УДК 550.361.2

© Титова Е.Ф., Ахмедзянов В.Р.

РАДИОГЕННАЯ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЯ В ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Титова Е.Ф., Ахмедзянов В.Р.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт РАН, Москва, Россия

e-mail: geoissues@gmail.com

На основе материалов, полученных в экспедициях на НИС «Академик Николай Страхов» (2006–2011 гг.), была определена поверхностная радиогенная теплогенерация в донных осадках для некоторых районов Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна. Получены следующие средние значения радиогенной теплогенерации – 0.93 мкВт/м^3 в районе свода Федынского; 1.11 мкВт/м^3 – в северной части хребта Книповича и в районе Земли Франца-Иосифа; 1.37 мкВт/м^3 – в районе трога Орла (Стурой). Указанные значения характерны для осадочного материала, представленного здесь преимущественно морскими пелитовыми илами. Полученные данные являются основой для расчета радиогенной компоненты теплового потока в земной коре и для моделирования глубинных температур в исследуемых районах.

Ключевые слова: радиогенная теплогенерация, концентрации теплогенерирующих элементов, радиогенная теплогенерация в осадочных отложениях.

Surface radiogenic heat production was determined in the bottom sediments in several areas in the Barents Sea and Norwegian-Greenland basin based on the data received from RV “Akademik Nikolay Strakhov” cruises performed in 2006 – 2011. The following mean values of the radiogenic heat production were obtained – 0.93 μW m^{-3} near Fedynsky High; 1.11 μW m^{-3} – in the northern part of Knipovich Ridge and the same mean value near Franz Josef Land; the highest mean values of heat production were obtained in the Storøya Trough – 1.37 μW m^{-3}. The received values are common for sediments mostly presented here by pelitic silt. The obtained data is the base for further radiogenic heat flow modeling for the studied areas.

Keywords: radiogenic heat production, heat producing elements concentrations, radiogenic heat production in the sediments.

Введение

Исследование природы глубинного теплового потока, его изменения во времени, а также формы и глубины термических источников – это важнейшие задачи теоретической геотермии. Не менее важны практические аспекты геотермии, связанные с использованием ресурсов глубинного тепла для энергетики и теплоснабжения. В любой постановке проблема точного прогноза глубинных температур и фазового состояния вещества земной коры требует знания всех доступных поверхностных параметров, в том числе радиогенной теплогенерации в породах верхних слоев геологического разреза [1].

Как известно, часть теплового потока, излучаемого из недр Земли, генерируется в земной коре за счет спонтанного радиоактивного распада долгоживущих изотопов. Величина этой тепловой энергии может быть определена эмпирически, исходя из концентраций радиоактивных изотопов, энергии, выделяющейся при распаде, и плотности содержащей их горной породы. По своему энергетическому потенциалу наиболее значимым для генерации тепла является спонтанный распад долгоживущих изотопов ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K.

Мы количественно проанализировали радиогенную теплогенерацию в Западно-Арктическом регионе на некоторых структурах Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна, где проводились полигонные исследования в 24-28 рейсах НИС «Академик Николай Страхов» (2006-2011 гг.).

Определение радиогенной теплогенерации

Аналитическое определение концентраций *U*, *Th*, *K* проводилось в донных отложениях, поднятых грунтовыми трубами в районе трога Орла и трога Франц-Виктория в северной части Баренцева моря, между архипелагами

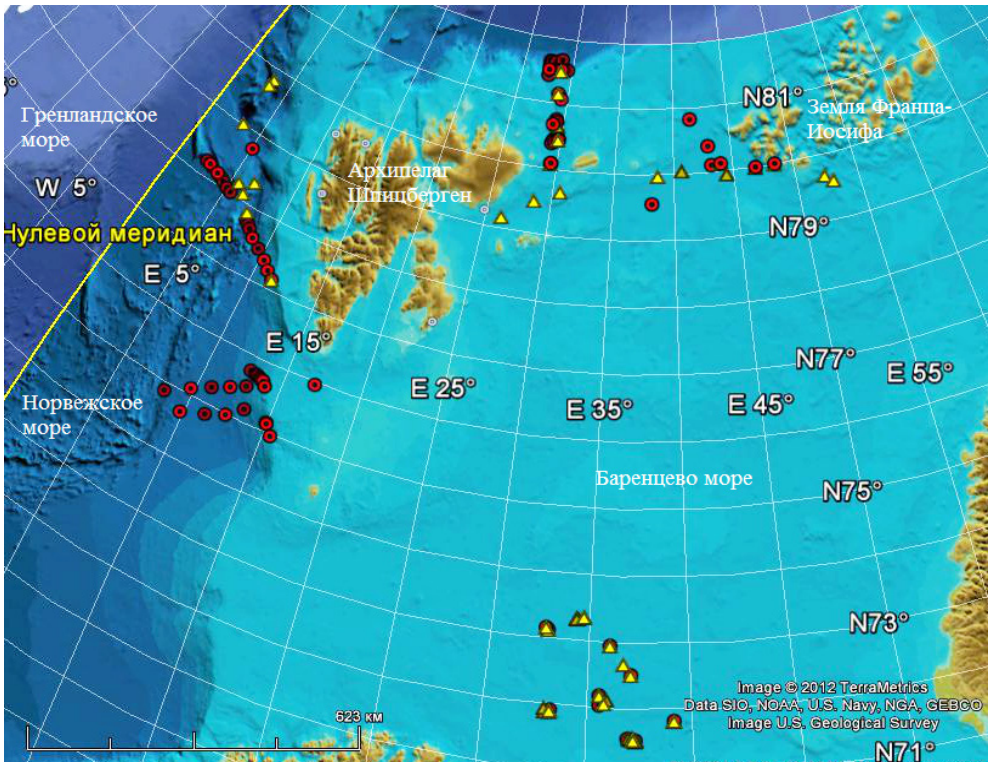


Рис. 1. Районы геотермических работ экспедиций НИС «Академик Николай Страхов» в 2006-2011 гг.
Желтые треугольники – станции отбора донных грунтов, красные отметки – измерения температур в донном грунте

Шпицберген и Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), в районе свода Федынского в южной части Баренцева моря, в северной части хребта Книповича и в разломной зоне Моллой Атлантического океана (рис. 1). Одновременно в тех же точках проводились измерения температур в донных грунтах термозондом «ГЕОС-М» и измерения коэффициентов теплопроводности осадков.

Из поднятого грунтовой трубой керна были выделены образцы, представленные преимущественно илами и глинистым материалом, высушены в лаборатории, затем из них были изготовлены порошковые пробы (навеска 10 г), прессованные под давлением в виде дисков. Анализ порошковых проб был выполнен рентгеноспектральным флуоресцентным методом на рентгеновском вакуумном спектрометре в 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* [2].

На основе вычисленных концентраций ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K (гистограммы распределений концентраций ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K, минимальные и максимальные значения, средние значения и стандартные отклонения приводятся в прил. 1) и плотности содержащей породы, была рассчитана поверхностная радиогенная теплогенерация ($A_{пов}$) (гистограммы распределений поверхностной радиогенной теплогенерации показаны в прил.2) для каждого исследуемого района:

$$A_{пов}\ (мкВт/м^3) = \rho\,(aU + bTh + cK),$$

где ρ — плотность породы, кг/м^3 (для океанических глин определена плотность 1800 кг/м^3 [3]); *a, b, c* — теплогенерация изотопа на единицу массы ($a = 9.17 \cdot 10^{-5}$; $b = 2.56 \cdot 10^{-5}$; $c = 2.97 \cdot 10^{-5}$, Вт/кг) [2].

Таким образом, для исследуемых районов были получены следующие средние значения теплогенерации – 0.93 мкВт/м^3 в районе свода Федынского; северная часть хребта Книповича и район Земли Франца-Иосифа характеризуются средними значениями радиогенной теплогенерации – 1.11 мкВт/м^3, самым высоким средним значением тепло-

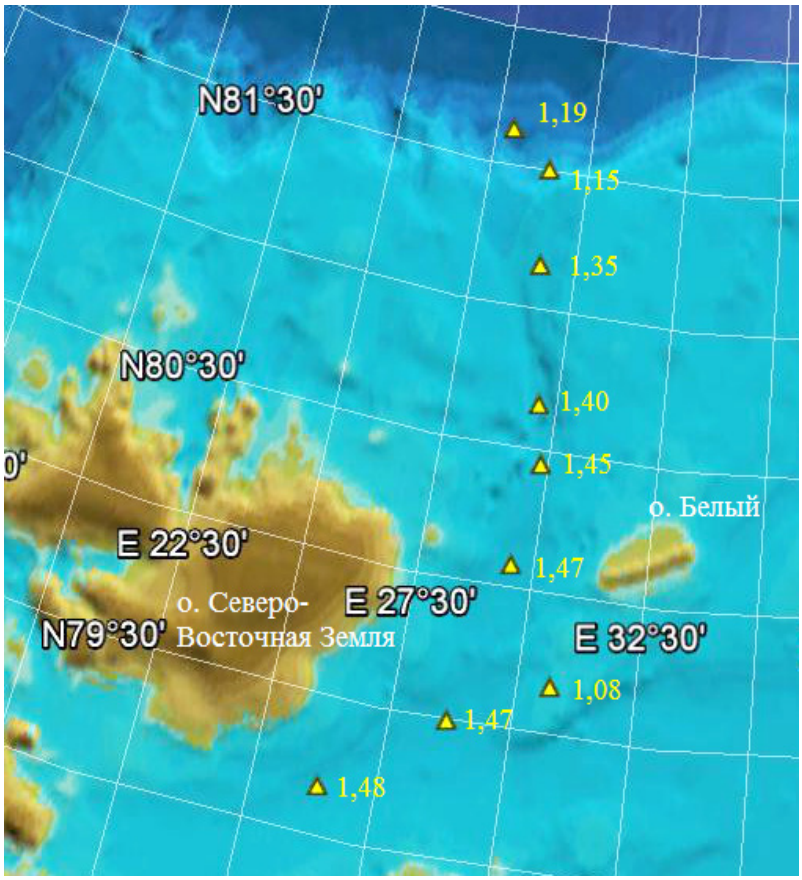


Рис. 2. Станции отбора образцов донных грунтов (желтые отметки) и значения радиогенной теплогенерации (мкВт/м^3) в районе трога Орла

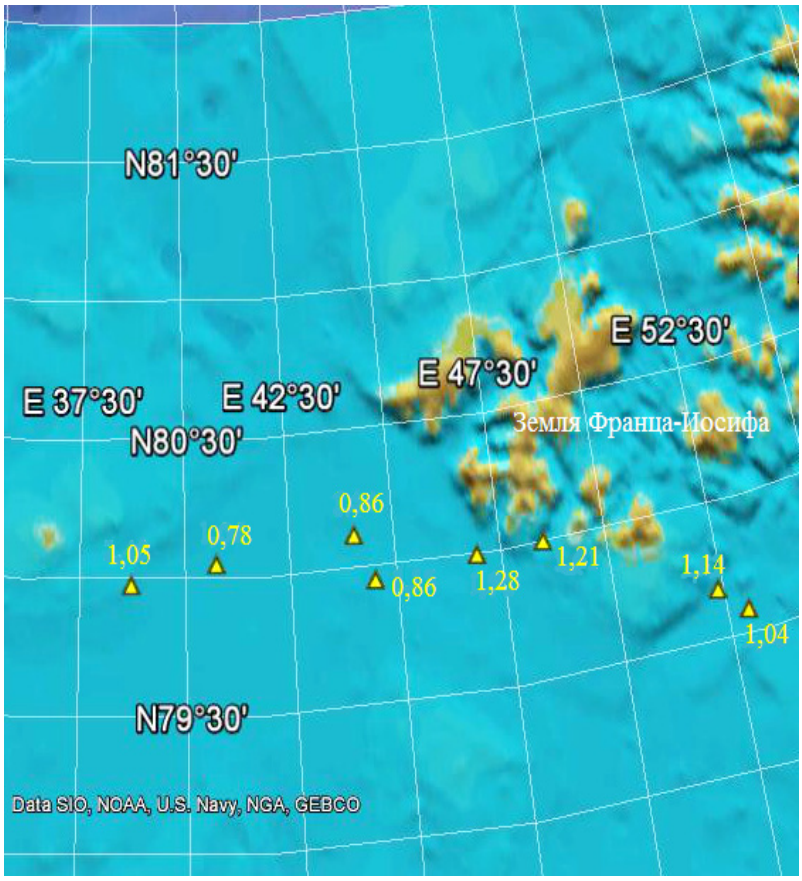


Рис. 3. Станции отбора образцов донных грунтов и значения радиогенной теплогенерации (мкВт/м^3) в районе ЗФИ

генерации представлен район трога Орла – 1.37 мкВт/м^3.

Ниже приводятся подробные описания полученных данных по каждому району в отдельности.

Радиогенная теплогенерация в исследуемых районах Западно-Арктического региона

А) Район трога Орла

В районе трога Орла было выполнено 9 станций отбора образцов донных грунтов

Таблица 1

Концентрации основных теплогенерирующих изотопов и радиогенная теплогенерация в районе трога Орла

№	^{238}U-99.27%	^{232}Th-100%	^{40}K-0.0117%	$A_{пов}$
	г/т	г/т	г/т	мкВт/м^3
1	2.98	10	2.43	1.08
2	4.96	13	3.44	1.60
3	4.96	15	3.66	1.71
4	3.97	11	3.02	1.32
5	3.97	10	2.86	1.27
6	4.96	15	3.72	1.71
7	3.97	10	3.01	1.28
8	4.96	14	3.52	1.65
9	4.96	12	3.46	1.56
10	4.96	14	3.06	1.63
11	3.97	6	1.93	1.04
12	3.97	14	3.45	1.49
13	3.97	15	3.98	1.56
14	4.96	13	3.21	1.59
15	4.96	14	3.59	1.66
16	2.98	10	2.26	1.07
17	3.97	12	3.51	1.40
18	3.97	14	3.59	1.49
19	3.97	14	3.80	1.50
20	3.97	15	3.58	1.54
21	3.97	13	3.24	1.43
22	2.98	9	2.46	1.04
23	3.97	11	2.95	1.32
24	1.99	13	3.33	1.10
25	2.98	10	2.39	1.08
26	2.98	13	3.13	1.26
27	3.97	12	3.10	1.37
28	3.97	12	3.00	1.37
29	2.98	10	2.27	1.07
30	4.96	13	3.09	1.58
31	1.99	10	2.82	0.94
32	4.96	11	2.31	1.45
33	2.98	8	2.28	0.98
34	3.97	10	2.34	1.24
35	3.97	13	3.58	1.45

(рис. 2). В результате анализа было получено 35 определений концентраций *U*, *Th*, *K* (табл. 1). Район трога Орла характеризуется самым высоким средним значением радиогенной теплогенерации 1.37 мкВт/м^3. Если предположить, что теплогенерация не изменяется с глубиной, то при мощности осадочного слоя 6 км, средняя величина радиогенного потока от осадочного чехла в троге Орла составит не более 10 мВт/м^2, при наблюдаемом аномально высоком тепловом потоке у поверхности дна 519 мВт/м^2 (средний наблюдаемый тепловой поток для района равен 256 мВт/м^2) [4]. Вклад радиогенного теплового потока в общий тепловой поток в данном случае минимальный.

Б) Район Земли Франца-Иосифа

В районе Земли Франца-Иосифа было выполнено 8 станций отбора образцов донных грунтов (рис. 3). В результате анализа получено 26 определений концентраций *U*, *Th*, *K* (табл. 2). Район Земли Франца-Иосифа представлен средним значением радиогенной теплогенерации 1.11 мкВт/м^3. Учитывая мощность осадочного слоя в троге Франц-Виктория (около 4 км) [5], получим, что радиогенный тепловой поток составит не более 4.5 мВт/м^2 при измеренном фоновом тепловом потоке до 90 мВт/м^2 [4].

В) Район северной части хребта Книповича и разломная зона Моллой

В районе северной части хребта Книпо-

Таблица 2

Концентрации основных теплогенерирующих изотопов и радиогенная теплогенерация в районе ЗФИ

№	^{238}U-99.27%	^{232}Th-100%	^{40}K-0.0117%	$A_{пов}$
	г/т	г/т	г/т	мкВт/м^3
1	5.96	8	2.41	1.48
2	4.96	8	2.37	1.31
3	1.99	10	2.57	0.93
4	3.97	10	2.54	1.25
5	4.96	8	2.16	1.30
6	2.98	8	2.09	0.97
7	4.96	9	2.85	1.39
8	4.96	9	2.59	1.37
9	4.96	10	2.85	1.43
10	3.97	10	2.80	1.27
11	3.97	9	2.70	1.21
12	2.98	8	2.53	1.00
13	1.99	9	2.23	0.86
14	1.99	9	2.13	0.86
15	1.99	8	2.20	0.81
16	1.99	7	1.87	0.75
17	2.98	10	2.97	1.11
18	2.98	8	2.53	1.00
19	2.98	9	2.75	1.05
20	3.97	10	2.70	1.26
21	3.97	9	2.61	1.21
22	2.98	7	2.36	0.94
23	1.99	9	2.71	0.89
24	3.97	10	2.55	1.25
25	2.98	9	2.56	1.04
26	2.98	8	2.10	0.97

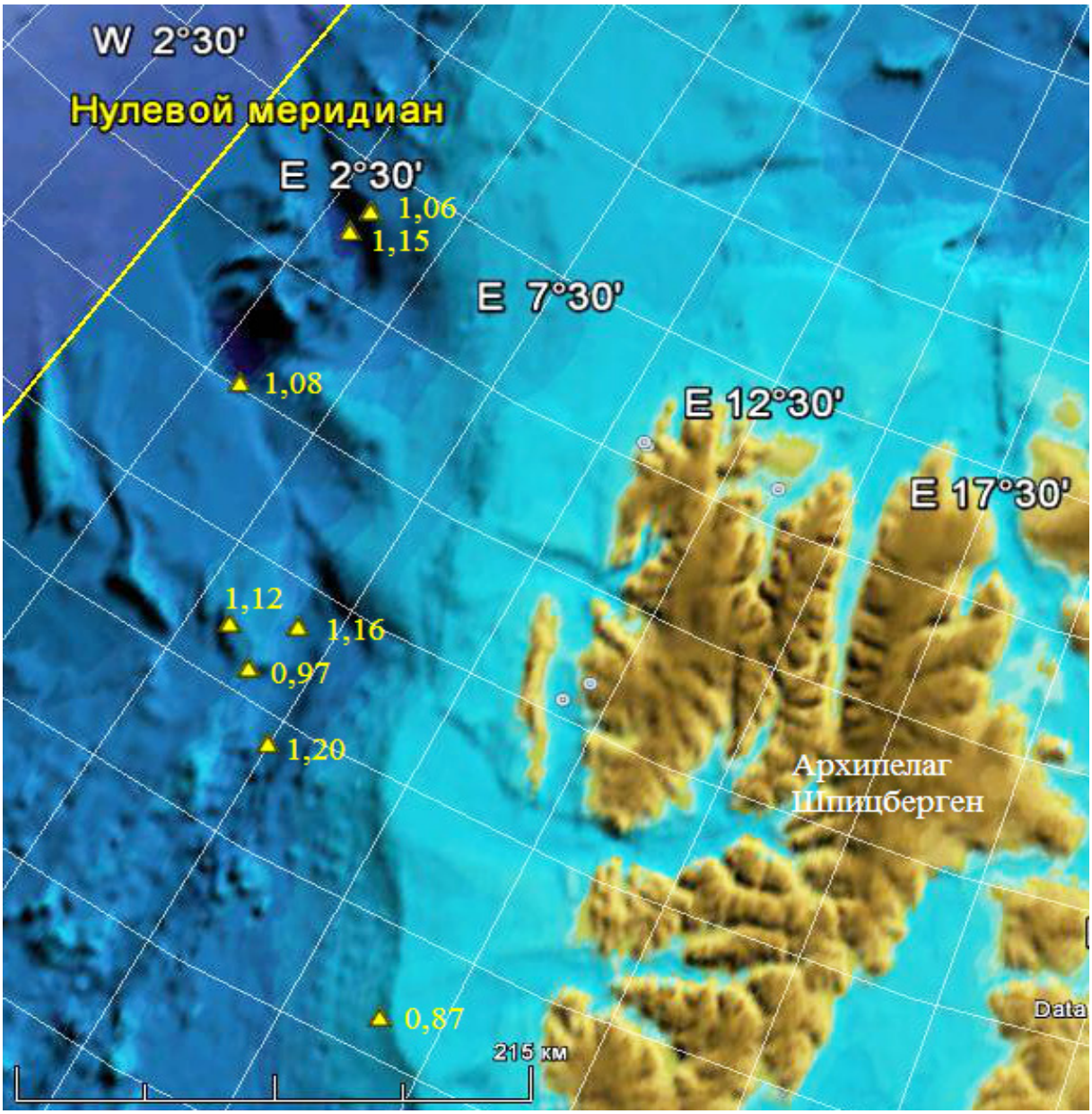


Рис. 4. Станции отбора образцов донных грунтов и значения радиогенной теплогенерации (мкВт/м^3) в северной части хребта Книповича и в разломной зоне Моллой

вича и разломной зоне Моллой было выполнено 8 станций отбора образцов донных грунтов (рис. 4). Было получено 52 определения концентраций *U*, *Th*, *K* (табл. 3). Район характеризуется средним значением радиогенной теплогенерации 1.11 мкВт/м^3, что свидетельствует о незначительной роли радиогенного теплового потока в общей геотермической структуре этой части Атлантического океана.

Г) Район свода Федынского

В районе свода Федынского было выполнено 32 станции отбора образцов донных грунтов (рис. 5). Получено 71 определение концентраций *U*, *Th*, *K* (табл. 4). Район свода Федынского характеризуется самым низким значением радиогенной теплогенерации – 0.93 мкВт/м^3.

Заключение

Итак, рассматриваемые районы в Западно-Арктическом регионе характеризуются средними значениями радиогенной теплогенерации – 0.93 мкВт/м^3 в южной части Баренцева моря в районе свода Федынского, 1.11 мкВт/м^3 в районе хребта Книповича и в районе Земли Франца-Иосифа и 1.37 мкВт/м^3 в районе трога Орла. Такие значения теплогенерации в общем случае характерны для осадочных глинистых пород. В работе [6] приводится компиляция 2188 концентраций

Таблица 3

Концентрации основных теплогенерирующих изотопов и радиогенная теплогенерация в северной части хребта Книповича и в разломной зоне Моллой

№	^{238}U-99.27%	^{232}Th-100%	^{40}K-0.0117%	$A_{пов}$
	г/т	г/т	г/т	мкВт/м^3
1	2.98	11	2.84	1.15
2	1.99	12	2.41	1.01
3	1.99	10	2.64	0.93
4	3.97	11	2.95	1.32
5	2.98	12	3.12	1.21
6	2.98	13	3.34	1.27
7	2.98	10	2.42	1.08
8	2.98	10	2.58	1.09
9	2.98	11	2.85	1.15
10	2.98	10	2.38	1.08
11	2.98	9	2.22	1.03
12	2.98	9	2.54	1.04
13	1.99	10	2.49	0.92
14	2.98	10	2.43	1.08
15	2.98	11	2.73	1.14
16	1.99	11	2.85	0.99
17	2.98	9	2.62	1.05
18	3.97	11	3.21	1.33
19	2.98	11	3.27	1.17
20	1.99	11	2.81	0.98
21	2.98	9	2.53	1.04
22	3.97	10	2.69	1.26
23	3.97	13	3.05	1.42
24	2.98	11	3.09	1.16
25	1.99	11	3.12	1.00
26	3.97	10	2.74	1.26
27	2.98	10	3.13	1.12
28	2.98	10	2.75	1.10
29	2.98	9	2.78	1.05
30	5.96	12	3.30	1.71
31	1.99	12	3.58	1.07
32	2.98	8	2.27	0.98
33	2.98	9	2.42	1.04
34	2.98	9	2.41	1.04
35	2.98	10	2.85	1.10
36	2.98	8	2.12	0.97
37	1.99	7	2.18	0.77
38	2.98	9	2.66	1.05
39	1.99	12	3.41	1.06
40	1.99	9	2.84	0.89
41	1.99	9	2.30	0.87

Таблица 3 (продолжение)

42	2.98	10	2.56	1.09
43	2.98	9	2.56	1.04
44	3.97	12	3.27	1.38
45	1.99	11	3.30	1.01
46	2.98	12	3.34	1.22
47	2.98	10	3.24	1.13
48	2.98	12	3.61	1.24
49	2.98	11	2.87	1.15
50	2.98	10	2.91	1.11
51	3.97	12	3.28	1.38
52	1.99	9	2.31	0.87

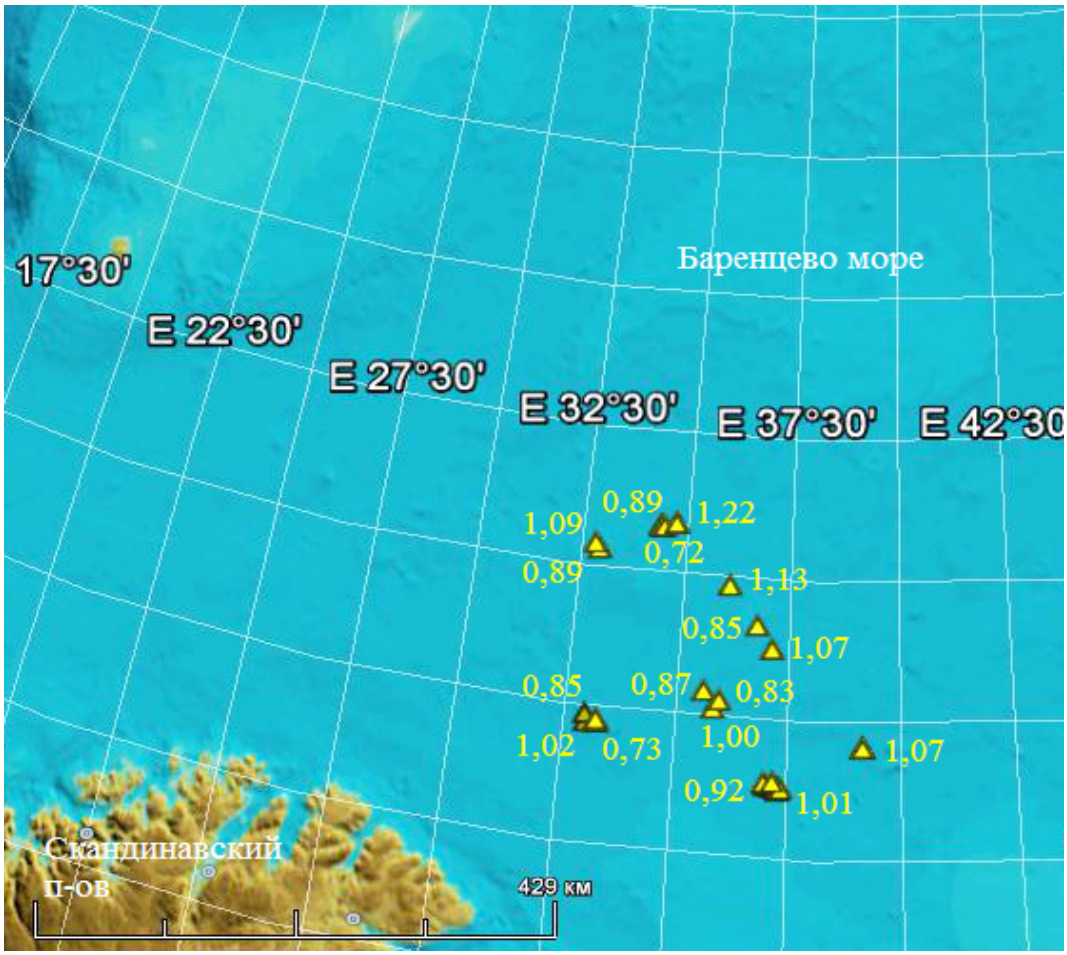


Рис. 5. Станции отбора образцов донных грунтов и значения радиогенной теплогенерации (мкВт/м^3) в районе свода Федынского

U, *Th* и *K*, выполненная на основе 102 опубликованных ранее исследований. Основываясь на этой компиляции, была определена средняя радиогенная теплогенерация для рассмотренных в исследованиях типов горных пород. Для общей группы осадочных пород авторы приводят среднее значение теплогенерации – 1.10 мкВт/м^3. В частности, для глинистых пород приводится среднее значение – 1.39 мкВт/м^3. В работе приводятся также средние значения радиогенной теплогенерации для группы магматических пород – 1.76 мкВт/м^3 и для группы метаморфических пород – 1.63 мкВт/м^3.

В работе [7] приводят среднее значение радиогенной теплогенерации – 1.0 мкВт/м^3 для глинистых пород, поднятых из скважины *Cape Roberts* (CRP-3) глубиной 939.42 м в

Таблица 4

Концентрации основных теплогенерирующих изотопов и радиогенная теплогенерация в районе свода Федынского

№	^{238}U-99.27%	^{232}Th-100%	^{40}K-0.0117%	$A_{пов}$
	г/т	г/т	г/т	мкВт/м^3
1	0.99	8	2.72	0.68
2	0.99	10	2.74	0.77
3	1.99	10	2.80	0.94
4	1.99	9	2.75	0.89
5	2.98	9	2.76	1.05
6	0.99	9	2.76	0.73
7	2.98	11	2.48	1.13
8	1.99	9	2.46	0.87
9	3.97	10	2.75	1.26
10	2.98	7	2.48	0.95
11	1.99	8	2.57	0.83
12	0.99	7	2.36	0.61
13	1.99	8	2.33	0.82
14	2.98	8	2.56	1.00
15	0.99	8	2.56	0.67
16	3.97	9	2.77	1.22
17	0.99	10	2.81	0.78
18	0.99	8	2.45	0.66
19	2.98	9	2.72	1.05
20	2.98	9	2.73	1.05
21	0.99	8	2.44	0.66
22	2.98	7	2.72	0.96
23	1.99	7	2.56	0.79
24	2.98	7	2.96	0.97
25	0.99	11	2.35	0.80
26	0.99	9	2.64	0.72
27	2.98	8	2.35	0.99
28	1.99	8	2.34	0.82
29	0.99	8	2.37	0.66
30	1.99	8	2.20	0.81
31	1.99	8	2.47	0.83
32	1.99	10	2.40	0.92
33	3.97	10	2.84	1.27
34	1.99	12	3.04	1.04
35	1.99	10	2.58	0.93
36	1.99	10	2.35	0.91
37	1.99	12	2.39	1.01
38	1.99	11	2.37	0.96
39	1.99	10	2.37	0.92
40	2.98	9	2.82	1.06
41	2.98	9	2.87	1.06

Таблица 4 (продолжение)

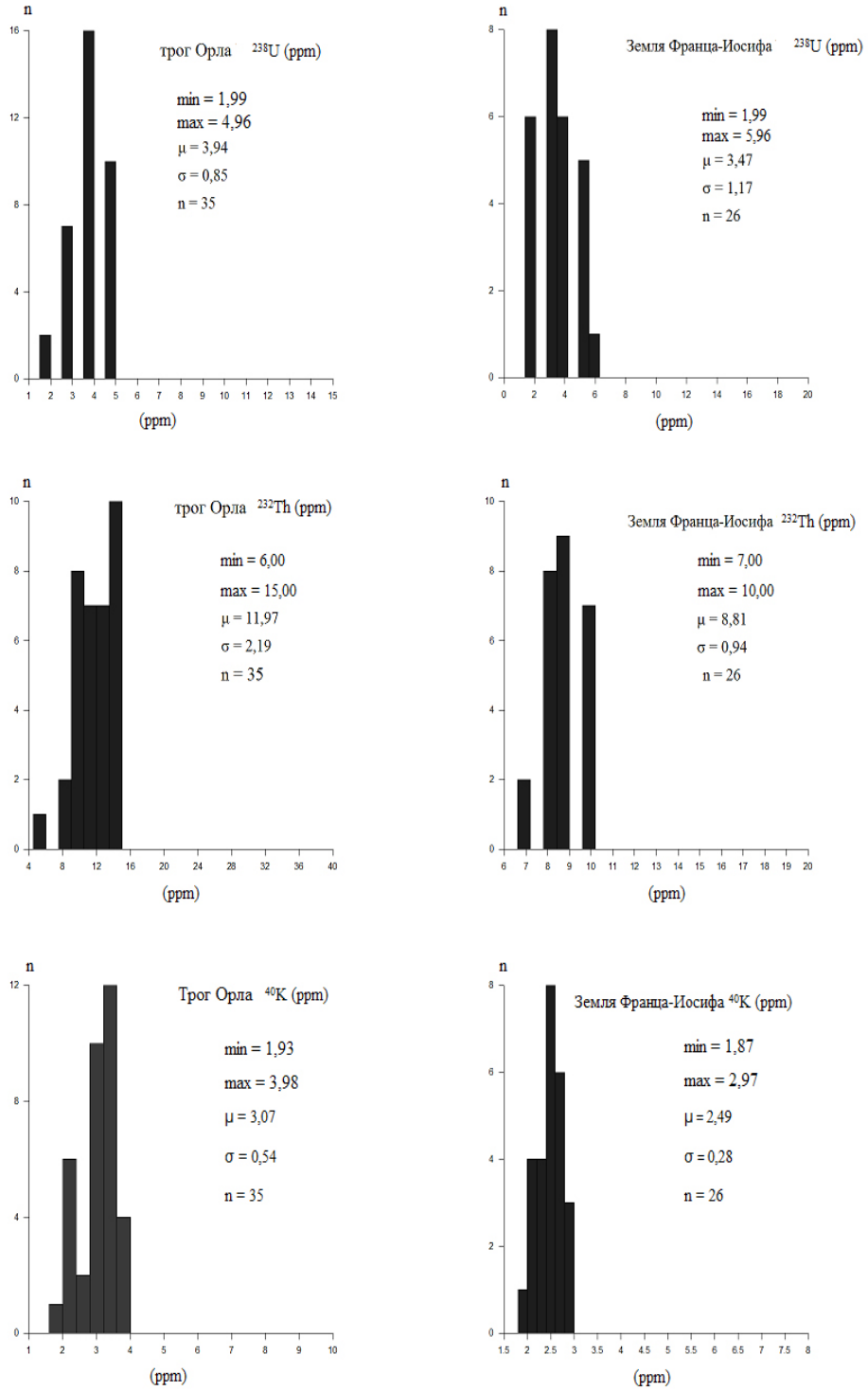
42	2.98	11	2.89	1.15
43	1.99	11	3.01	1.00
44	2.98	13	2.97	1.25
45	1.99	10	2.42	0.92
46	1.99	9	2.44	0.87
47	1.99	8	2.43	0.83
48	1.99	9	2.39	0.87
49	4.96	9	2.59	1.37
50	1.99	5	2.62	0.70
51	1.99	10	2.56	0.93
52	1.99	9	2.52	0.88
53	1.99	9	2.52	0.88
54	1.99	8	2.33	0.82
55	2.98	7	2.46	0.95
56	4.96	9	2.75	1.38
57	1.99	9	2.50	0.88
58	1.99	8	2.45	0.83
59	1.99	9	2.46	0.87
60	4.96	10	2.71	1.42
61	2.98	7	2.59	0.95
62	1.99	8	2.66	0.84
63	2.98	10	2.46	1.08
64	1.99	10	2.43	0.92
65	1.99	8	2.49	0.83
66	1.99	9	2.46	0.87
67	3.97	9	2.71	1.21
68	1.99	10	2.43	0.92
69	1.99	10	2.61	0.93
70	1.99	8	2.42	0.83
71	1.99	9	2.59	0.88

море Росса (бассейн Земли Виктории, Антарктида), пробуренной на глубине моря 297 м.

В исследовании [8] подробно рассматривается радиогенная теплогенерация в норвежских коренных горных породах. Отмечается, что радиогенная теплогенерация может варьироваться больше внутри определенной группы горных пород, нежели между различными группами. Очевидно, велико значение локальных факторов, определяющих величину радиогенной теплогенерации. В [8] вариации радиогенной теплогенерации в магматических породах связываются с особенностями формирования и эволюции их материнских магм, вариации теплогенерации в осадочных породах, судя по всему, отображают особенности осадочных процессов. Возраст и степень метаморфизма автор не относит к существенным факторам, влияющим на величину радиогенной теплогенерации. Другое дело – тектоническая обстановка: породы, образовавшиеся внутри плит, показывают большую теплогенерацию по сравнению с породами, сформированными вдоль окраин плит.

Таким образом, вариации теплогенерации в осадочных отложениях в рассматриваемых районах Западно-Арктического региона могут быть связаны с особенностями происхождения и перемещения осадочного материала.

На основе вновь полученных данных по радиогенной теплогенерации для каждого исследуемого района планируется подобрать наиболее адекватные модели распределения

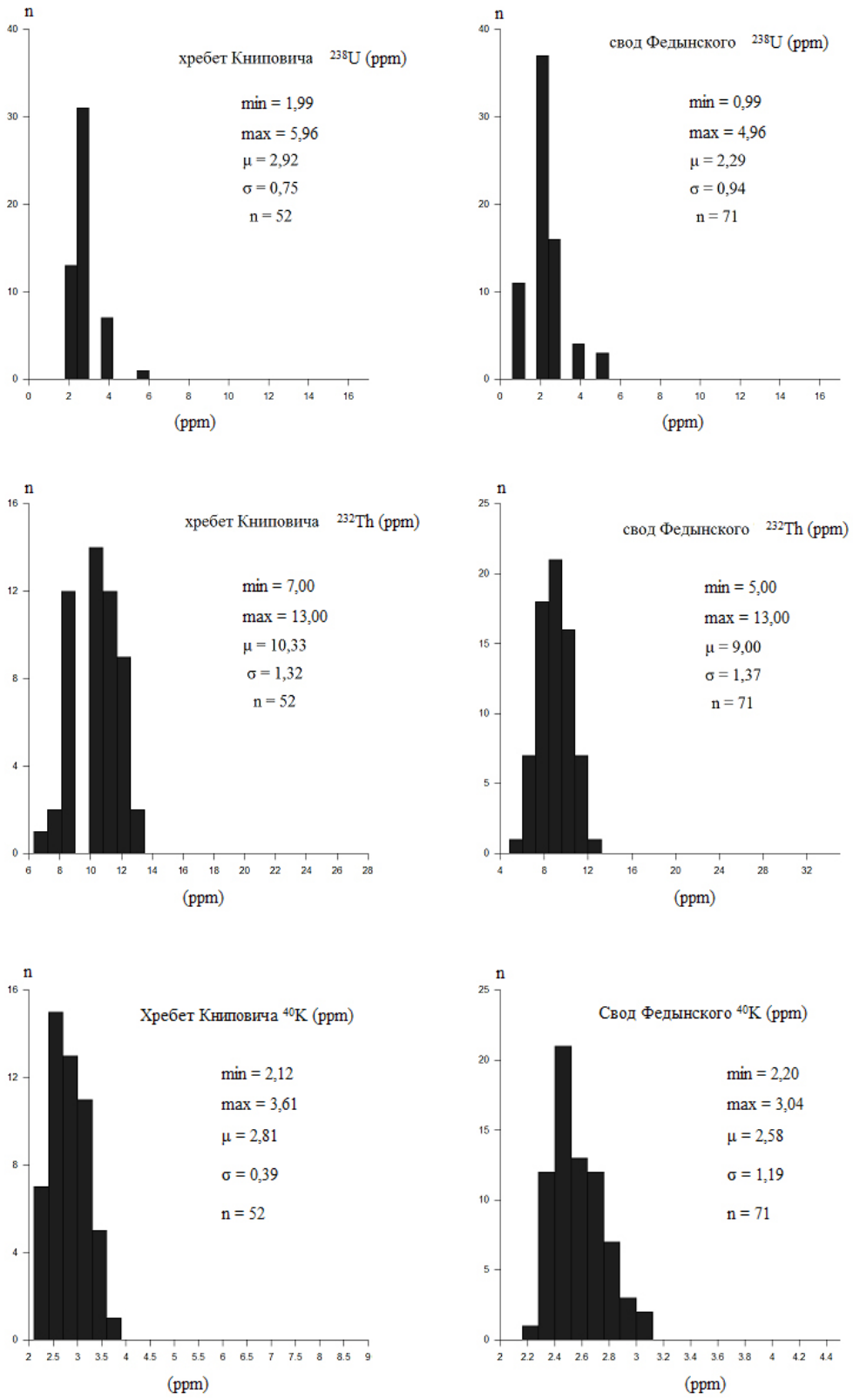


1(А)

теплогенерирующих элементов по глубине. Необходимо будет учесть тектоническую историю и возраст района, типы встречающихся пород, особенности строения земной коры и особенности распределения глубинного теплового потока. Эти модели представят основу для вычисления регионального радиогенного теплового потока в земной коре и последующего определения доли радиоактивного тепла в общем наблюдаемом тепловом потоке, что необходимо для изучения термической истории и термической структуры геологических объектов.

Приложение 1

Гистограммы распределений концентраций ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K, минимальные (*min*) и максимальные (*max*) значения, средние значения (μ) и стандартные отклонения (σ) и количество анализируемых проб (n) для некоторых районов Западно-Арктического региона: 1(А) для трога Орла и Земли Франца-Иосифа; 1(Б)



1(Б)

для районов хребта Книповича и свода Федынского.

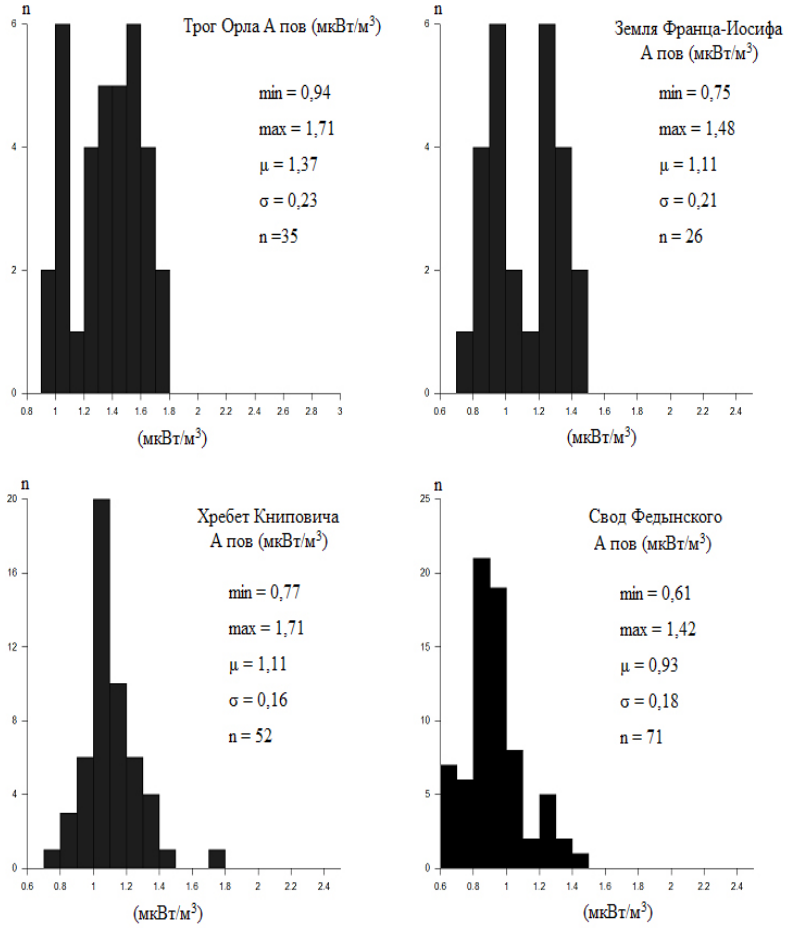
Приложение 1 (А). Гистограммы распределений концентраций ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K, минимальные (*min*) и максимальные (*max*) значения, средние значения (μ) и стандартные отклонения (σ) и количество анализируемых проб (n) для районов трога Орла и Земли Франца-Иосифа.

Приложение 1 (Б). Гистограммы распределений концентраций ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K, минимальные (*min*) и максимальные (*max*) значения, средние значения (μ), стандартные отклонения (σ) и количество анализируемых

проб (n) для районов хребта Книповича и свода Федынского.

Приложение 2

Гистограммы распределений поверхностной радиогенной теплогенерации, минимальные (min) и максимальные (max) значения, средние значения (μ), стандартные отклонения (σ) и количество определений (n) для исследуемых районов.



Список литературы

1. Тепловой режим недр СССР. Монограф. гл. ред. А.В. Пейве. Изд-во «Наука», М. – 1970, 219 с.
2. Jaupart C. and Mareschal J.-C., 2004. “Constraints on Crustal Heat Production from Heat Flow Data” // Treatise on Geochemistry, Vol. 3: The Crust, edited by R.L. Rudnick, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp. 65-84.
3. Берч Фр., Шерер Дж., Спайсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. Пер. с англ. С. В. Ренц, под ред. чл.-корр. АН СССР А. П. Виноградова. М.: Изд-во ИЛ, 1949, 302 с.
4. Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р. Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // Доклады Академии наук, 2009, том 424, № 2, с. 227-233.
5. Верба В.В., Астафурова Е.Г., Леонов В.О., Мандриков В.С., Хлюпин Н.И. Строение северной континентальной окраины Баренцевского шельфа в районе архипелага Земля Франца-Иосифа // В сб.: Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб, ВНИИОкеанология, 2004, Вып. 5, т. 203, с. 169-175.
6. Vila M., Fernandez M., Jimenez-Munt I. “Radiogenic heat production variability of some common lithological groups and its significance to lithospheric thermal modeling” // Tectonophysics, Vol. 490 (2010), Issues 3-4, pp. 152-164.
7. Bücker C. J., Jarrard R. D. and Wonik T. “Downhole Temperature, Radiogenic Heat Production, and Heat Flow from the CRP-3 Drillhole, Victoria Land Basin, Antarctica” // Terra Antartica, 2001, 8 (3), pp. 151-159.
8. Slagstad T. “Radiogenic heat production of Archaean to Permian geological provinces in Norway” // Norwegian Journal of Geology, Vol. 88, pp. 149-166. Trondheim, 2008.
9. Проблемы геотермии и практического использования тепла Земли. Т.1. Труды первого всесоюзного совещания по геотермическим исследованиям. Изд-во АН СССР, М. – 1959, 254 с.
10. Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология // Научный отчет 24 рейса НИС «Академик Николай Страхов» в Норвежско-Гренландском бассейне в рамках программы № 17 Президиума РАН, ГИН РАН, М., 2007.