

УДК 551.24, 550.34

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ И АНОМАЛИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА

© 2018 г. Г.Н. Антоновская^{1,*}, И.М. Басакина¹, Я.В. Конечная^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова РАН,
163000, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23

²Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН»,
249030, Обнинск Калужской обл., пр. Ленина, д. 189

*e-mail: essm.ras@gmail.com

Поступила в редакцию 2.05.2017 г.

Современная сейсмичность и плотность теплового потока являются индикаторами геодинамических процессов. Для Европейского сектора Арктики составлен Обобщенный сейсмический каталог за 1995–2015 гг., привлечена информация о пространственном распределении значений теплового потока путем обобщения различных баз данных. Для данного региона обсуждаются принципиально возможные связи аномальных значений теплового потока с процессами проявления сейсмической активности, составлены сводные геолого-геофизические разрезы строения литосферы в широтном и меридиональном сечении. Выделены наиболее геодинамически активные структуры и зоны концентрации тектонических напряжений.

Ключевые слова: Европейский сектор Арктики, Баренцевоморский регион, сейсмическая активность, тепловой поток, тектонические напряжения

DOI: 10.7868/S0016853X18010034

ВВЕДЕНИЕ

Европейский сектор Арктики, в состав которого входит Баренцевоморский регион, является частью геодинамической системы, включающей древний Евразийский материк и активно развивающийся более молодой Северный Ледовитый океан. Значительный объем накопленного геолого-геофизического материала выявляет сложное и изменчивое в пространстве строение земной коры и верхней мантии в Баренцевоморском регионе [2, 4, 7, 10, 17, 18, 24, 27]. До сих пор продолжают дискуссии об особенностях формирования литосферы, причинах изменения ее мощности и “исчезновения” под глубокими впадинами гранито-гнейсового слоя [7, 27].

Европейский сектор Арктики считается асейсмичным регионом, но количество сейсмических событий, зарегистрированных в период с 1995 по 2015 гг. в связи с совершенствованием наблюдений арктических сетей, указывает на необходимость ревизии данных представлений. Современная сейсмичность и плотность теплового потока являются индикаторами геодинамических процессов [21]. Совместный анализ этих полей дает возможность приблизиться к пониманию геодинамики района, что является целью данной статьи.

Для реализации поставленной цели был составлен обобщенный сейсмический каталог по данным сейсмических сетей, выполняющих мониторинг рассматриваемого региона, были обобщены данные глубинных геолого-геофизических разрезов по геотраверсам земной коры и верхней мантии [13, 15, 16, 26] (рис. 1) и привлечена информация о пространственном распределении значений теплового потока [22, 23, 28, 31]. На основе анализа геолого-геофизических данных составлены сводные разрезы вдоль профилей А-В и С-Д, которые отражают основные черты строения литосферы этого региона и позволяют рассмотреть связь сейсмичности, плотности теплового потока с его тектоникой.

ВЗАИМОСВЯЗЬ СЕЙСМИЧНОСТИ И СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИТОСФЕРЫ

Инструментальные наблюдения сейсмичности Европейского сектора Арктики осуществляются рядом отечественных и зарубежных сейсмических служб и сетей, среди которых норвежский сейсмологический центр NORSAR [30], занимающийся фундаментальными исследованиями в области сейсмологии. NORSAR имеет плотную

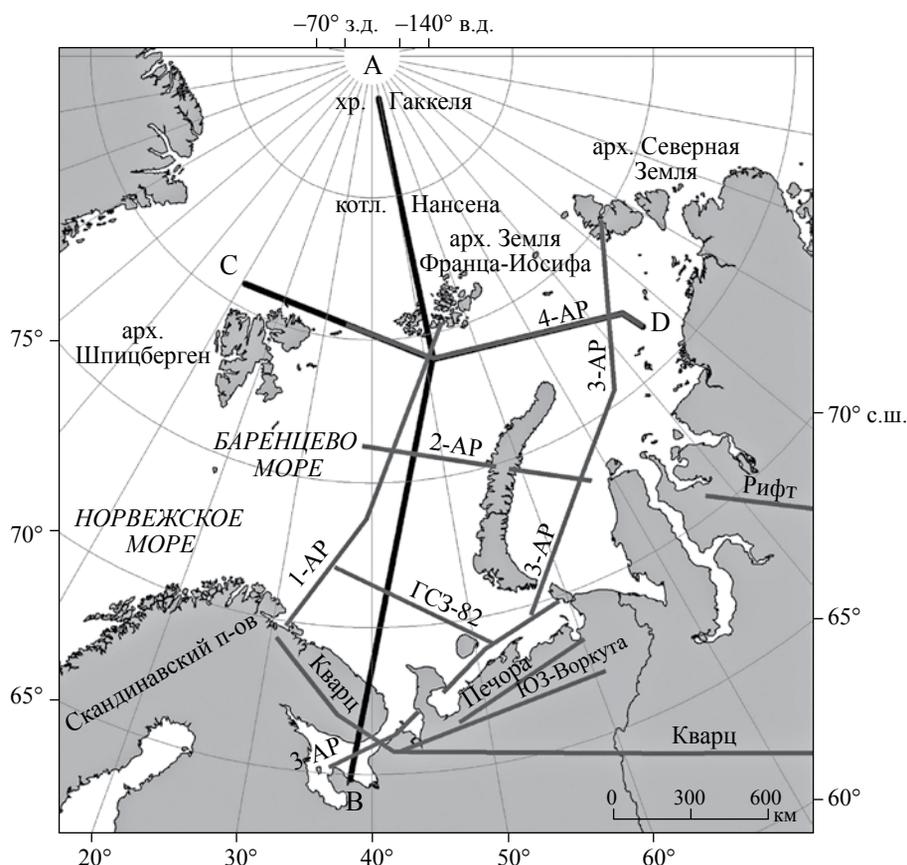


Рис. 1. Схема расположения профилей А-В, С-Д и геотравверсов на территории района исследований.

Глубинные сейсмические профили, выполненные на акватории – 1-АР, 2-АР, 3-АР, 4-АР, ГСЗ-82 и на материке – Кварц, Печора, Рифт, ЮЗ-Воркута

сейсмическую сеть и сейсмические группы на территории Скандинавии и архипелага Шпицберген.

Сравнение карт зарегистрированных сейсмических событий за 2012–2015 гг. показывает (рис. 2), что каждая сейсмологическая служба имеет свои приоритетные зоны регистрации эпицентров землетрясений и зоны “тени” [25]. Объединение усилий в области сейсмологического мониторинга Арктики позволяет повысить точность локации эпицентров землетрясений и оценить их энергетический уровень. Очевидным является актуальность развития сейсмических сетей в Российском секторе Арктики, на территориях которой сейсмические наблюдения по сравнению с другими геофизическими исследованиями развиты недостаточно.

Оценку сейсмической обстановки исследуемого региона осложняет и тот факт, что каталоги, принадлежащие различным сейсмическим сетям и службам, не унифицированы по форме представления материалов, базируются на разном количестве и качестве исходных данных и разных способах обработки [8, 20, 30]. Параметры одних и тех же землетрясений в разных источниках довольно часто различаются. Авторами проведено

обобщение сейсмической информации и повышение качества локации сейсмических событий Европейского сектора Арктики.

По базам данных норвежской сейсмической сети NORSTAR, Архангельской сейсмической сети [20, 30] был создан Обобщенный сейсмический каталог за 1995–2015 гг. Для каждой сети были определены зоны ответственности (приоритетные зоны), позволяющие вычислять параметры эпицентров с минимальными ошибками. Например, для сети NORSTAR зонами ответственности являются территории хребтов Мона и Книповича, архипелаг Шпицберген; для Архангельской сети – это район хребта Гаккеля и архипелага Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. Полученный Обобщенный каталог содержит информацию о землетрясениях Европейского сектора Арктики выше 70° с.ш., зарегистрированных минимум тремя сейсмическими станциями. Представлен фрагмент Обобщенного каталога (табл. 1).

Обобщенный каталог состоит из двух частей: основного решения по землетрясениям, согласно приоритетам района размещения сети, и альтернативный вариант расчета параметров

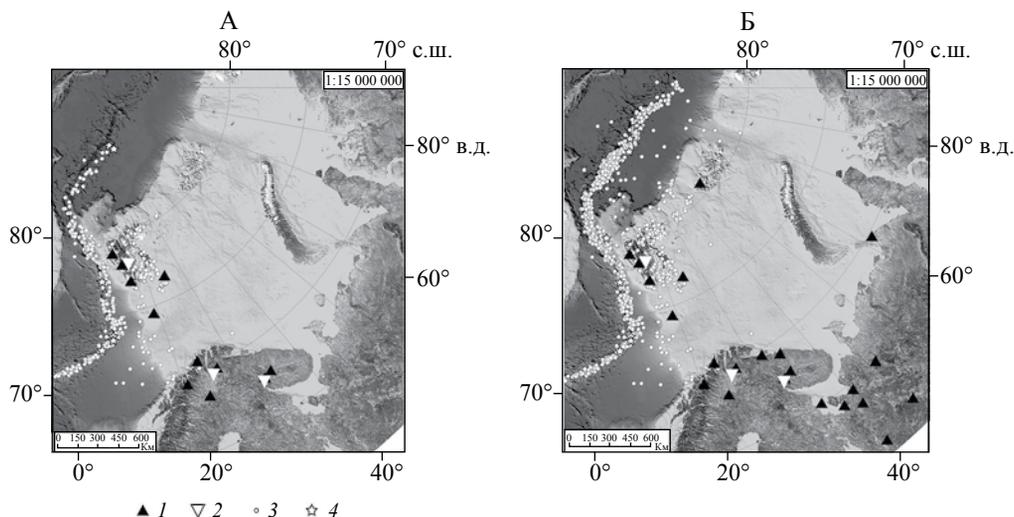


Рис. 2. Сейсмические события, зарегистрированные за 2012–2015 гг. по данным компании NORSAR (Норвегия) (А) и объединенный результат NORSAR, Кольского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» и Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаврова РАН (Б).

1 – одиночные трехкомпонентные сейсмические станции; 2 – сейсмические группы; 3–4 – землетрясения с магнитудой: 3 – $M \leq 5$, 4 – $M \geq 5$

землетрясений. Существует ряд землетрясений, параметры которых были рассчитаны только одной сетью. Согласно полученному каталогу магнитудный диапазон землетрясений Европейского сектора Арктики от 0.9 до 6.2, представительная магнитуда 2.9.

Рассмотрим сопоставление пространственного распределения землетрясений из Обобщенного сейсмического каталога и главных структурно-тектонических элементов Баренцевоморского региона [19, 26]. Обобщение литературных данных позволяет выделить следующие особенности геодинамики этого региона (рис. 3):

- Активизация сейсмической активности сводово-блокового поднятия Свальбардского архипелага (Шпицберген), архипелага Земля Франца Иосифа и поднятия Белый вызвана процессами тектонических напряжений, при которых развиваются морфоструктуры растяжения и сжатия.

- Растяжение окраины континентального шельфа и его удлинение в желобах Франц-Виктория, Святой Анны и Орли [4, 18] и, возможно, протекание процессов изостатической компенсации лавинного осадконакопления на границе шельфа отражается в виде слабой сейсмичности с диапазоном значений магнитуд землетрясений M_L от 0.6 до 4.9.

- Отдельные слабые землетрясения выявлены на границах тектонических структур в Центрально-Баренцевской впадине (район норвежского шельфа) и в складчатой зоне каледонид Скандинавского полуострова.

- Единичные сейсмические события зарегистрированы на склонах сверхглубоких депрессий, это – Восточно-Баренцевская и Южно-Баренцевская зоны ступеней, землетрясения 23.01.2012 ($t_0=09:52:55.0$, lat 80.11, lon 72.71, $M_L=2,7$) и 20.11.2015 ($t_0=15:43:17.49$, lat 71.18, lon 32.48, $M_L=2,4$) соответственно, и два события в Кольской моноклинали:

- 05.11.2002 ($t_0=07:31:16.22$, lat 70.17, lon 34.25, $M_L=1,6$),

- 02.11.2000 ($t_0=08:14:24.61$, lat 70.12, lon 36.56, $M_L=1,1$).

- Сейсмическая активность зафиксирована в краевой восточной части Баренцевоморской плиты в Новоземельской складчатости и прогибе Седова. Примером являются два сейсмических события на Новой Земле, которые произошли

- 11.10.2010 ($t_0=22:48:29$, lat 76.18, lon 63.94, $M_L=4.49$),

- 4.03.2014 ($t_0=04:42:36$, lat 74.72, lon 56.72, $M_L=3.3$) [9, 29].

Таким образом, распределение землетрясений отражает воздействие спрединговых процессов, трансформных перемещений, а также результат полей тектонических напряжений, генерируемых непосредственно в краевых частях Баренцевоморской плиты, в центральной её части зафиксированы единичные события. Максимальная концентрация землетрясений приурочена к центральной оси срединно-океанических хребтов (СОХ).

Таблица 1. Обобщенный сейсмический каталог.

Основное решение										Альтернативный вариант						
Дата	Время	Шир.	Дол.	М	Регион	Источник	Дата	Время	Шир.	Дол.	М	Регион	Источник			
08.10.2013	01:39:58.98	74.29	15.23	4.3	Хребет Мона	NORSAR	08.10.2013	01:40:00.00	74.44	15.30	—	Хребет Мона	АСС			
08.10.2013	09:10:26.00	84.06	4.51	3.3	Хребет Гаккеля	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
09.10.2013	03:32:57.01	73.17	7.31	3.0	Хребет Мона	NORSAR	—	—	—	—	—	—	—			
09.10.2013	17:47:09.22	76.96	18.28	3.1	Шпицберген	NORSAR	09.10.2013	17:47:10.00	76.93	18.28	3.5	Шпицберген	АСС			
09.10.2013	06:13:55.00	81.42	-1.63	3.6	Хребет Книповича	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
16.10.2013	16:33:09.00	79.14	4.19	3.5	Хребет Книповича	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
18.10.2013	02:05:18.45	84.56	12.47	—	Хребет Гаккеля	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
20.10.2013	16:49:53.84	72.33	2.73	3.4	Хребет Мона	NORSAR	—	—	—	—	—	—	—			
21.10.2013	19:04:49.84	86.28	49.91	3.3	Хребет Гаккеля	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
22.10.2013	22:45:10.94	73.53	8.47	3.4	Хребет Мона	NORSAR	—	—	—	—	—	—	—			
23.10.2013	10:31:04.81	77.76	8.56	3.7	Хребет Книповича	NORSAR	23.10.2013	10:31:08.96	77.78	8.99	3.9	Хребет Книповича	АСС			
23.10.2013	14:17:00.00	85.25	26.91	3.0	Хребет Гаккеля	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
24.10.2013	09:51:00.83	77.92	8.50	2.2	Хребет Книповича	NORSAR	24.10.2013	09:51:01.00	77.88	8.58	3.2	Хребет Книповича	АСС			
24.10.2013	21:56:44.00	77.87	8.75	3.6	Хребет Книповича	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
24.10.2013	12:17:25.00	81.31	-4.25	3.4	Хребет Книповича	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
24.10.2013	23:46:07.00	85.01	12.02	3.4	Хребет Гаккеля	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
25.10.2013	22:48:21.73	76.60	9.08	2.6	Хребет Книповича	NORSAR	25.10.2013	22:48:21.00	76.77	7.79	-	Хребет Книповича	АСС			
25.10.2013	01:25:56.00	80.33	40.06	1.9	Грабен Франц-Виктория	АСС	—	—	—	—	—	—	—			
25.10.2013	09:50:35.00	85.45	27.58	3.0	Хребет Гаккеля	АСС	—	—	—	—	—	—	—			

Примечание: М – магнитуда, АСС – Архангельская сейсмическая сеть.

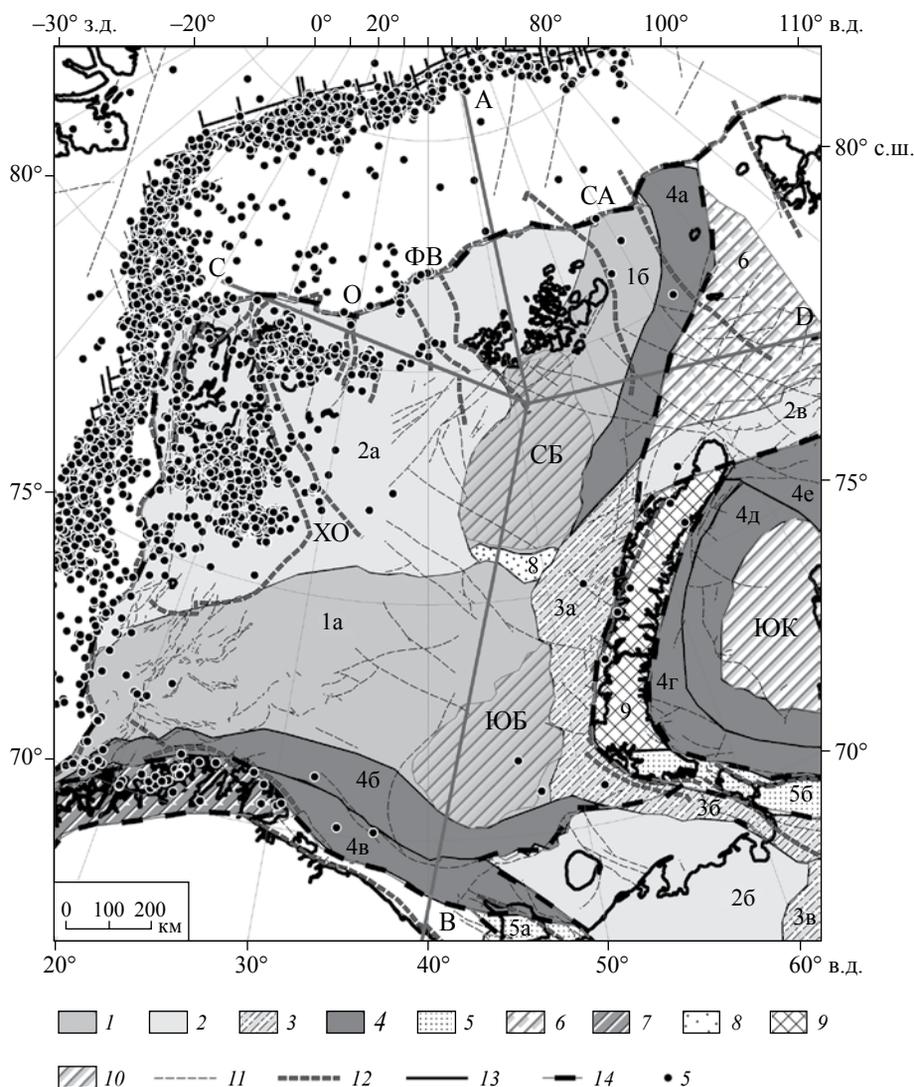


Рис. 3. Современная сейсмичность на карте основных структурно-тектонических элементов Баренцевоморского региона (с использованием данных [19, 26]). Буквами обозначены: СА – желоб Святой Анны; ХО – Хипопен–Ольгинский желоб; ФВ – желоб Франц-Виктория; О – трог Орли. 1 – депрессии: а – Центрально-Баренцевская; б – Северо-Баренцевская; 2 – платформенные массивы: а – Свальбардская антеклиз, б – Печорская плита, в – Северо-Сибирский порог; 3 – краевые прогибы: а – прогиб Седова; б – Кортаихинская впадина; в – Косью-Роговская впадина; 4 – склоны сверхглубоких депрессий: а – Восточно-Баренцевская зона ступеней; б – Южно-Баренцевская зона ступеней; в – Кольская моноклираль; г – Восточно-Новоземельская моноклираль; д – Восточно-Новоземельская зона ступеней; е – Северо-Сибирская зона ступеней; 5 – Байкальская складчатость: а – Тиманский кряж; б – Северо-Карская синеклиза; 7 – Скандинавская складчатость каледонского возраста; 8 – Лунинская седловина; 9 – Новоземельская складчатость раннекиммерийского возраста; 10 – сверхглубокие впадины: ЮБ – Южно-Баренцевская; СБ – Северо-Баренцевская; ЮК – Южно-Карская; 11 – границы пришельфовых и неклассифицированных разрывных нарушений; 12 – крупнейшие разломы, сдвиги и надвиги; 13 – активный спрединговый центр; 14 – надпорядковые структуры; 15 – сейсмические события за 1998–2015 гг.

КОРРЕЛЯЦИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА, СЕЙСМИЧНОСТИ И ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ

Время термической релаксации Земли ($\sim 1,5 \times 10^9$ лет) позволяет считать тепловую составляющую Земли постоянной [6]. Существует два основных источника тепла: поступающее из мантии ($\sim 60\%$)

и образованное за счет радиоактивного распада в породах земной коры ($\sim 40\%$). В осадочном чехле основная масса радиоактивных элементов приурочена к глинистым породам, интрузивные тела являются локальными источниками прогрева.

Из различных источников [22, 23, 28, 31] нами была создана база данных значений теплового потока. Представлена сводная информация о сейс-

мичности и тепловом потоке в выделенных тектонических структурах (платформенных и океанических) рассматриваемого региона Арктики (табл. 2). Карта распределения теплового потока, сейсмичности и основных неотектонических структур Баренцевоморского региона приведена в [21]. Корреляция сейсмической активности со значениями теплового потока прослеживается в районах СОХ. Для северной части Восточно-Европейской платформы явной зависимости между этими параметрами не наблюдается, за исключением Северо-Баренцевской зоны поднятий. Рассмотрим распределение этих параметров более детально, опираясь на строение литосферы вдоль сводных геолого-геофизических разрезов (см. рис. 1).

Профиль А-В (рис. 4) пересекает следующие морфоструктуры:

- СОХ (хребет Гаккеля),
- абиссальную ступень (котловина Нансена),
- Баренцевоморский шельф,
- восточная часть Балтийского щита,
- Беломорский шельф,
- континентальное поднятие Восточно-Европейской платформы.

Для построения модели строения литосферы со скоростями Р-волн использовались данные глубинных геолого-геофизических разрезов вдоль профилей: Кварц, 1-АР, 2-АР, 3-АР, 4-АР, ГСЗ-82 и др. [13–16, 26].

Профиль С-Д (рис. 5) пересекает следующие морфоструктуры:

- Свальбардскую антиклизу,
- Северо-Баренцевскую впадину,
- Северо-Карскую синеклизу,
- Таймырско-Северо-Земельскую складчатую систему.

Большую его часть перекрывает профиль глубинных сейсмических исследований МОВ ОГТ и ГСЗ (4-АР) [4, 15, 26].

Вдоль сводных профилей строения литосферы представлены графики теплового потока и нанесены эпицентры землетрясений. Сопоставление приведенных геолого-геофизических полей показывает следующее.

Профиль А–В. Океаническая литосфера резко выделяется по глубинному положению земной коры (с 6 до 12 км), на глубинах 12–13 км расположена граница Мохо (см. рис. 4). Скорости в верхней коре океанического слоя от 4.5 до 6 км/с, в нижней коре – от 6.8 до 7.3 км/с. Рифтовую долину хребта Гаккеля образуют породы океанического фундамента, предположительно, со скоростями более 7.5 км/с [14]. В осадочном слое над океаническим фундаментом выделяют несколько стратиграфических комплексов, мощность которых возрастает в направлении Баренцево-Карской

континентальной окраины. В пределах котловины Нансена акустически зафиксирована граница Мохо на глубине 10–12 км.

Для океанической литосферы при утонченной коре значения теплового потока возрастают до 200 мВт/м², сейсмическая активность повышенная, особенно в районе хребта Гаккеля. В котловине Нансена зафиксированы единичные землетрясения, приближенные к зонам трансформных разломов, значения теплового потока составляют 98 мВт/м². К бровке континентального шельфа среднее значение теплового потока уменьшается до 70 мВт/м².

В зоне сочленения континентальной и океанической литосферы зафиксирована сейсмическая активность. Единичные события этого района предположительно являются результатом сноса осадочных масс с континента [4] или следствием активности трансформного разлома.

Литосфера континентального типа. Поверхность мантии (скорости Р-волн от 8.0 до 8.5 км/с) в пределах Баренцевоморской депрессии опускается до 34–36 км, в пределах Кольской моноклинали 35–40 км и 44–46 км в районе Балтийского щита. Консолидированную кору можно грубо разделить на два слоя. Верхний имеет скорости 5.6–6.5 км/с, нижний – 6.6–7.2 км/с. Мощность верхнего слоя консолидированной коры изменяется от 8 км во впадине до 15–25 км в районе поднятия Воронина, Альбанова, Федынского и под Балтийским щитом [27]. Мощность в этом регионе базитовой части консолидированной коры в зоне поднятия от 10 до 20 км, в зоне погружения утончается от 5 до 16 км [13, 15].

По сейсмическим данным в пределах верхнего слоя консолидированной коры в районе Южно-Баренцевской впадины выделены локальные скоростные неоднородности. Предполагают, что верхняя кора обогащена платобазальтами и по физическим свойствам близка к океаническому типу. Такое утонение, преобразование континентальной коры и ее опускание, возможно, смоделировано фазовыми переходами пород [2, 12]. Схематично отображены флюидонасыщенные зоны разуплотнения в осадочном чехле с возможной последующей генерацией там углеводородов (см. рис. 4, см. рис. 5). В районе Северо-Баренцевской впадины в пределах нижнего слоя коры выделены высокоскоростные неоднородности со значениями 7.1 км/с. Их уплотнение, по мнению [1, 2], является результатом метаморфического постепенного перехода габброидов в эклогит.

В пределах Баренцевоморской депрессии в районах развития массивов преобразования пород зафиксированы единичные землетрясения: lat 75.07, lon 53.06, ML=2,2 – Прогиб Седова (см. рис. 3); lat 71.58, lon 46.09, ML=3,2 и lat 70.88, lon 47.4,

Таблица 2. Показатели значений сейсмичности и теплового потока в выделенных тектонических структурах рассматриваемого района Арктики

Надпорядковые структуры	Структуры	Землетрясения			Средние значения теплового потока, мВт/м ²		
		Кол-во	ML _{max}	ML _{cp}			
Восточно-Европейская платформа	Структуры I и II порядка	Центрально-Баренцевская депрессия (1а)	23	3.6	2.48	60–70	
		Северо-Баренцевская депрессия (1б)	2	2.7	2.4	60–80	
	Баренцевская плита	Северо-Баренцевская зона поднятий (2а) трог Орли (исключение)	1758	5.9	2.5	60–80, 100–300	
		прогиб Седова (3а)	2	2.3	2.25	50–80	
	Восточно-Баренцевская зона ступеней (4а)	Восточно-Баренцевская зона ступеней (4а)	1	2.7	2.7	70	
		Лунинская седловина (8)	–	–	–	70	
	Тимано-Печорская плита	Южно-Баренцевская зона ступеней (4б)	Южно-Баренцевская зона ступеней (4б)	9	3.7	2.37	60–70
			Кольская моноклинал (4в)	2	1.6	1.35	50–60
		Печорская плита (2б)	–	–	–	40–50	
		Коротайхинская впадина (3б)	–	–	–	40	
Косью-Роговская впадина (3в)		–	–	–	30–40		
Тиманский кряж (5а)		–	–	–	50		
Западно-Сибирская плита	Южно-Карская синеклиза (6а)	Южно-Карская синеклиза (6а)	1	4.1	4.1	70	
		Восточно-Новоземельская моноклинал (4г);	–	–	–	60	
	Северо-Сибирская зона ступеней (4е)	Восточно-Новоземельская зона ступеней (4д);	–	–	–	60	
		Северо-Сибирская зона ступеней (4е)	–	–	–	60	
Новоземельская микроплита	Пайхойский кряж (5б)	Новоземельская складчатость раннекимммерийского возраста (9)	5	4.5	3.24	60	
		Северо-Сибирский порог (2в)	–	–	–	60	
Северо-Карская плита	Северо-Карская синеклиза (6б)	Северо-Сибирский порог (2в)	1	2.7	2.7	60–70	
		Северо-Карская синеклиза (6б)	–	–	–	70	
Балтийский щит	Скандинавская складчатость каледонского возраста (7)	33	2.8	1.9	40–50		
Евразийский и Северо-Атлантический бассейны	Котловина Нансена СОХ	Котловина Нансена	135	4.3	2.5	60–80	
		СОХ	3224	6.6	2.83	>100	

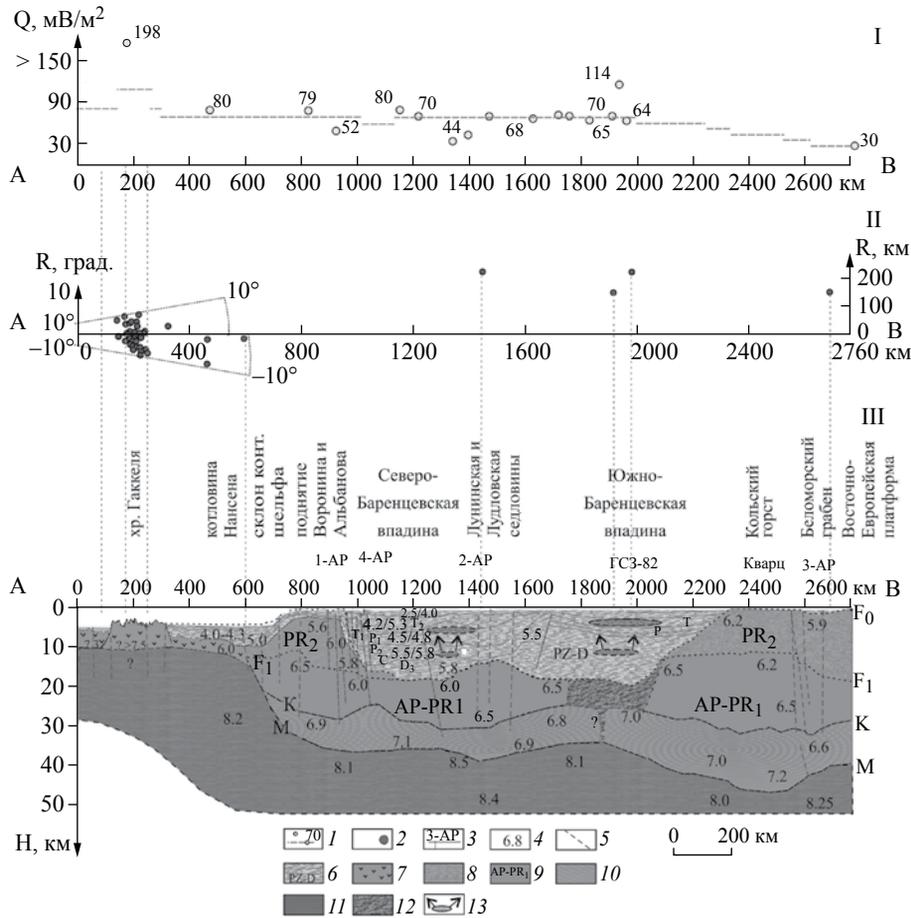


Рис. 4. Распределение значений теплового потока (I), сейсмичности (II) и геолого-геофизический разрез вдоль профиля А–В (III) (с использованием данных [13, 14, 26]). М – граница Мохо; К – срединная граница в коре; F_0 – кровля верхнепротерозойского фундамента; F_1 – граница кровли коры архей-протерозойского возраста (PR₁–AR) I – значения теплового потока вдоль профиля и их осреднение, мВт/м²; 2 – эпицентры сейсмических событий за 1995–2015 гг.; 3 – точки пересечения геотраверсов; 4 – скорости Р-волн, км/с; 5 – разломы; 6 – осадочный чехол, возраст; 7 – океанический акустический фундамент; 8 – верхнепротерозойский фундамент (PR₂); 9 – верхняя силикатная часть консолидированной коры (PR₁–AR); 10 – базитовая часть консолидированной коры; 11 – верхняя мантия; 12 – массив базита; 13 – флюидонасыщенные зоны разуплотнения в осадочном чехле, с возможной генерацией углеводородов

ML = 2,0 – Южно-Баренцевская впадина (см. рис. 3). В этих районах отмечаются повышенные значения теплового потока (60–80 мВт/м²).

Завершает разрез по профилю А–В мощная мантийно-коровая структура, термически холодная – значения теплового потока от 30 до 50 мВт/м², с тонким, вплоть до выклинивания, осадочным слоем в юго-западной части континентального поднятия Восточно-Европейской платформы. Можно предположить, что эта структура сдерживает сжатие со стороны СОХ и тектонические деформации со стороны складчатых образований Полярного Урала, архипелага Новая Земля, п-ова Таймыр и североатлантических каледонид, что выражается в единичных относительно слабых землетрясениях на границах крупных тектонических структур [11].

Профиль С-D. На участке коллизионных дислокаций в районе окраины Свальбардской плиты отмечается повышенная сейсмическая активность (см. рис. 5). Значения теплового потока (порядка 80 мВт/м²) выше средних показателей для Баренцевоморского поднятия, а в зоне трога Орли они достигают экстремальных значений ≈ 500 мВт/м².

Результатом медленного и плавного прогибания этой части Баренцевоморской плиты почти до горизонтальной поверхности является формирование Северо-Карской впадины [18]. По сейсмическим данным кора континентального типа, что подтверждают низкие скорости сейсмических волн (5.6–6.0 км/с) в гранито-гнейсовом слое. Согласно [15, 27], утонение коры и воздействия небольших (по сравнению с таковыми для Южно-Баренцевской

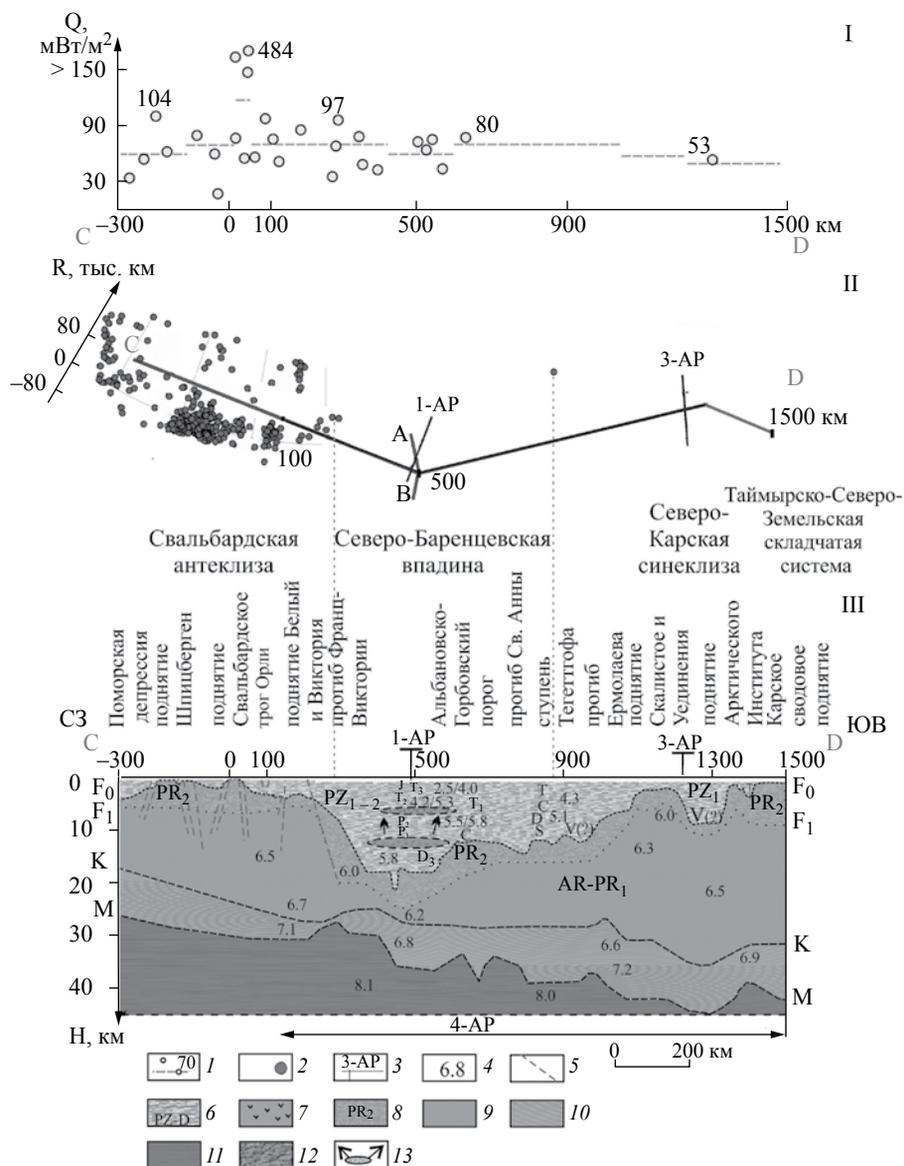


Рис. 5. Распределение значений теплового потока (I), сейсмичности (II) и геолого-геофизический разрез вдоль профиля С–D (III) (с использованием данных [13, 14, 26]).

М – граница Мохо; К – срединная граница в коре; F_0 – кровля верхнепротерозойского фундамента; F_1 – граница кровли коры архей-протерозойского возраста (PR_1 –AR)

1 – график значений теплового потока вдоль профиля и его осреднение, мВт/м²; 2 – эпицентры сейсмических событий за 1995–2015 гг.; 3 – точки пересечения геотранверсов; 4 – скорости Р-волн, км/с; 5 – разломы; 6 – осадочный чехол, возраст; 7 – океанический акустический фундамент; 8 – верхнепротерозойский фундамент (PR_2); 9 – верхняя сиалическая часть консолидированной коры (PR_1 –AR); 10 – базитовая часть консолидированной коры; 11 – верхняя мантия; 12 – массив базита; 13 – флюидонасыщенные зоны разуплотнения в осадочном чехле, с возможной генерацией углеводородов

впадины) потоков глубинных мантийных флюидов запустили медленные процессы эклогитизации в низах коры. Подтверждением этому являются средние значения теплового потока (порядка 70 мВт/м²), с аномальными значениями до 97 мВт/м². Для восточной части профиля С–D имеются лишь единичные сведения о значениях теплового потока, в среднем это 50 мВт/м².

Сейсмическая активность проявляется на большей части профиля С–D, которая снижается по мере удаления от зоны сочленения Свальбардской плиты с зоной СОХ. Отчасти подобный результат может быть связан с отсутствием постоянно действующих сейсмических станций в Карском регионе, т.к. согласно модели [18] в зоне сочленения Баренцево-Северо-Карской плит

должна наблюдаться слабая сейсмическая активность. В Восточно-Баренцевской зоне ступеней (см. рис. 3) зафиксировано единичное событие (lat 80.11, lon 72.71, ML=2,7), предположительно, над участком выделения высокоскоростных неоднородностей в нижней и верхней коре (см. рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление геолого-геофизических полей позволяет взаимно увязать различные индикаторы геодинамических процессов. Выявлена связь сейсмичности с глубинным строением, и соответствие ее как наиболее геодинамически активным структурам, так и зонам концентрации тектонических напряжений. Согласно составленному Обобщенному каталогу наиболее геодинамически активным районом Баренцевоморского региона является Свальбардская антеклиза, где сосредоточена наибольшая концентрация тектонических напряжений со стороны СОХ и выделены зоны повышенных значений теплового потока (в среднем 70–80 мВт/м²).

Зафиксированные единичные землетрясения в зонах депрессий отражают процессы проявления новейшей тектонической активности этого региона, возможно, являющейся следствием развития высокоскоростных неоднородностей в нижней и верхней коре или результатом накопления напряжений и их разрядки в ослабленных зонах. Данный вывод носит весьма условный характер в связи с малым временным промежутком имеющейся сейсмической информации для Баренцевоморского региона. Необходимо последующий сейсмологический мониторинг, который позволит подтвердить или опровергнуть сделанные предположения.

Необходимо обозначить проявления единичных землетрясений в перспективных районах поиска и разведки углеводородных месторождений в пределах Южно- и Северо-Баренцевской впадин, прогиба Святой Анны и западной части Баренцевоморского бассейна.

Представленные исследования дополняют существующие представления о строении и тектонике Баренцевоморского региона.

Благодарности. Выражаем благодарность М.Д. Хуторскому (Геологический институт РАН, г. Москва) за ценные рекомендации в области изучения геодинамики арктического региона.

Благодарим компанию NORSAR (Норвегия) и Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (Россия) за совместную работу по составлению Обобщенного сейсмического каталога Европейского сектора Арктики.

Работа выполнена при частичной поддержке темы НИР АААА-А16–116052710111–2 «Развитие сейсмических методов для прогнозирования и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф в Евро-Арктическом регионе».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюшков Е.В.* Механизм образования Баренцевского прогиба // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 7. С. 698–711.
2. *Артюшков Е.В.* Механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Растяжение литосферы или эклогитизация // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 12. С. 1675–1686.
3. Атлас «Геология и полезные ископаемые шельфов России» / Гл. ред. М.Н. Алексеев. М.: Научный мир, 2004. 279 с.
4. *Верба М.Л.* Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазоносности // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. Т. 2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ngtr.ru/rub/4/026.pdf> (Дата обращения 3.05.2017)
5. *Вержицкий Е.В.* Геотермический режим, тектоника дна и температурные условия генерации углеводородов восточной части Баренцева моря // Геотектоника. 2002. № 1. С. 86–96.
6. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
7. *Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Шокальский С.П., Эринчек Ю.М.* Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Региональная геология и металлогения. 2013. № 55. С. 5–20.
8. Кольский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.krsc.ru> (Дата обращения 03.05.2017)
9. *Конечная Я.В.* Изучение особенностей природной сейсмичности западного сектора Арктики по данным станций Баренц-региона. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Архангельск, ООО «Гефест», 2015. 24 с.
10. *Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В.* Геодинамическая модель тектонического развития Арктики в мезозое и кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 1–32.
11. Литосфера и гидросфера европейского Севера России: Геоэкол. Проблемы / Отв. ред. Ф.Н. Юдахин. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 408 с.
12. *Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Павленкова Г.А.* Земная кора глубоких платформенных впадин Северной Евразии и природа их формирования // Физика Земли. 2016. № 5. С. 150–164.
13. *Павленкова Н.И., Павленкова Г.А.* Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. Выпуск 10. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2014. 192 с.
14. *Поселов В.А., Павленкин А.Д., Погребницкий Ю.Е., Каминский В.Д., Мурзин Р.Р., Сорокин М.Ю.* Структура литосферы Арктического бассейна по сейсмическим данным в связи с проблемой внешней границы континентального шельфа России // Разведка и охрана недр. 2000. № 12. С. 48–54.
15. *Сакулина Т.С., Верба М.Л., Иванова Н.М., Крупнова Н.А., Беляев И.В.* Глубинное строение северной

- части Баренцево-Карского региона вдоль опорного профиля 4-АР (п-ов Таймыр-Земля Франца Иосифа) // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Международн. научно-практич. семинара. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. С. 197–200.
16. Сакулина Т.С., Рослов Ю.В., Павленкова Г.А. Методы и результаты обработки комплексных сейсмических исследований по профилю 2-АР (Баренцево-Карский шельф) // Физика Земли. 2009. № 3. С. 56–63.
 17. Сим Л.А., Жиров Д.В., Маринин А.В. Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита // Геодинамика и тектонофизика. 2011. № 3. С. 219–243.
 18. Сорохтин Н.О., Никифоров С.Л., Кошель С.М., Козлов Н.Е. Геодинамическая эволюция и морфоструктурный анализ западной части арктического шельфа России // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19. № 1/1. С. 123–137.
 19. Ступакова А.В. Структура и нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа и прилегающих территорий // Геология нефти и газа. 2011. № 6. С. 99–115.
 20. Уникальная научная установка «Архангельская сейсмическая сеть» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://fciarctic.ru/index.php?page=geoss> (Дата обращения 03.05.2017)
 21. Хуторской М.Д., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Кременецкая Е.О., Кваерна Т. Сейсмичность, тепловой поток и тектоника Западно-Арктического бассейна // Научно-технический журнал «Мониторинг. Наука и технологии». 2015. № 3(24). С. 6–15.
 22. Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В. и др. Геотермия арктических морей. М.: ГЕОС, 2013. 232 с.
 23. Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р. Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // ДАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 1–7.
 24. Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 300 с.
 25. Antonovskaya G., Konechnaya Ya., Kremenetskaya E., Asming V., Kvaerna T., Schweitzer J., Ringdal F. Enhanced Earthquake Monitorin European Arctic // Polar Science. 2015. Vol. 9. Is. 1. P. 158–167.
 26. Arctic Petroleum Geology / Spencer, A.M., Embry, A.F., Gautier, D.L., Stoupakova, A.V. & Sørensen, K. (eds) // Geological Society Memoir N35. The Geol. Society. London, 2011. 661 p. DOI: 10.1144/M35.21.
 27. Artyushkov E.V., Belyaev I.V., Kazanin G.S., Pavlov S.P., Chekhovich P.A., Shkarubo S.I. Formation mechanisms of ultradeep sedimentary basins: The North Barents basin. Petroleum potential implications // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55. № 5–6. P. 649–667.
 28. Davies J.H. & Davies D.R. Earth's surface heat flux // Solid Earth. 2010. Vol. 1. P. 5–24.
 29. Gibbons S.J., Antonovskaya G., Asming V., Konechnaya Y.V., Kremenetskaya E., Kvaerna T., Schweitzer J., and Vaganova N.V. The 11 October 2010 Novaya Zemlya Earthquake: Implications for Velocity Models and Regional Event Location // Bulletin of the Seismological Society of America. 2016. Vol. 106. N. 4, doi: 10.1785/0120150302
 30. NORSAR [Electronic resort] – Access mode: <http://www.norsardata.no> (Date of appeal 03.05.2017).
 31. The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission. Site Provided by the University of North Dakota [Electronic resort] – Access mode: <http://www.heatflow.und.edu/data.html> (Date of appeal 03.05.2017).

Рецензент Е.А. Рогожин

Distribution of Seismicity and Heat Flow Anomalies in the Barents Sea Region

G. N. Antonovskaya^{1,*}, I. M. Basakina¹, and Ya. V. Konechnaya^{1,2}

¹Laverov Federal Research Center for Comprehensive Studies of the Arctic, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, 163000 Russia

²United Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Obninsk, Kaluga oblast, 249030 Russia
*e-mail: essm.ras@gmail.com

Received May 2, 2017

Abstract — The contemporary seismicity and heat flow density are indicators of geodynamic processes. A unified seismic catalog is compiled for the European sector of the Arctic region for the period of 1995–2015 with the data on the spatial distribution of heat flow from different databases. The theoretically possible relationships of heat flow values and seismic activity manifestations are discussed for this region, and combined geological and geophysical cross sections of the structure of the lithosphere are made in the latitudinal and meridional directions.

The most geodynamically active structures and zones of tectonic stress concentration are distinguished.

Keywords: Keywords: European sector of the Arctic region, Barents Sea region, seismic activity, heat flow, tectonic stresses

DOI: 10.1134/S001685211801003X