нижележащими постепенный.	D1gr	294.4	294.6	2.59	2.90	2.33	0.01	0.22
				294.6	294.8	3.50	4.10	2.73	0.10	0.39
				297.8	298	2.51	3.19	1.85	0.11	0.54
300.4	307.0	Известняк будинированный (брекчированный) серый, пелитоморфный, морозный, очень прочный, плотный, цемент-известняк глинистый темно-серый, кальцит, реже кварц, соотношение обломки/известняк 50/50. порода с редкими "гнездами" пирита.	D1gr	300.4	300.6	2.39	2.85	2.10	0.03	0.31

Таблица 2 (продолжение)

307.0	330.0	Известняк серый, будинированный (участками брекчированный) пелитоморфный, морозный, прочный, плотный, в участках брекчирования цемент в основном – кальцит, контакт с нижележащими по брекчированию.	D1gr	311.2	311.4	2.76	3.84	2.20	0.11	0.60
				319.8	320	2.44	2.61	2.28	0.00	0.14
				328	328.2	2.19	2.32	2.09	0.00	0.11
334.6	335.5	Брекчия тектоническая, морозная, прочная, очень плотная, обломки – аргиллит, пирит, цемент-кальцит, соотношение обломки/цемент 40/60. Контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	335	335.2	2.25	2.34	2.15	0.00	0.08
335.5	349.6	Аргиллит чёрный, углистый, сланцеватый, морозный, прочный, плотный, слоистый (за счет прожилков кальцита), известковистый, контакт с нижележащими по степени трещиноватости.	D1gr	338.4	338.6	2.50	2.76	2.27	0.01	0.20
				343.3	343.5	1.77	1.94	1.60	0.01	0.19
				348.8	349	2.00	2.13	1.85	0.00	0.14
349.6	356.8	Зона дробления. Щебенистый, морозный грунт. Дробление по аргиллитам чёрным углистым, слоистым, контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	356	356.2	4.55	5.99	3.88	0.18	0.46
356.8	366.4	Известняк будинированный (участками брекчированный) пелитоморфный, серый, морозный, прочный, плотный, в участках брекчирования цемент-кальцит, контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	363.4	363.6	2.14	2.26	1.99	0.00	0.13
				365	365.2	2.28	2.33	2.23	0.00	0.05
366.4	367.6	Известняк серый, пелитоморфный, массивный, морозный, прочный, плотный, слабоглинистый, контакт с нижележащими по степени трещиноватости.	D1gr	367.3	367.5	2.41	2.59	2.21	0.01	0.16
369.4	388.6	Известняк серый, слоистый (за счет прослойков аргиллита черного), будинированый, пелитоморфный, морозный, прочный, плотный, с прожилками кальцита, контакт с нижележащими постепенный.	D1gr	369.8	370	1.98	2.12	1.84	0.00	0.15
				371.2	371.6	2.24	2.51	2.04	0.01	0.21
				375	375.2	1.89	2.08	1.79	0.00	0.15
				379.2	379.4	2.74	2.93	2.55	0.00	0.14
				385.4	385.6	2.17	2.30	1.96	0.01	0.16
388.6	423.8	Переслаивание пелитоморфных известняков с аргиллитами. Порода морозная, прочная, плотная, рассланцованная с кварц-карбонатными прожилками мощностью до 20 см. контакт с нижележащими по составу породы.	D1gr	388.6	388.8	1.99	2.21	1.80	0.00	0.21
				392.6	392.8	1.55	1.91	1.28	0.02	0.41
				396.2	396.4	1.77	1.96	1.54	0.01	0.24
				396.4	396.6	1.99	2.13	1.78	0.00	0.17
				398.6	398.8	2.15	2.26	2.02	0.00	0.11
				400.6	401	2.13	2.36	1.98	0.01	0.18
				405.2	405.4	2.10	2.38	1.72	0.02	0.31
				409.6	410	2.80	3.01	2.57	0.01	0.16
				412.8	413	1.68	1.77	1.46	0.00	0.18
				415.3	415.5	2.25	2.36	2.16	0.00	0.09
				418	418.2	2.21	2.31	2.13	0.00	0.08
				421.1	421.3	2.40	2.58	2.26	0.01	0.14
423.8	428.8	Известняк серый, массивный, пелитоморфный, морозный, прочный, плотный, слабоглинистый в нижней части с прожилками кальцита, контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	425.2	425.6	2.02	2.10	1.96	0.01	0.07
				427.9	428.2	2.38	2.57	2.21	0.01	0.15

Таблица 2 (продолжение)

428.8	438.4	Зона дробления по брекчиям тектоническим. Щебенистый, морозный грунт с заполнителем глиной, песком, супесью (до 7%). Контакт с нижележащими по разрушенности.	D1gr	432.6	432.8	2.02	2.33	1.67	0.03	0.32
				436.6	436.8	2.02	2.28	1.81	0.01	0.23
438.4	441.4	Зона дробления. Щебенистый, морозный грунт. Дробление по аргиллитам чёрным, углистым, рассланцевание под углом 70 к.о.к. контакт с нижележащими по углу рассланцевания.	D1gr	439.8	440	2.72	2.85	2.61	0.00	0.09
444.6	446.8	Зона дробления. Щебенистый, морозный грунт. Дробление по брекчированным известнякам с заполнителем-глиной, супесью (до 30%), контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	445.2	445.4	2.13	2.21	2.04	0.00	0.08
446.8	451.0	Зона дробления. Щебенистый, морозный грунт. Дробление по чёрному углистому известковистому аргиллиту, с зеркалами скольжения по трещинам скола, выполненными графитом, контакт с нижележащими по степени трещиноватости.	D1gr	450.2	450.4	2.47	2.89	2.22	0.02	0.27
451.0	467.0	Частое тонкое переслаивание известняков пелитоморфных и аргиллитов чёрных углистых, породы морозные, прочные, плотные, с прожилками кальцита, контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	461.2	461.4	2.13	2.19	2.07	0.00	0.05
				465.4	465.6	2.00	2.09	1.91	0.00	0.09
469.0	481.1	Известняк серый, массивный, пелитоморфный, морозный, прочный, плотный, с большим количеством кварц-карбонатных прожилков, участками брекчированный, контакт с нижележащими по смене породы.	D1gr	475	475.2	2.68	2.92	2.42	0.01	0.19
				475.2	475.4	1.55	1.62	1.48	0.00	0.09
481.1	493.0	Частое тонкое переслаивание известняков пелитоморфных и аргиллитов черных углистых, породы морозные, прочные, плотные с прожилками кальцита.	D1gr	485.2	485.4	2.63	3.01	2.22	0.04	0.30
				489.7	489.9	2.01	2.19	1.86	0.01	0.16
				491.8	492	1.45	1.82	1.18	0.03	0.44

метасоматитов, содержащих рудные компоненты, где β нередко превышает 100% (рис. 5).

При стационарном геотермическом режиме и отсутствии искажений за счет рельефа и структурно-геологических неоднородностей тепловой поток не зависит от глубины измерений и, таким образом, является характеристикой географического пункта.

Но из-за раздельного измерения геотермического градиента и теплопроводности при расчете теплового потока возможны несколько вариантов тренда геотермического градиента и теплопроводности по глубине.

Обработка данных по скважине СГ-5 показала, что геотермический градиент изменчив на разных интервалах глубин, но статистически значимый тренд зависимости температурного градиента от глубины не наблюдается. Изменчива также и теплопроводность, но без видимой закономерности (см. рис.5). В этом случае тепловой поток следует вычислять как произведение средневзвешенного градиента на средневзвешенную теплопроводность на каждом глубинном интервале:

$$q=(\sum G_i z_i \cdot \sum k_i z_i)/\sum z_i^2,$$

где i – номер слоя, в котором измерен геотермический градиент и средняя теплопроводность.

Геотермический градиент по скважине СГ-5 изменяется незначительно (от 17 до 19 мК/м). Учитывая представительность контрастных теплофизических комплексов, исключив из рассмотрения

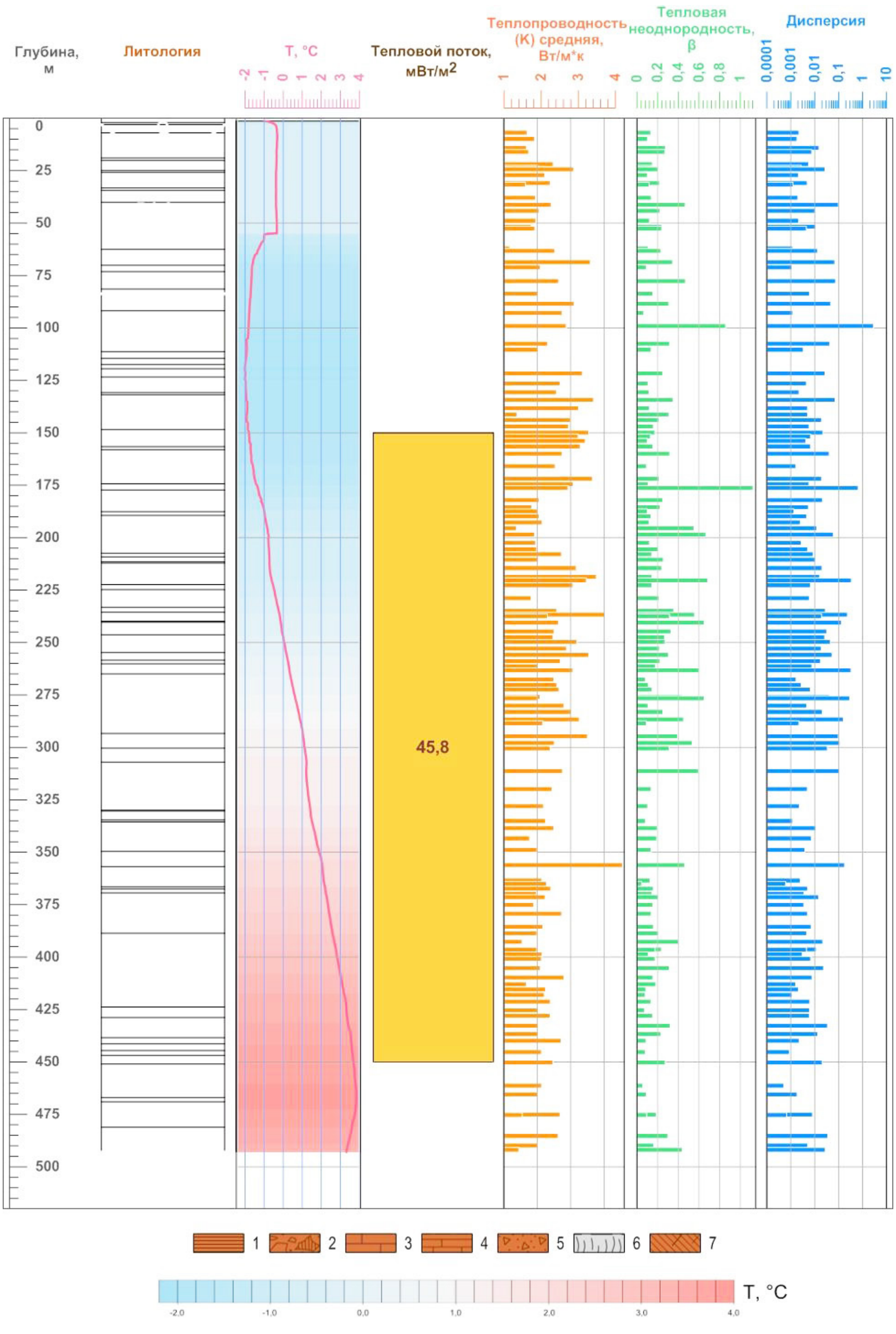

Рис. 5. Результаты геотермических измерений по скважине СГ-5.
1 – Аргиллит черный углистый рассланцованный, морозный, прочный, плотный; 2 – Известняк пелитоморфный, чёрный, глинистый, массивный, морозный, очень прочный, очень плотный; 3 – Щебенистый грунт с отдельными морозными валунами. Заполнитель песок, супесь, суглинок в кол-ве 15-20% объёма; 4 – Зона дробления. Щебенистый, морозный грунт с отдельными глыбами. Дробление по аргиллитам, чёрным, массивным, углистым, с зеркалами скольжения;
5 – Брекчия тектоническая по известнякам слабоглинистым доломитистым, соотношение обломки/цемент 80/20, морозная, очень прочная, очень плотная; 6 – Тонкое переслаивание известняков глинистых и аргиллитов известковых, с прожилками кальцита, участками рассланцованное, породы морозные, очень прочные, плотные; 7 – Дресвяный грунт с редким щебнем, заполнитель (30% объёма) песок, супесь, суглинок

участки сплошной рудной вкрапленности с «ураганной» теплопроводностью, нами по вышеприведенной формуле рассчитан тепловой поток. Он составил q=46±4 мВт/м^2 (рис. 5).

Заметим, что это первая оценка плотности теплового потока на архипелаге Новая Земля. Пока рано проводить какие-то обоснованные межрегиональные сопоставления. Но характерно то, что это значение меньше, чем тепловой поток в смежных структурах Баренцева моря – Лунинской седловине и Прогибе Седова (соответственно, 55 и 53 мВт/м^2) [4,6]. Понижение теплового потока на Новой Земле (до 46 мВт/м^2) так же, как и на Урале, можно объяснить экранированием глубинного теплового потока аллохтонной литосферной пластиной, надвинутой со стороны палеоокеана при его закрытии в позднем палеозое [4].

Структура теплового потока, т.е. соотношение радиогенной его компоненты, формирующейся, главным образом, в земной коре при распаде долгоживущих изотопов ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K, и мантийной компоненты, происхождение которой обусловлено не только радиоактивным распадом, но и другими экзотермическими процессами (например, переходом гравигенной энергии дифференциации вещества в тепло), можно выяснить только при наличии глубоких и сверхглубоких скважин и информации о строении коры.

Регион Новой Земли находится на начальной стадии изучения геотермического поля. Поэтому пока рано говорить об итогах изучения структуры теплового потока. В этой работе мы приводим первый, но важный результат для оценки величины корового (радиогенного) теплового потока – определение концентрации долгоживущих изотопов в образцах керна месторождения (60 проб).

Анализ порошковых проб был выполнен рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре «S4 Pioneer» в аккредитованной лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН. Из полученных в результате анализа валовых концентраций U, Th, K были вычислены концентрации основных теплогенерирующих изотопов ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K, исходя из предположения, что изотопы распространены в природе следующим образом: ^{238}U – 99.27% от общего U, ^{232}Th – 100%, ^{40}K – 0.0117% от общего K.

Теплогенерация в приповерхностном слое (в интервале бурения скважин) (A_{sur}) рассчитывалась по известной формуле:

A_{sur}(мкВт/м^3)=0.132ρ(0.718[U]+0.193[Th]+0.262[K]),

где [U], [Th] – концентрации урана и тория в г/т; [K] – в масс.%, ρ – плотность породы, г/см^3. В результате получено значение теплогенерации 0.51 мкВт/м^3. Это относительно невысокое значение теплогенерации по сравнению с другими палеозойскими складчатыми поясами. Например, на Урале теплогенерация составляет 0.9 мкВт/м^3, а в Алтае-Саянской области – 1.15 мкВт/м^3 [5]. Учитывая, что в континентальной коре теплогенерация всегда уменьшается с глубиной, можно ожидать для района месторождения величину корового радиогенного теплового потока (q_r) не более 12-15 мВт/м^2. Это значит, что мантийный тепловой поток, который рассчитывается как q_m=q–q_r, составит 30-33 мВт/м^2. Заметим, что эта оценка полностью адекватна той, которая была ранее получена для всего Западно-Арктического бассейна [4]. Таким образом, по геоэнергетическим характеристикам мантия под осадочным Баренцевоморским бассейном ничем не отличается от мантии под складчатым сооружением Новой Земли.

По результатам проведения комплексных геотермических работ, включавших измерения теплопроводности и коэффициента тепловой неоднородности пород по керну методом оптического сканирования, расчета геотермического градиента и плотности теплового потока, оценки компонентов теплового потока, получены следующие результаты:

– Изучены основные теплофизические свойства 165 образцов керна месторождения Павловское арх. Новая Земля;

– Охарактеризованы закономерности изменения коэффициента теплопроводности и тепловой неоднородности рассмотренных разновидностей пород в связи с минеральным составом, структурно-текстурными особенностями и степенью метасоматических изменений. Наибольшими фоновыми значениями теплопроводности обладают метасоматиты (до 14.0 Вт/(м·К)), а наименьшими – аргиллиты (от 1.18 Вт/(м·К)).

– Обосновывается вывод о достаточно высокой информативности теплофизических свойств и перспективности детальных теплофизических исследований разрезов для их литологического расчленения.

– На основе определения концентрации долгоживущих изотопов в образцах керна рассчитана величина коровой радиогенной компоненты теплового потока, которая оказалась значительно меньше, чем та же компонента в других палеозойских складчатых поясах Северной Евразии.

– Полученные данные позволили впервые охарактеризовать плотность теплового потока в скважинах Новой Земли и рассчитать его глубинное значение в условиях структурно-теплофизических неоднородностей.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетных тем № 0135-2015-0021 и 1170-3061-0106, а также программы Президиума РАН № П15. Авторы крайне признательны С.М.Ляпунову и Е.П.Шевченко (ГИН РАН) за предоставленные результаты определения концентрации долгоживущих изотопов.

Список литературы

1. Романович Б.С. Тектоника Новой Земли и Вайгача. Геология СССР. Т. 36. М.: 1970. 548 с.
2. Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Никитин А.С., Бесконтактные измерения теплофизических свойств горных пород на установке ТС14 // Процессы в геосредах. 2016. №3(7). С. 246-254.

3. Попов Ю.А., Семенов В.Г., Коростелев В.М., Березин В.В. Бесконтактное определение теплопроводности горных пород с помощью подвижного источника тепла // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. №7. С. 86-93.
4. Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В. и др. Геотермия арктических морей. М.: ГЕОС. 2013. 238 с.
5. Хуторской М.Д., Поляк Б.Г. Роль радиогенной теплогенерации в формировании поверхностного теплового потока // Геотектоника. 2016. №2. С.43-61.
6. Никитин Д.С., Горских П.П., Хуторской М.Д., Иванов Д.А. Анализ и численное моделирование потенциальных полей на Северо-Востоке Баренцева моря // Мониторинг. Наука и технологии. №1(30) 2017. С. 6-15.

References

1. Romanovich B.S. *Tektonika Novoi Zemli i Vaigacha* [Tectonics of Novaya Zemlya and Vaigacha]. *Geologiya SSSR*. V. 36. Moskow. 1970. 548 p.
2. Nikitin D.S., Khutorskoy M.D., Nikitin A.S. Non-contact measurements of thermal properties of rocks on the installation TC14. *Protsessy v geosredah*. 2016. No. 3 (7). Pp. 246-254.
3. Popov Yu.A., Semenov V.G., Korostelev V.M., Berezin V.V. Non-contact determination of the thermal conductivity of rocks by means of a mobile heat source. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. 1983. No. 7. Pp. 86-93.
4. Khutorskoy M.D., Ahmedzyanov V.R., Ermakov A.V. and all. *Geotermiya arkticheskih morei* [Geothermy of the Arctic seas]. *Moskow*. *GEOS*. 2013. 238 p.
5. Hutorskoi M.D., Polyak B.G. The role of radiogenic heat generation in the formation of surface heat flux. *Geotektonika*. 2016. No. 2. Pp. 43-61.
6. Nikitin D.S., Gorskih P.P., Khutorskoy M.D., Ivanov D.A. Analysis and numerical simulation of the potential fields in Barents sea Northeastern part. *Monitoring. Nauka i tehnologii*. No. 1(30) 2017. Pp. 6-15.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Никитин Дмитрий Сергеевич
старший научный сотрудник лаборатории тепломассопереноса, Геологический институт РАН, 119017, Москва, Россия

Хуторской Михаил Давыдович
доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией тепломассопереноса ГИН РАН, 119017, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Nikitin Dmitriy Sergeevich
Senior Researcher Laboratory of Heat and Mass Transfer, Geological Institute, RAS, 119017, Moscow, Russia

Khutorskoy Mihail Davydovich
Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Laboratory of Heat and Mass Transfer, Geological Institute, RAS, 119017, Moscow, Russia