
ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ СВАЛЬБАРДСКОЙ ПЛИТЫ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмедзянов

Российский университет дружбы народов
Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093

Приводятся результаты измерения теплового потока в северной части Свальбардской плиты вблизи архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген. Измерения выполнялись с помощью новой модификации геотермического зонда «ГЕОС-М». Получено 7 измерений на полигоне «ЗФИ» и 20 — на полигоне «Шпицберген». На первом из полигонов вариации теплового потока от 30 до 85 мВт/м² связаны как с тектонической активизацией трога Франц-Виктория, так и со структурно-теплофизическими неоднородностями в разрезе осадочного чехла. Аномальные значения теплового потока (от 120 до 519 мВт/м²), измеренные в троге Орла (восточнее Северо-Восточной Земли архипелага Шпицберген), однозначно свидетельствуют о развитии здесь рифтовой зоны, полностью разрушившей континентальную кору. Температурное зондирование водной толщи выявило линзу отрицательных температур в интервале глубин от 30 до 100 м. Исследования проводились при финансовой поддержке Норвежского нефтяного директората, Президиума РАН, Отделения наук о Земле РАН и РФФИ.

В сентябре 2007 года при финансовой поддержке Норвежского нефтяного директората, Президиума РАН, Отделения наук о Земле РАН и РФФИ Геологическим институтом РАН была проведена экспедиция на НИС «Академик Николай Страхов» в северную часть Баренцева моря с целью изучения современных геодинамических процессов на окраине шельфа и на континентальном склоне. В программе этой экспедиции были запланированы геотермические исследования с помощью новой модификации геотермического зонда «ГЕОС-М».

В задачи работ входило измерение теплового потока в неизученных ранее районах вблизи архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген и измерение температуры водной толщи.

Геотермическая изученность Баренцевоморской (Свальбардской) плиты до настоящего времени остается весьма низкой.

Первой попыткой провести измерения плотности теплового потока на шельфе Баренцева моря можно считать геотермические работы по профилю: полуостров Рыбачий — Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), выполненные в 1976 году во время 23-го рейса НИС «Академик Курчатов» [1]. Исследования проводились одноканальным автономным погружным термоградиентографом ПТГ-ЗМТБ, в котором не фиксировались ни придонная температура воды, ни угол вхождения зонда в донные осадки, ни форма термограммы. Относительные погрешности измерений этим прибором оценивались в 30—40%. Полученные записи не позволяли отфильтровать степень влияния экзогенной волны, обусловленной периодическими сезонными колебаниями температуры у дна и придонными течениями.

Начавшаяся в 80-е годы интенсивная разведка нефтегазовых месторождений на шельфе сопровождалась бурением на акватории и на островах глубоких скважин, в которых проводились каротажные исследования, в том числе и термокаро-

таж. К этому времени относятся и первые скважинные измерения теплового потока в южной части Карского моря. Обработка термических измерений позволила оценить значения градиентов температуры, а теплофизические исследования керна скважин — теплопроводность пород. Таким образом были получены первые кондиционные измерения теплового потока в регионе [2], значения которого позже были уточнены В.Г. Левашкевичем [3]. В те же годы Геологический институт КНЦ РАН провел несколько морских экспедиций, в которых измерялся тепловой поток двухканальным автономным зондом ТГЦП. Площадные измерения сопровождалось режимными наблюдениями температуры морского дна на нескольких опорных станциях в южной и восточной частях Баренцева моря. Это позволило с помощью специально разработанного алгоритма [3] оценить глубинную компоненту теплового потока и количественно учесть влияние периодических колебаний температуры дна.

Анализ имеющихся на сегодняшний день скважинных и зондовых измерений позволяет говорить о тенденции повышения теплового потока в северо-восточном и северо-западном направлениях (рис. 1).

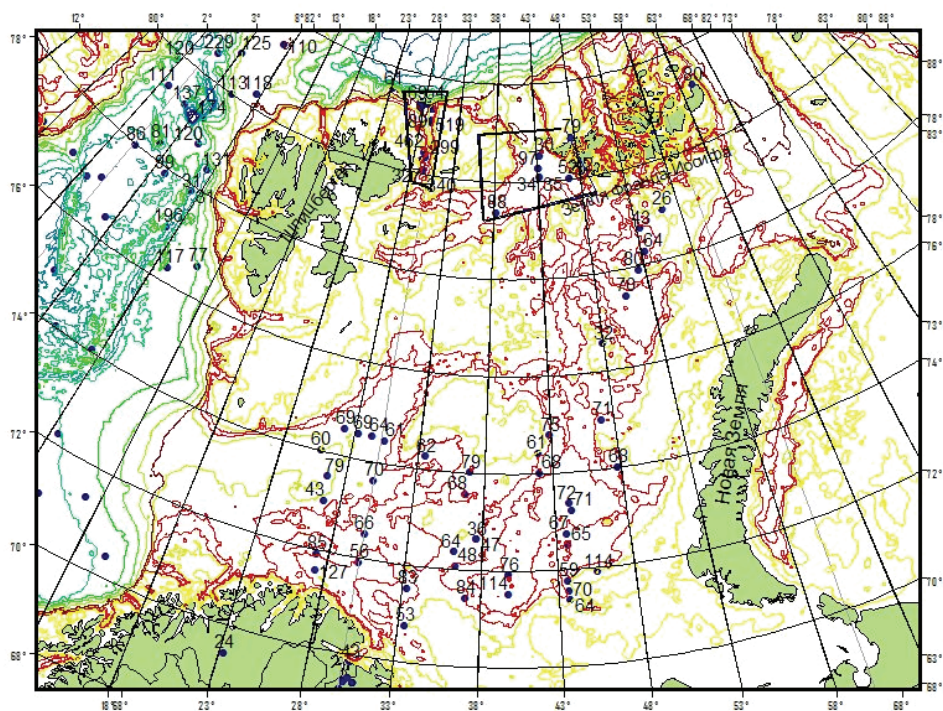


Рис. 1. Геотермическая изученность Баренцевского региона (обведены районы работ 25-го рейса)

Так, в зоне сочленения Кольской микроплиты и Балтийского щита среднее значение теплового потока составляет 54 мВт/м^2 , а в районах Северо-Баренцевской впадины и Центрально-Баренцевского поднятия — 70 мВт/м^2 . Такую тенденцию тренда теплового потока можно объяснить влиянием вторичных тектонических процессов в земной коре Баренцевоморской плиты, омоложение которых

происходит в северном направлении. Мы ранее уже высказывали предположение о рифтогенной природе вторичных термических процессов на основании интерпретации геотермических данных [4].

Работы в рейсе выполнялись с помощью новой модификации известной и апробированной серии геотермических зондов «ГЕОС» — зондом «ГЕОС-М».

Зонд предназначен для автоматического высокоточного измерения температуры донных осадков; градиента температур на четырех измерительных базах; теплопроводности осадков на тех же базах; гидростатического давления (глубины); температуры воды; угла внедрения зонда в осадки (угла отклонения от вертикали) и определения на основе полученных данных глубинного теплового потока Земли через дно акваторий. Кроме того, зонд позволяет осуществлять вертикальное температурное зондирование водной толщи. Вся получаемая информация по кабель-тросу поступает в наборный компьютер. По тому же кабель-тросу осуществляется управление процессом измерения.

Полигон «ЗФИ»

Полигон ЗФИ располагался на шельфе к западу от одноименного архипелага. На полигоне было выполнено семь измерений теплового потока (табл. 1) и температуры в толще воды. В результате измерений температуры водной толщи был обнаружен слой отрицательных температур в интервале глубин 30—80 м и изотермическая зона при глубинах более 370—380 м (рис. 2).

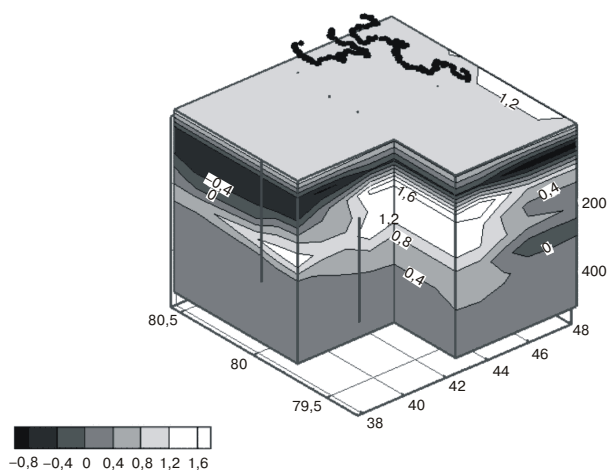


Рис. 2. 3D-блок-диаграмма распределения температуры воды на полигоне «ЗФИ»

Таким образом, была определена минимальная глубина (~370 м), при которой возможно измерять тепловой поток. При меньших глубинах сказывалась «неизотермичность» водной толщи, что обуславливало нелинейность термограммы в донных осадках и, соответственно, увеличение погрешности при оценке теплового потока. Поэтому для измерения теплового потока при глубинах 370 и более метров имелось ограниченное количество точек (рис. 3). На большинстве станций его можно было рассчитать только по показаниям температуры самых нижних баз зонда.

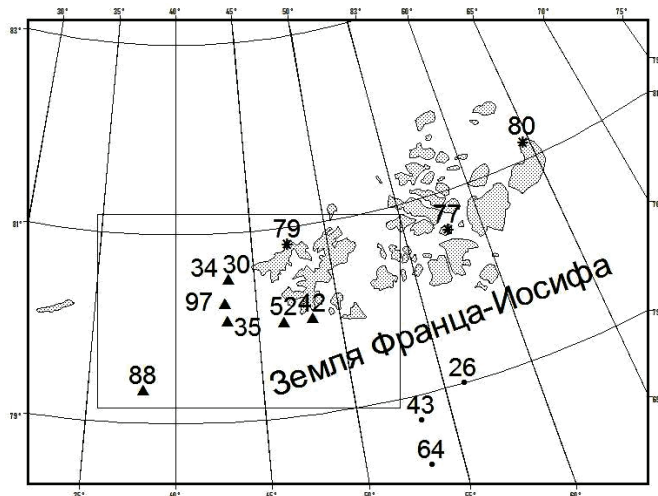


Рис. 3. Измерения теплового потока на полигоне ЗФИ (показаны треугольниками). Точками показаны три значения теплового потока, полученные при термическом каротаже в скважинах (с запада на восток): «Нагурская» (о. Земля Александры), «Хейса» (о. Хейса) и «Северная» (о. Грэм-Бэлл). Значения теплового потока в мВт/м²

На 3D-блок-диаграмме распределения температур в водной толще полигона (см. рис. 2) видно, что толщина слоя отрицательных значений убывает с севера на юг и с запада на восток полигона. В юго-восточной части полигона проявляется линза относительно повышенных температур воды. Причиной такого температурного режима водной толщи несомненно является приток более теплой и плотной воды из Атлантики, которая четко стратифицируется с холодной и более легкой арктической водой.

В целом, на полигоне отмечаются фоновые значения теплового потока (табл. 1). Однако мы наблюдаем два высоких значения (88 и 97 мВт/м²) по линии северо-восточного простираения, параллельной проливу Франц-Виктория, а также пониженные значения теплового потока (30—35 мВт/м²) севернее и южнее этой предполагаемой линии.

Таблица 1

Результаты измерений теплового потока на полигоне ЗФИ

№ станций	Дата измерения	с.ш.	в.д.	Глубина, м	ср. ТП (мВт/м ²)
2501	03.09.2007	79,3463	38,1587	314	88
2502	04.09.2007	80,0112	48,3466	375	42
2503	04.09.2007	80,0083	46,581	402	52
2505	04.09.2007	80,2472	43,0693	400	97
2506	04.09.2007	80,5039	43,3696	530	30
2507	05.09.2007	80,2472	43,0693	550	34
2509	07.09.2007	80,067	43,1672	390	35

Подобные вариации теплового потока, где на небольшом пространстве значения изменяются в два раза, характерны для районов развития эвапоритовых бассейнов в условиях деструкции коры. На западе ЗФИ, а именно в Александровском поднятии, вулканы с абсолютным возрастом 116 ± 5 млн лет четко оконтуриваются магнитной аномалией до 600 нТ [5]. Это позволило предложить модель деструкции континентальной коры (break-up) именно в этой части архипелага [6; 7]. С этапом break-up связан процесс образования соленосных толщ [8; 9]. Эвапо-

риты повсеместно встречаются в разрезах океанического чехла окраинных пери-океанических бассейнов Атлантики [10]. Преимущественно на деструктивной континентальной коре образуется система грабенов, выполненных эвапоритовыми осадками. Наиболее полно изучены солеродные бассейны Западно-Африканской пассивной окраины (Канарская котловина) и Северо-Американской (Ньюфаундленд) [11].

Осадочные эвапоритовые линзы выклиниваются обычно лишь в направлении к внутренним районам континента и практически непрерывны вдоль простираения окраины. Осадочный чехол окраины постепенно переходит в чехол абиссальной котловины океана. Наиболее крупные осадочные бассейны связываются с участками выхода к океану поперечных рифтов. В качестве примера мы приводим здесь разрез осадочного бассейна Ново-Скотия (Ньюфаундленд) (рис. 4), заимствованный из работы [5]. Среди синрифтовых осадков широко развита соль. На глубине 4500 м скважиной «Mohican 1-100» и 4100 м скважиной «Gloscar C-63» вскрыта соль [11], образующая штоки и купола.

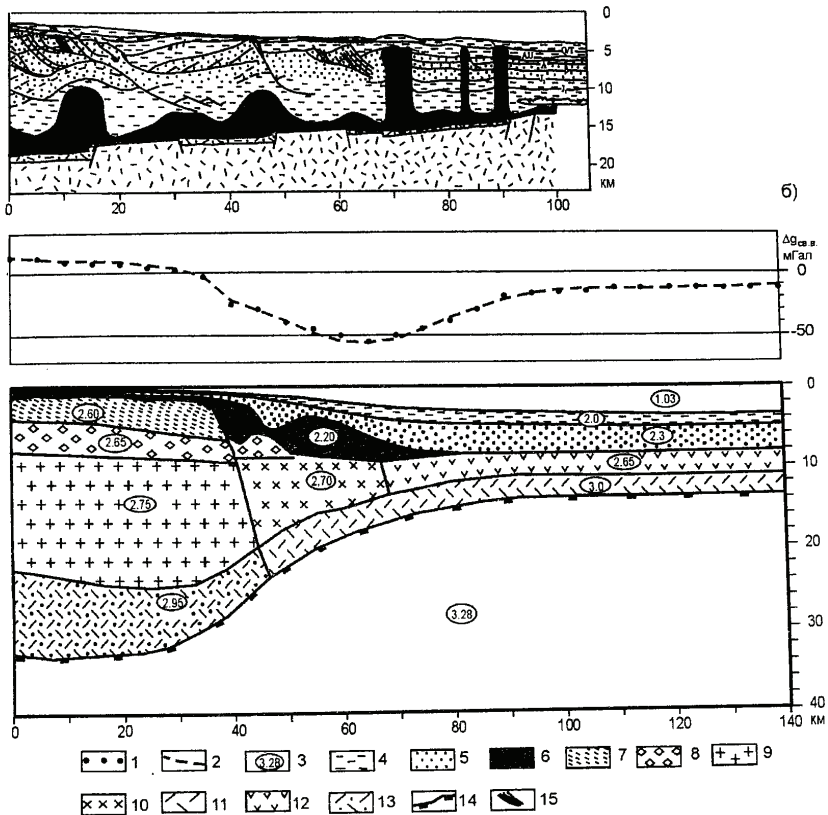


Рис. 4. Сравнение разрезов земной коры континентальных склонов Северной Атлантики (район о. Ньюфаундленд) (вверху) и Евразийского бассейна (район ЗФИ) (внизу)
 Кривая θ : 1 — наблюдаемая; 2 — расчетная; 3 — плотность, г/см^3 ; 4 — глины; 5 — песчаники; 6 — соль; 7 — триасовые отложения: алевроиты, аргиллиты; 8 — рифейские отложения, 9 — кристаллический фундамент; 10, 11 — нерасчлененный фундамент в районе о. Ньюфаундленд; 12 — второй слой океанической коры; 13 — третий слой океанической коры; 14 — граница М; 15 — разломы

На континентальном склоне ЗФИ в районе депрессий Пролива Британского канала и Кембридж выявлены локальные минимумы гравитационного поля в редукции Фая, которые В.В. Верба [12] ассоциировала с соляными диапирами. Позже это предположение подтвердилось результатами плотностного моделирования [5].

Теплопроводность каменной соли очень высока. Она составляет 5,0—5,5 Вт/(м·К), что в 3—4 раза превышает теплопроводность вмещающих терригенных пород, которая составляет 1,6—2,0 Вт/(м·К). Такой резкий контраст теплопроводности, а также крутые углы наклона границ раздела сред обуславливают перераспределение глубинного теплового потока [13].

Эффект перераспределения глубинного потока энергии в условиях структурно-теплофизических неоднородностей может проявляться и на полигоне ЗФИ. Станции теплового потока, в которых получены значения 88 и 97 мВт/м², могли быть измерены над апикальной частью куполов, а станции, где значения составляют 30, 34 и 35 мВт/м², — над межкупольными зонами.

Эта одна из возможных моделей, объясняющая вариации теплового потока, но для ее подтверждения требуется иметь результаты сейсмического профилирования методами МОВ-ОГТ или ГСП.

Полигон «Шпицберген»

Объектом изучения геотермического поля на полигоне «Шпицберген» был трог Орла, простирающийся от архипелага Короля Карла на юге до начала континентального склона Котловины Нансена на севере. Трог представляет собой узкую, выраженную в рельефе дна депрессию меридионального простиранья. Высота стенок депрессии составляет до 400 м. Дно депрессии расположено на глубине 470—520 м и довольно плоское. По простиранью трог выражен на протяжении почти 200 км при ширине всего 50 км.

Распределение температуры в водной толще полностью аналогично тому, которое описано для полигона «ЗФИ».

Тектоническая природа этой структуры была совершенно не ясна, и в литературе о ней имеются весьма отрывочные данные.

Измерения теплового потока планировалось провести с целью выяснения признаков современной тектонической активности.

В трог и на его продолжении в пределах континентального склона было выполнено 20 измерений (табл. 2), в результате которых были получены «сенсационные» результаты измерений теплового потока. Он составлял от 300 до 520 мВт/м², т.е. почти в 10 раз превысил уровень фонового теплового потока для Баренцева моря. Идеальная форма записи температуры датчиков в грунте (рис. 5) не оставляла сомнений в достоверности полученных результатов.

На всех «аномальных» станциях термограммы имели линейную или близкую к линейной форму. Это свидетельствовало о том, что измеренный тепловой поток является чисто кондуктивным. Искривление термограммы, что свидетельствовало бы о конвективной разгрузке глубинного флюида, здесь не наблюдалось.

Результаты измерений теплового потока на полигоне «Шпицберген»

№ станций	Дата измерения	с.ш.	в.д.	Глубина, м	ср.ТП, (мВт/м ²)
2523	14.09.2007	80,0604	29,3266	330	340
2525	14.09.2007	80,0642	29,337	330	338
2526	14.09.2007	80,3177	29,4437	440	299
2527	15.09.2007	80,409	29,309	430	484
2529	15.09.2007	80,4194	29,0828	530	462
2530	15.09.2007	80,4456	29,2863	485	438
2531	15.09.2007	80,4657	29,2331	465	407
2535	16.09.2007	80,2788	29,2516	410	327
2537	18.09.2007	81,3974	27,5607	2 330	54
2539	18.09.2007	81,1018	29,0919	340	474
2541	18.09.2007	81,0538	29,3096	310	519
2543	19.09.2007	81,325	29,395	1 185	118
2544	19.09.2007	81,319	29,21	1 010	122
2545	19.09.2007	81,3221	29,0358	1 010	107
2547	19.09.2007	81,4142	28,5693	2 530	53
2548	19.09.2007	81,3908	28,1994	2 250	77
2549	19.09.2007	81,3944	27,455	2 280	69
2550	19.09.2007	81,3501	27,4793	1 870	89
2551	19.09.2007	81,314	27,4789	1 400	90
2552	20.09.2007	81,2616	27,4984	770	326

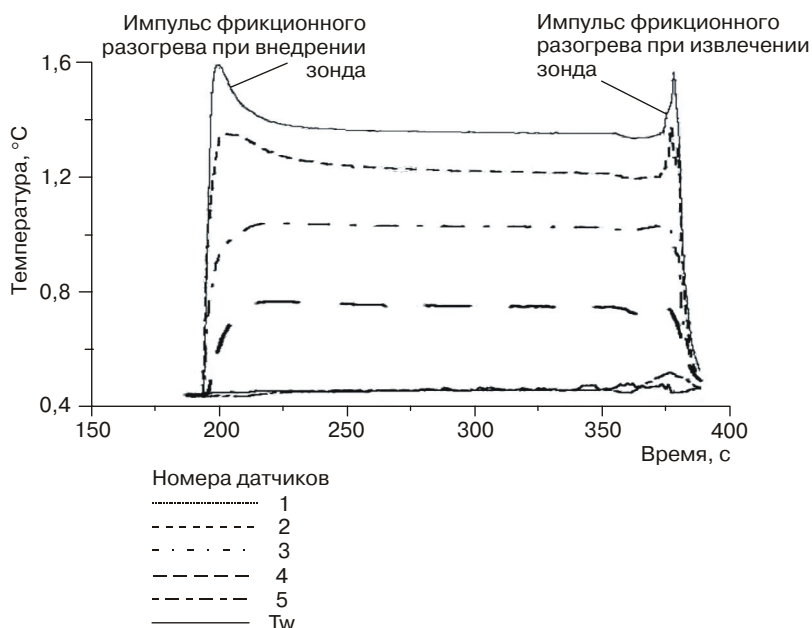


Рис. 5. Пример записи температур датчиков зонда в грунте (ст. 2526)

Аномально высокий тепловой поток характерен для всего трога Орла и для его продолжения в пределах континентального склона вплоть до изобаты 1200 м (рис. 6).

Только при больших глубинах отмечается снижение теплового потока, хотя и на глубине от 1400 м до 1870 м мы измерили повышенные значения теплового потока 89 и 90 мВт/м².

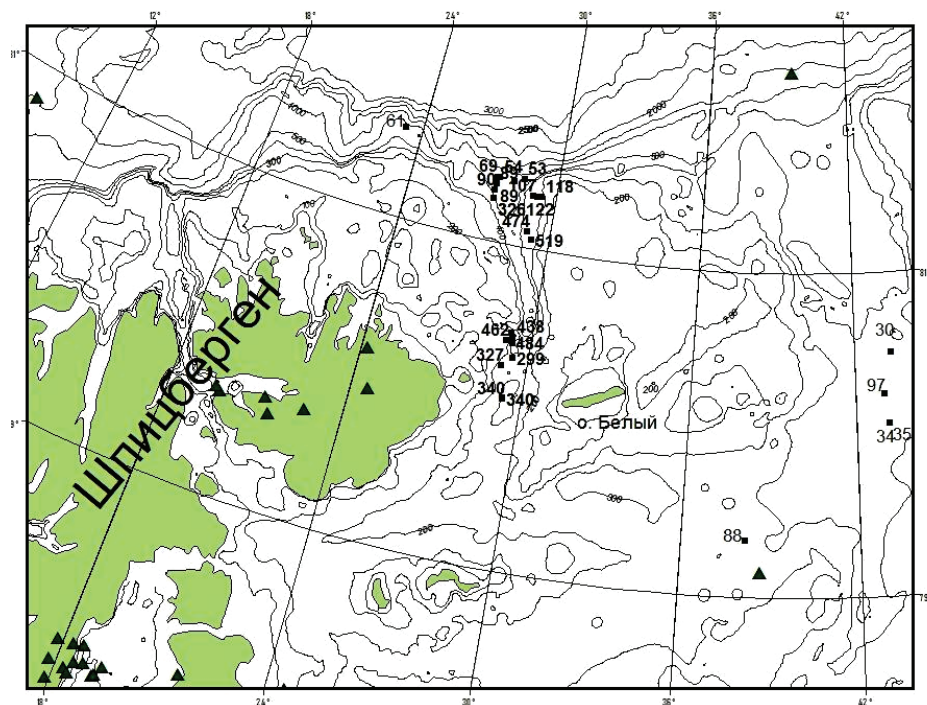


Рис. 6. Расположение станций измерений теплового потока на полигоне «Шпицберген»

Морфология трога, а также полученные впервые для этой структуры геотермические данные позволяют говорить о рифтовой природе трога Орла. Этот рифт образовался в результате деструкции края континентальной Свальбардской плиты (см. тот же вывод для параллельного трога Франц-Виктория), которая, по-видимому, активно продолжается в настоящее время. Большая скорость накопления терригенных и моренных отложений обуславливает экранирование зон разгрузки глубинного флюида на морское дно¹.

Существование рифтовых структур, ортогональных простиранию континентального склона на краю Свальбардской плиты, указывалось и ранее [14]. Однако обнаруженный нами активный рифт — трог Орла — выделяется впервые.

Экстраполяция температур в нижнее полупространство показывает, что на глубине 4,0—4,5 км под трогом Орла могут быть встречены солидусные температуры. Это говорит о том, что деструкция континентальной коры произошла на всю ее мощность и горячее мантийное вещество уже внедрилось в фундамент, а возможно, проникло в нижние слои осадочного чехла.

Обнаруженная нами активная тектоническая структура требует дальнейшего изучения. В частности, желательно было бы провести гидрохимическое опробование придонных слоев с целью анализа индикаторов мантийного теплового потока, например таких, как отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$.

¹ Хотя при детальном придонном гидрохимическом исследовании не исключено нахождение очагов гидротермальной разгрузки.

Выводы

Получено 27 новых измерений теплового потока в не изученных ранее районах северной части Баренцева моря вблизи архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген.

Установлены вариации теплового потока на полигоне «ЗФИ» в пределах 34—88 мВт/м². Их можно объяснить перераспределением теплового потока в условиях структурно-теплофизических неоднородностей.

Измерения на полигоне «Шпицберген» в пределах Трога Орла дали аномально высокие значения теплового потока (от 107 до 519 мВт/м²). Это однозначно доказывает наличие деструкции континентальной коры окраины шельфа. Аномалия распространена вплоть до абиссали Котловины Нансена СЛО.

В результате температурного зондирования водной толщи установлено существование линз с отрицательными температурами на обоих полигонах в интервале глубин 30—100 м. Относительно теплая и более соленая вода, попадающая в бассейн СЛО из Атлантики, распространяется в интервале глубин от 100—120 до 200 м.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-05-00012) и Инновационной образовательной программы «Создание инновационных образовательных программ и формирование инновационной образовательной среды, позволяющих эффективно реализовывать государственные интересы РФ через систему экспорта образовательных услуг».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Методические и экспериментальные основы геотермии. — М.: Наука, 1983. — С. 181—185.
- [2] Цыбуля Л.А., Левашкевич В.Г. Тепловое поле Баренцевоморского региона. — Апатиты, 1992. — С. 114.
- [3] Левашкевич В.Г. Закономерности распределения геотермического поля окраин Восточно-Европейской платформы (Баренцевоморский и Белорусско-Прибалтийский регионы): Автореф. докт. дисс. — М.: МГУ, 2005.
- [4] Хуторской М.Д., Подгорных Л.В., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. Термотомография Западно-Арктического бассейна // Геотектоника. — 2003. — № 3. — С. 79—96.
- [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 // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Тр. НИИГА-ВНИИ Океангеология. — Т. 203. — СПб., 2004. — С. 169—175.
- [6] Грачев А.Ф. Новый взгляд на природу магматизма Земли Франца-Иосифа // Физика Земли. — 2001. — № 9. — С. 49—61.
- [7] Rowley D.B., Lottes A.L. Plate-kinematic reconstructions of the North Atlantic and Arctic: late Jurassic to present // Tectonophysics. — 1988. — 155. — P. 73—120.
- [8] Шеридан Р. Атлантическая континентальная окраина Северной Америки // Геология континентальных окраин. — М.: Мир, 1978. — Т. 2. — С. 82—101.
- [9] Забанбарк А. Пассивные континентальные окраины Западной Африки и особенности нефтегазоносности их глубоководных частей // Океанология. — 2000. — Т. 42. — № 2. — С. 308—314.

- [10] Боголепов А.К., Шитлов Э.В., Юнов А.Ю. Новые данные о соленосных бассейнах Западно-Арктического шельфа Евразии // Докл. АН СССР. — 1991. — Т. 317. — № 4. — С. 718—722.
- [11] Bates J.L. East coast basin /Atlas series Scotian shelf. — 1991. GSC.
- [12] Верба В.В. Сравнительная геолого-геофизическая характеристика Североморского и Баренцевоморского осадочных соленосных бассейнов // Нефтегазоносность Мирового океана. — Л.: ПГО «Севморгеология», 1984. — С. 34—39.
- [13] Хуторской М.Д., Антипов М.П., Волож Ю.А., Поляк Б.Г. Температурное поле и трехмерная геотермическая модель Прикаспийской впадины // Геотектоника. — 2004. — № 1. — С. 63—73.
- [14] Богданов Н.А. Тектоника Арктического океана // Геотектоника. — 2004. — № 3. — С. 13—30.

GEOHERMAL FIELD OF SVALBARD PLATE NORTHERN PART: PROBLEMS AND EVALUATIONS

M.D. Khutorskoy, V.R. Akhmedzianov

Peoples Friendship University of Russia
Podolskoye shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093

Heat flow measurements data in the northern part of Svalbard plate near Franz-Josef Land (FJL) and Spizbergen are resulted. Measurements were carried out by new updating geothermal probe «GEOS-M». Seven heat flow measurements on «FJL» and twenty — on «Spizbergen» are received. On first of them heat flow variation from 30 up to 85 mW/m² are connected both with trough valley Franz-Victoria tectonic activization and with structural and thermal conductivity heterogenesis inside sedimentary cover. Abnormal heat flow values (from 120 up to 519 mW/m²), measured in trough Orly (to the eastern of Spizbergen North-East Land), testify to rift zone development which completely destroyed a continental crust. Water temperature sounding discovered a layer of negative temperatures in the depths from 30 to 100 m. Researches were sponsored of the Norwegian oil Management, RAS Presidium, RAS Earth sciences departament and the Russian Basic Research Foundation