

УДК 550.361+553.9

ТЕРМОБАРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КАТАГЕНЕЗА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА АРХИПЕЛАГОВ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА БАРЕНЦ-РЕГИОНА (ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА, НОВАЯ ЗЕМЛЯ)

© 2023 г. Д. С. Никитин^а, *, М. Д. Хуторской^а, О. С. Самсонова^а

^аГеологический институт РАН,
Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

*e-mail: ndsnomination@mail.ru

Поступила в редакцию 19.12.2022 г.

После доработки 21.02.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Рассмотрена локализация находок природных битумов (ПБ) на архипелагах Западного сектора Российской Арктики. Обсуждается природа их появления в связи с геотермическим режимом недр. На основе численного моделирования рассчитаны температуры и плотность теплового потока в геометрии 2D вдоль сейсмогеологических профилей и в геометрии 3D для изометричной структуры архипелага Земля Франца-Иосифа. Сделан вывод, что все отмеченные проявления ПБ генетически связаны с гидротермальной деятельностью, признаки которой адекватно фиксируются в геотемпературном поле.

Ключевые слова: природные битумы, гидротермальный процесс, катагенез, температура, тепловой поток, моделирование.

DOI: 10.31857/S0024497X23700210, **EDN:** WRMYIP

Генерация углеводородов (УВ), их первичная и вторичная миграция, формирование и пространственное размещение залежей и месторождений, консервация и диссипация скоплений нефти и газа реализуются в рамках геологической системы “порода–природные флюиды” и по существу являются производными разномасштабных многовекторных региональных и локальных геофлюидодинамических процессов.

Вертикальная фазовая зональность УВ в разрезе осадочного чехла зависит, прежде всего, от возрастания температуры при погружении нефтегазопроизводящих толщ на глубины свыше 1.5–2.5 км. Существенным является влияние и других факторов, таких как состав и тип исходного органического вещества (ОВ) нефтегазоматеринских толщ (НГМТ) – сапропелевого, гумусового или же смешанного сапропелево-гумусового; палеогеографических, палеотектонических, литолого-фациальных и палеогеохимических условий накопления и захоронения исходного ОВ; характера и степени метаморфизма исходного ОВ еще в осадке; палеотектонических условий развития бассейна седиментации, т.е. направленности режима тектонических движений; величины палеогеотермического градиента; геологической продолжительности нахождения УВ после их генерации в определенных термодинамических условиях,

т.е. продолжительности воздействия на УВ тех или иных величин палеотемпературы и палеодавления; наличия, состава и условий распространения экранирующих толщ пород-флюидоупоров над нефтегазогенерирующими комплексами; палеогидрогеологических условий бассейна седиментации [Бакиров, Бакиров, 2012].

В зависимости от того или иного сочетания перечисленных факторов абсолютные величины глубин интенсивного нефте- и газообразования, а также фазовое состояние (зональность) УВ в разрезе осадочных образований в отдельных областях могут колебаться в широких пределах.

Выяснение закономерностей зонального размещения УВ, находящихся в разном фазовом состоянии в разрезе осадочного чехла, способствует обоснованному прогнозированию зон возможной концентрации наибольших запасов преимущественно нефти и газа в определенных интервалах глубин.

В линейке углеводородов широко представлены проявления природных битумов, которые почти повсеместно распространены в нефтегазоносных бассейнах и связанных с ними тектонически активных зонах. В рассеянном состоянии они также встречаются на больших глубинах в пределах нефтегазовых месторождений. Природные битумы, так же, как и другие горючие полезные

Таблица 1. Классификация природных битумов в сравнении с нефтью [Поконова, 2005]

Битум	С, мас. %	Н, мас. %	О + N + S, мас. %	ρ , кг/м ³	Масла, % мас.	Коксовое число
Нефть	84–86	12–14.0	0.5–4.0	750–960	Более 65	0–5
Мальты	80–87	6–13.0	3–7.0	950–1050	40–65	5–15
Асфальты	76–86	7–12.0	5–10.0	1000–1120	25–40	10–20
Асфальтиты	75–86	6–11.0	5–10.0	1050–1120	5–25	10–55
Кериты	75–91	5–9.0	5–10.0	1050–1300	1–15	25–85
Антраксолиты	73–99	1–5.0	0.5–5.0	1000–1300	—	80–100

ископаемые — нефть, газ, ископаемые угли, горючие сланцы, торфы объединяются под термином “каустобиолиты”. Этот термин указывает на генетическое единство всех горючих полезных ископаемых.

Каустобиолит в переводе с греческого означает: горючий камень биогенного происхождения. Термин был предложен в 1908 г. немецким ученым Г. Потонье для углей и горючих сланцев, которые им подразделялись по вещественному составу на гумолиты, сапропелиты и липтобиолиты. Позднее этот термин был распространен на все богатые органическим веществом горные породы и минералы, в которых ОВ появилось в результате преобразования биохимических структур растительных и животных организмов под воздействием геолого-геохимических факторов.

При изменении нефти в естественных термобарических условиях образуются многочисленные органические соединения с первичной углеводородной основой — природные битумы, которые имеют вязко-жидкую, вязкую и твердую консистенцию. Они представлены широким спектром веществ — от высокоуглеродистых образований до высокомолекулярных углеводородов или их сложных смесей, содержащих асфальтово-смолистые компоненты.

По мере истощения запасов легких УВ важным сырьевым источником становятся тяжелые высоковязкие нефти и природные битумы. Мировые ресурсы тяжелых нефтей и природных битумов значительно превышают запасы легких и оцениваются более чем в 810 млрд т [Муслимов и др., 2012]. Наибольшими запасами располагают Канада и Венесуэла, значительные запасы также имеют Мексика, США, Россия, Кувейт и Китай. По разным оценкам на территории РФ сосредоточено от 30 до 75 млрд т тяжелой нефти и природных битумов [Дорохин, Палий, 2004].

Природные битумы залегают в недрах в твердом, вязком и вязко-пластичном состояниях. Они являются сложной смесью углеводородов, гетероатомных и высокомолекулярных соединений, содержащих кислород, серу, азот и металлы [Муслимов и др., 2012]. С генетической точки зрения к природным битумам относят естествен-

ные производные нефти (мальты, асфальты, асфальтиты, кериты, гумино-кериты, озокериты, антраксолиты и др.) и их аналоги (нафтоиды) [Богомолов и др., 1995]. Классификация природных битумов и их отличия от нефти приведены в табл. 1.

В программе хозяйственного освоения арктических акваторий и архипелагов важнейшим направлением деятельности является энергетическое обеспечение региона. Сейчас мы говорим об обеспечении объектов геологоразведочных работ, метеостанций на островах, объектов военной инфраструктуры. Но по мере развития территорий на архипелагах должны появиться поселения геологов, метеорологов, рыбаков, пограничников, должны быть организованы склады, причалы и ремонтные базы. И все это требует устойчивой энергообеспеченности. Несомненно, что надо рассчитывать на местное, а не на привозное энергетическое сырье, транспортировка которого делает нерентабельными все планы освоения территории.

На акватории Баренц-региона Западно-Арктической полярной зоны России открыты крупные месторождения углеводородов. В Баренцевом море крупнейшими являются газоконденсатные месторождения — Штокмановское и Ледовое; газовые — Северо-Кильдинское, Мурманское, Лудловское. В Печорском море — нефтегазоконденсатное Северо-Гуляевское и четыре нефтяных (Долгинское, Приразломное, Медынское-море и Варандей-море). При освоении месторождений углеводородов перспективы энергетической стабильности архипелагов Земля Франца-Иосифа и Новая Земля, островов Колгуев и Вайгач становятся вполне реальными. Но существует еще более рентабельный путь получения топлива для островных котельных — это добыча битумов, которые в значительном количестве открыты на островах, как в процессе бурения, так и за счет проявлений дегазации углеводородов.

Таблица 2. Состав битумов из отложений арх. Шпицберген и о. Мелвежий (составлено по данным Б.А. Клубова, А.В. Павлова, Т.М. Пчелиной)

Возраст пород	Район	Автор коллекции, год сбора	Порода	Содержание на исходную породу (%)			Молекулярный вес	Элементный состав			Групповой состав, %				С/Н	Тип битума
				Сорг	бит А	хлороформенные бит С		С	Н	O + N + S	масла	смоляные	смоля спирто-бензолные	асфальтены		
T ₂ an	о. Эдж Бло-Фьорд	Б.А. Клубов, 1965	Черные листоватые аргиллиты	–	–	–	0.9415 (удельный вес, г/см ³)	–	–	1.14	66	5	15.8	13.2	–	Мальта
T ₂ ld	о. Эдж Бло-Фьорд		Черные листоватые аргиллиты	–	–	–	684	79.4	9.6	11	25.3	21.9	21.3	29.6	–	Асфальт
T ₂ an	о. Баренца, м. Вальдбург		Битум в виде натеков	Не определен	99	Не определен	689	83.8	10.3	5.9	43.5	17.6	10.6	27.9	8.1	Мальта
T ₃ n	о. Вильгельма		–	–	–	–	608	87.7 (81.9)	12.5 (11.5)	2.8 (6.6)	48	0.1	45.8	5.8	–	Асфальт
T ₂ ld	о. Эдж, м. Ли		Битум в виде натеков	Не определен	99	Не определен	684	79.4	9.6	11	25.3	21.9	21.3	29.6	8.3	Асфальт
T ₂ an	о. Баренца, восточный берег	А.А. Кра- сильщиков, Ю.Я. Лив- шиц, Ю.И. Мокин, Т.М. Пче- лина, 1971	Черные листоватые аргиллиты	0.71	0.59	0.12	280	84.6	10.9	4.5	48.8	24	19.3	4.3	7.8	Мальта
T ₁ ol	о. Мелвежий		Алеврито-глинисто-карбонатная порода	0.57	0.11	0.01	–	85.7	12.6	1.7	–	–	–	–	6.8	Мальта
T ₁ ol	о. Мелвежий		Глинистый доломит	0.41	0.11	0.01	–	84.5	13.1	2.4	–	–	–	–	6.5	Мальта

Таблица 2. Продолжение

Возраст пород	Район	Автор коллекции, год сбора	Порода	Содержание на исходную породу (%)			Молекулярный вес	Элементный состав			Групповой состав, %				С/Н	Тип битума
				C _{орг}	бит А	хлороформенные бит С		С	Н	O + N + S	масла	смолы бензольные	смолы спирто-бензольные	асфальтены		
T _{2 l}	з. Серкап	Т.М. Пчелина, 1986	Алевролит сильно-глинистый	1.09	>0.01	0.02		64.8	8.3	26.9	—	—	—	—	7.8	Мальта
J _{3 ox}	з. Серкап		Доломит	1.58	0.01	0.02		83.3	8.7	8	—	—	—	—	9.6	Асфальт
C _{Г1 h}	з. Серкап		Песчанистый алевролит	1.12	0.02	0.01		86.1	8.7	5.2	—	—	—	—	9.9	Асфальт
C _{Г1 b}	з. Серкап		Песчаник мелко-средне-зернистый	0.42	0.02	>0.01		84.4	12.1	3.1	—	—	—	—	7	Нефть-мальта
C _{Г1 ap}	з. Серкап		Алевролит песчанистый	0.88	0.12	0.01		86.9	13.4	—	—	—	—	—	6.5	Нефть
T ₁	м. Фестинг	А.В. Павлов, Т.М. Пчелина, 1963	—	—	—	—	284	84.9	13	2.1	78.9	18.8	—	2.3	6.5	Нефть
T ₁	м. Фестинг		Алевролит мелкозернистый глинисто-известковистый	0.59	0.15	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Мальта
T ₂	м. Фестинг		—	—	—	—	485	85.7	11.7	2.6	51.2	36.2	—	12.6	7.3	Мальта
T ₂	м. Фестинг		Алевролит мелкозернистый глинисто-известковистый	1.43	0.35	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Мальта
T ₁	Адвент-Фьюрд, Лузитаниядален		Алевролит глинисто-известковистый	0.87	0.27	0.08	364	86.2	11.6	2.2	64.2	31.5	—	4	7.4	Мальта

Таблица 2. Продолжение

Возраст пород	Район	Автор коллекции, год сбора	Порода	Содержание на исходную породу (%)			Молекулярный вес	Элементный состав			Групповой состав, %			С/Н	Тип битума
				C _{орг}	бит А	хлороформенные бит С		С	Н	O + N + S	масла	смолы бензольные	смолы спирто-бензольные	асфальтены	
T ₂	Адвент-Фьорд, Лузитаниядаген	А.В. Павлов, Т.М. Пчелина, 1963	Аргиллит алевролитистый слабо-известковистый	1.23	0.34	0.07	363	86.3	11.4	2.3	71.2	26.4	—	2.6	Мальта
T ₂	Адвент-Фьорд, Лузитаниядаген		Глинисто-известковистая порода	2.03	0.21	0.07	351	85.2	11	3.8	58.1	31.8	—	10	Мальта
J ₃	Адвент-Фьорд, Лузитаниядаген		Известняк из конкреции	2.54	0.32	0.1	309	85.3	11.3	3.4	66.5	24.3	—	8.8	Мальта
D ₁	д. Мимердален	Т.М. Пчелина, 1986	Красноцветы	0.09–0.22	>0.5%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Сапропель
D ₂	д. Мимердален		Песчаники	0.4–0.01–0.22, 0.39–0.74	0.22–0.44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Асфальт
D _{3f}	д. Мимердален р. Муни, р. Одни		Битуминозные глинистые породы	1.66–2.77	0.15–0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Мальта
D _{3f}	д. Мимердален р. Муни, р. Одни		Битуминозные песчаники	1.55	1.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Мальта
T ₁	м. Сельмансет, Ван-Кейлен Фьорд		—	—	—	—	367	80.7	12.5	6.8	64.8	23.3	—	6.3	Нефть-мальта

Таблица 2. Окончание

Возраст пород	Район	Автор коллекции, год сбора	Порода	Содержание на исходную породу (%)			Молекулярный вес	Элементный состав			Групповой состав, %				C/H	Тип битума
				C _{орг}	бит А	хлороформенные бит С		С	Н	O + S	масла	смоля бензолные	смоля спирто-бензолные	асфальтены		
T ₁	м. Сельмансет, Ван-Кейлен Фьорд	Т.М. Пчелина, 1986	—	—	—	—	352	80.7	12.8	6.5	67.9	18.4	—	4.9	6.3	Нефть-мальта
T ₂	м. Сельмансет, Ван-Кейлен Фьорд		—	—	—	—	325	85.7	13.2	1.1	78.3	14	—	3.2	6.5	Нефть-мальта
J ₃	м. Сельмансет, Ван-Кейлен Фьорд		—	—	—	—	423	76.1	9.69	14.21	41.46	49.03	8.01	—	7.9	Мальта
J ₃	м. Сельмансет, Ван-Кейлен Фьорд		—	—	—	—	317	84.38	12.8	2.82	52.7	21.73	8.96	14.96	6.6	Нефть-мальта
Ст ₁	м. Сельмансет, Ван-Кейлен Фьорд		—	—	—	—	—	81.83	10.09	8.08	32.68	34.53	11.66	22.06	8.1	Мальта
T _{1 ol}	б. Уиче		Аргиллиты	3.03	0.5	0.03	350	83 бит А	11.2	4.2+ (1.6)	64.4	19	8.6	2.9	7.4	Мальта
T _{2 а}	б. Уиче		Аргиллиты	10.76	0.73	0.1	320	83.4	10.6	4+(2)	54.4	15.5	14.6	7	7.9	Мальта
J _{3 v}	б. Агард		Аргиллиты	2.24	0.35	0.02	290	85.6	12.2	1.6+ (0.6)	78.8	8.5	5.1	1.1	7	Нефть-мальта
J _{3 v}	б. Агард		Аргиллиты	3.81	0.39	0.02	290	87.6	11.8	0.2+ (0.4)	78.7	10	5.5	2	7.4	Нефть-мальта
J _{3 km}	б. Агард		Глинисто-алевритисто-кальцитово-анкеритовая конкреция	0.85	0.12	0.02	270	85.5	12.5	1.3+ (0.7)	86.6	6.4	2	3.5	6.8	Нефть

В пористых среднетриасовых породах архипелага ЗФИ встречены битумы, соответствующие по составу нормальным мальтам. Образец подобных черных аргиллитов со среднетриасовой фауной и содержанием ОВ 2.68% был поднят со дна желоба Франц-Виктория НИС “Профессор Логачев” в 1994 г. В пробе зафиксировано повышенное количество хлороформенного экстракта, соответствующего по составу мальтам.

По структурно-тектоническим и литолого-петрографическим условиям были выделены две группы битумопроявлений [Безруков и др., 2006].

Первая группа включает в себя первично-миграционные битумы. Как правило, они приурочены к выходам средне-верхнеюрских отложений, обладающих высоким нефтегазоматеринским потенциалом ($C_{орг., ср} = 5-7\%$). В эту группу отнесены только макропроявления битумов в нортбрукской свите средне-позднеюрского возраста на о. Грем-Белл, где выделялся горизонт киммериджского яруса, представленный алевроитскими глинами черного цвета, вязкими, плотными, с запахом керосина.

Вторая группа битумопроявлений генетически связана с гидротермальной деятельностью и приурочена к интрузивным образованиям: дайкам и пластовым силлам долерито-базальтов позднеюрско-раннемелового возраста, а также с гидротермальными жилами, секущими их. По мнению В.М. Безрукова и др. [2006], модель формирования битумов этой группы носит характер вторичной миграции, механизм которой выглядит следующим образом: потоки гидротерм пронизывали залежи углеводородов, либо толщи, обогащенные рассеянным органическим веществом, и таким образом осуществлялся перенос углеводородов. С дайками и приуроченными к ним низкотемпературными кварц-карбонатными жилами связано большинство проявлений битумов, в том числе и жидко-вязких. Многочисленные наблюдения служат доказательством этой модели. В одних порах, камерах и трещинах могут вместе находиться различные по составу битумы: в краевых частях пустотного пространства присутствуют твердые битумы типа керита (иногда низшего антраксолита), а во внутренних — жидко-вязкие мальты, асфальты и асфальтиты.

В песчаниках грембелской серии верхнетриасового—нижнеюрского возраста наблюдается широкий спектр битумов по вещественному составу, от жидко-вязких мальт и окисленных асфальтов до выветрелых оксикеритов. Сильнее всего преобразованы битумы (асфальты и асфальтиты), пропитывающие удаленные от даек песчаники. И чем ближе к дайкам, тем чаще в песках и песчаниках встречаются мальты и слабо измененные асфальты. В результате исследований [Безруков и др., 2006] установлено, что наи-

менее преобразованные битумы класса нефтей, мальт и асфальтов тяготеют к центральной группе островов и, вероятно, связаны с гидротермальной деятельностью, обусловившей появление разрывных нарушений и сопутствующих им интрузий. Механизмами битумогенеза в данном случае могут являться не только процессы вторичной миграции, сопровождающие гидротермальную деятельность, но и абиогенные процессы низко- и высокотемпературного полимерного синтеза простейших углеводородов в самих гидротермальных растворах, так как доказана возможность синтеза метана из магматической воды и уголекислоты [Летников и др., 1985]. На высокотемпературных стадиях гидротермального процесса образуются антраксолит и керит, а при меньших температурах — мальты и асфальты.

Как отмечает в своей диссертации И.Ю. Винокуров [1998], приведенные примеры битумопроявлений на ЗФИ свидетельствуют о том, что гидротермальный процесс здесь был многоэтапным, продолжавшимся длительное время и, возможно, еще относительно недавно повторявшимся. Температурный режим этих гидротерм был различен. Установленные проявления природных битумов тесно связаны с теми гидротермами, которые пронизывают погребенные нефтегазовые залежи.

Подобные проявления битумов, связанные с гидротермальной деятельностью, известны в западной части Мексиканского залива [Stern et al., 2011]. Там обнаружены каналы гидротермальной разгрузки, по которым нефть поднимается к поверхности, а битумы отмечаются на стенках даек. На ЗФИ тот же процесс установлен на о. Земля Вильчека.

Эти наблюдения свидетельствуют о происхождении природных битумов при активном гидротермальном процессе, признаки которого из-за низкой температуропроводности земной коры сохранились в современном тепловом поле. Мы ниже рассмотрим проявления этих признаков на основе численного геотемпературного моделирования.

Проявления твердых природных битумов в пределах Новоземельской складчатой области, куда относятся арх. Новая Земля, о. Вайгач и Пай-Хой, связывают с различными типами гидротермальной минерализации, а также тектоническими процессами [Черевко, 1999]. Находки антраксолитов приурочены к терригенно-карбонатным толщам силурийского, девонского и каменноугольного возрастов.

Степень катагенетической преобразованности средне-верхнепалеозойских отложений южного о. Новая Земля достаточно высокая, что косвенно подтверждается широким распространением в них антраксолитов. Наибольшее количество проявлений антраксолитов приурочено к нижне-

среднедевонским, наиболее богатым ОВ толщам в южной части Новой Земли. Однако эти отложения в значительной степени преобразованы до стадии катагенеза АК₁₋₂ и, по всей видимости, реализовали свой нефте- и газоматеринский потенциалы. По-видимому, ОВ рассматриваемых толщ в ходе геологической истории потеряло 99% миграционно-способных дериватов [Клубов, Безруков, 1992].

Самое северное битумопроявление на Новой Земле расположено между мысами Мон и Йогансена, здесь в породах доломитизированных силурийских известняков, выполненных кальцитом, наблюдался антраксолит (табл. 3, рис. 2). На о. Вайгач проявления антраксолитов связаны с галенит-сфалеритовым типом минерализации.

Из всех проявлений твердых битумов архипелага Новая Земля выделяется единственное проявление жидкого битума типа мальты в породах верхнедевонского возраста в районе п-ова Балашов [Клубов, Кораго, 1990]. Впервые это проявление было описано в 1933 г. И.Ф. Пустоваловым. По геохимическим данным мальты с п-ова Балашов представляют собой первично миграционные образования. Предполагается, что материнскими толщами в данном случае служили темно-серые известковистые алевроитовые сланцы [Клубов, Кораго, 1990]. Их появление обеспечено благоприятным сочетанием материнских пород, ОВ которых достигло оптимального катагенеза (не выше МК₂) и пород-коллекторов. Обнаружение на мысе Балашова первично-миграционных битумов свидетельствует о том, что генерационный потенциал нижнедевонских отложений в этом районе далеко не исчерпан.

На о. Долгий битумопроявления выявлены лишь в двух районах (см. рис. 2) и в небольших количествах. В 1975 г. И.С. Гольдбергом были обнаружены антраксолиты в трещинах, залеченных кальцитом и флюоритом, секущих битуминозные известняки верхнесилурийского возраста. В породах нижнекаменноугольного возраста наблюдались примазки желтого и коричневого битума типа асфальта в микропорах и по спайности кристаллов кальцита, доломита в пористых известняках [Гольдберг, 1981] (табл. 4).

ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Широкие возможности для применения новых технологий изучения геологического строения недр и прогноза нефтегазоносности в пределах осадочных бассейнов и архипелагов предоставляют данные вдоль длинных разрезов — геотравверсов, построенных с помощью материалов профилирования МОВ-ОГТ и зондирования (ГСЗ), которые выполнялись в арктических морях силами

геофизических экспедиций на протяжении последних 40–45 лет.

Геотермическое моделирование вдоль сети сейсмогеологических геотравверсов проводилось с целью определения глубинных температур и плотности теплового потока в земной коре, для оценки глубины залегания температурных интервалов, отвечающих различной степени катагенетической преобразованности ОВ, а также для исследования характерных проявлений геотемпературного поля, контролирующих локализацию вероятных месторождений углеводородов. Выявленные закономерности в характере поведения теплового поля могут быть использованы для прогнозирования нефтегазоносности неразбуренных участков Арктического шельфа.

Важной особенностью численного моделирования геотермического поля является переход к трехмерным моделям, которые априорно для арктических осадочных бассейнов, имеющих изометричное строение, являются наиболее приемлемыми. На основе таких моделей могут быть построены произвольно ориентированные плоскости-срезы, наилучшим образом подчеркивающие особенности температурного распределения. Фактически, такая методика давно известна под термином “томография”.

Томографический метод в науках о Земле развивается в наше время не менее активно, чем в медицине, астрономии или технике. Термин “томография” стал применяться в геологической терминологии лишь 30–40 лет назад, хотя эта методика под названием “изучение глубинного строения Земли”, используется уже больше ста лет.

Преимущество томографической модели заключается в построении объемных, трехмерных изображений объектов, в возможности их рассмотреть “со всех сторон”. Для томографии не имеет значения, какую структуру или какое геофизическое поле отображается, и это обусловило появление нескольких видов геофизической томографии: сейсмическая томография в различных вариантах обработки сейсмических волн, гравитационная, электромагнитная и т.д. Успехи применения сейсмотомографии [Dziewonski, 1984; Dziewonski, Anderson, 1984; Seismic tomography ..., 1993], ярко продемонстрировавшей наличие глубинных неоднородностей, естественно стимулировали разработку подобного подхода и для других полей [Тараканов, 1997; Спичак, 1999], в которых также можно видеть объемные неоднородные объекты, или как сейчас многие полагают, нелинейные геологические структуры [Пушаровский, 1993; Николаев, 1997].

Метод термической томографии, который мы предложили [Хуторской и др., 2003], заключается в нахождении глубинных температур и плотности теплового потока на различных глубинах в коор-

Таблица 3. Состав битумов из отложений арх. Новая Земля, о. Вайгач и Пай-Хой (составлено по данным И.О. Безрукова, В.М. Винокурова, Н. Пигголт и др., 2006)

Возраст пород	Район	Автор коллекции, год сбора	Уд. вес, г/см ³	Зола при 105°С,		Влажность	Элементный состав					Тип битума
				%	%		С	Н	N	O	S	
S ₂ Id	Между мысами Иогансена и Мон	Б.В. Милорадович, 1933	н/д	4.73	1.08		93.6	3.09	—	3.30	0.91	Антраколит средний
S ₂	Бухта Ручьевая	Н.Н. Мутафи, 1934	н/д	н/д	н/д		93.87	0.96	0.85	3.84	0.48	Антраколит средний-высший
D ₁ алферовская	Левый приток р. Северная Тайная	В.М. Безруков, 1989	н/д	1.94	1.91		91.67	1.53	0.18		6.62	Антраколит высший
D ₁ алферовская	Губа Тайная	Б.А. Алферов, 1933	н/д	3.43	4.32		83.26	1.98	0.82		13.94	Антраколит средний (кискеит)
D ₁	м. Балашова, м. Пинегина	Б.А. Клубов, Е.А. Кораго, 1990	—	—	—		81.01	11.56	—	—	Не опр	Асфальты-асфальтиты, маальты
D ₁₋₂	руч. Посудный	А.С. Бурский, 1976	1.67	н/д	н/д		95.6	1.8	—	0.4	2.2	Антраколит высший
D ₁₋₂ тайнинская	оз. Северо-тайнинское	В.М. Безруков, 1989	н/д	51.02	0.48		87.2	3.05	7.88		1.87	Антраколит средний
D ₂	Губа Моржовая	Р.А. Шеколдин, Н.Н. Соболев, 1976–1977	н/д	7	н/д		80.9	1.9	—	11.6	5.60	Антраколит средний
D ₃	Губа Тайная	А.Г. Бурский, А.С. Красно-жен, 1976	1.64	10.8	н/д		86.7	2.1	—	10.3	0.9	Антраколит средний
D ₃ рейская	оз. Ящик	Ю.Д. Шульга, 1990	н/д	1.45	0.9		80.49	1.6	17.41		0.5	Антраколит средний
D ₃ рейская	р. Есипова	Г.Н. Ковалева, 1990	н/д	1.29	1.01		97.4	1.5	0.35		0.75	Антраколит средний-высший
C ₁	г. Пропащая	Б.А. Алферов, 1933	н/д	10.18	6.91		77.59	2.60		19.81		Антраколит средний

Таблица 3. Окончание

Возраст пород	Район	Автор коллекции, год сбора	Уд. вес, г/см ³	Зола при 105°С,		Влажность	Элементный состав					Тип битума
				%			%	C	H	N	O	
C ₁ t	м. Сокол	Б.А. Алферов, 1933	1.66	1.00	3.47	76.72	2.10	0.82	2.87	17.49	Антраколит средний (кискеит)	
C ₁ t	п-ов Ерохина	А.В. Дитмар, 1976	н/д	0.4	н/д	72.9	2.70	13.3	11.1	Антраколит средний		
C ₁ рогачевская	м. Сокол	Б.А. Клубов, 1989	н/д	28.3	1.6	82.7	1.76	5.98	9.56	Антраколит средний		
C ₁ лагернин- ская	р. Есипова	Г.Н. Ковалева, 1990	н/д	3.9	1.7	81.14	1.4	15.41	2.05	Антраколит средний		
C ₁ v миллинская	оз. Северо- тайнинское	В.М. Безруков, 1989	н/д	22.8	1.05	85.2	2.1	12.38	0.32	Антраколит средний		
C ₁ v миллинская	зал. Рогачева	Б.А. Клубов, 1989	н/д	49.4	0.25	69.5	2.9	25.37	2.23	Антраколит средний		
C ₁ v миллинская	п-ов Соко- лова	В.М. Безруков, 1989	н/д	81.4	2.6	70.6	2.6	15.81	10.99	Антраколит средний		
C ₁ v миллинская	м. Сокол	Б.А. Клубов, 1989	н/д	8.26	0.38	75.3	2.8	5.39	16.51	Антраколит средний (кискеит)		
C ₁ v -s	о. Берха	А.А. Петренко, 1936	н/д	0.59	2.52	91.12	1.43	0.80	2.78	3.87	Антраколит средний	
Оз-S	о. Вайгач, м. Раздель- ный	А.К. Крылова, 1940	—	—	—	98.00	0.40	0.4	1.20	—	Антраколит высший (шунгит)	
C(?)	о. Вайгач, м. Сухой Нос	Н.Х. Кулик, 1932	—	1.38	0.85	94.58	2.04	1.25	1.73	0.40	Антраколит средний	
C ₁	Пай-Хой, м. Чайка	А.К. Крылова, 1940	—	4.08	0.15	88.54	3.62	0.48	5.42	1.94	Антраколит низший	

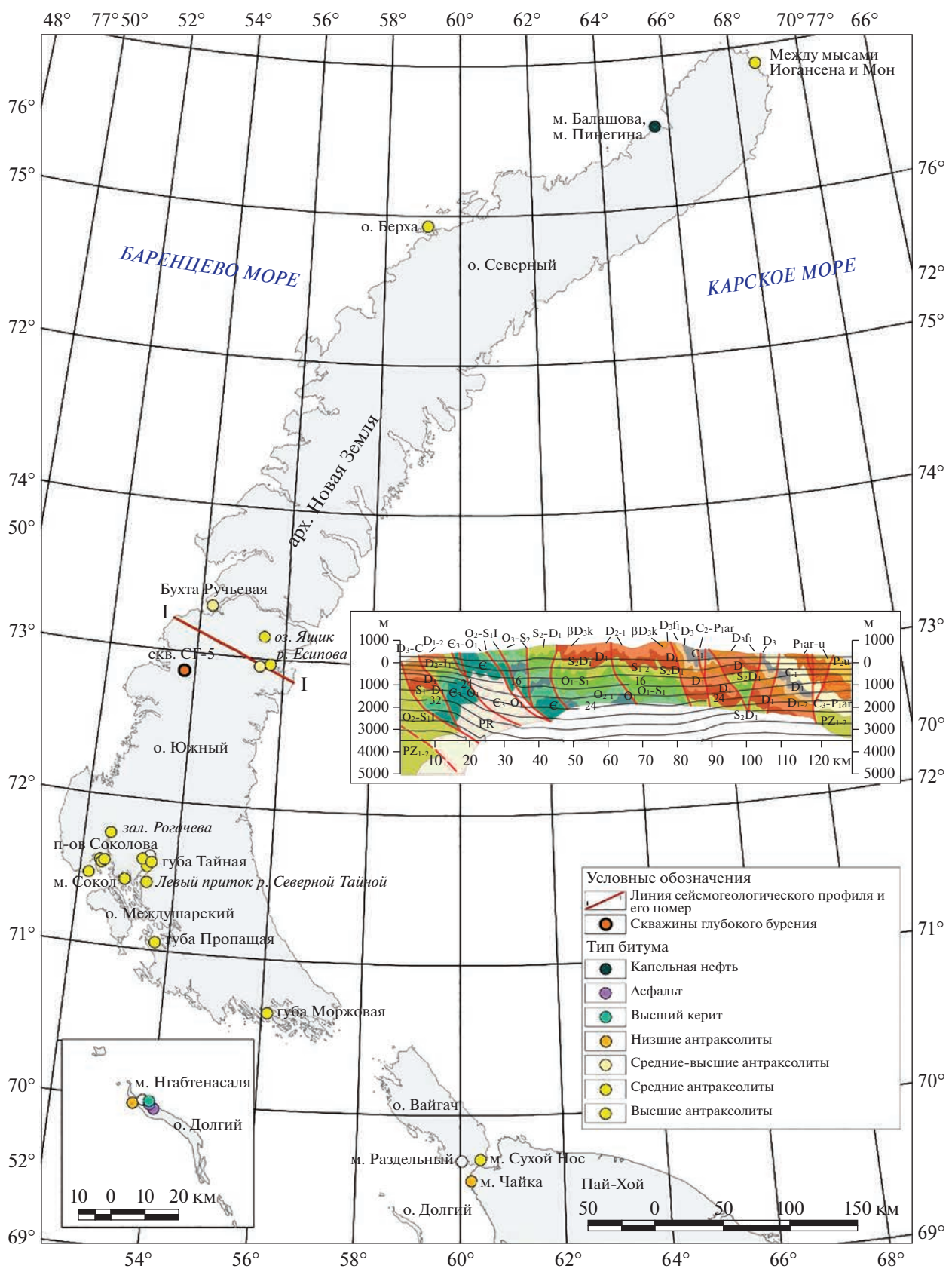


Рис. 2. Пункты находки природных битумов на Новой Земле, на о. Вайгач, на Пай-Хой и о. Долгий (на врезке представлен геологический профиль и температуры разреза вдоль линии I–I).

Таблица 4. Состав битумов из отложений о. Долгий (составлено по данным И.С. Гольдберга, Ю.Г. Самойловича)

Возраст пород	Район	Автор коллекции, год сбора	Порода	Внешний вид битума	Элементный состав			Групповой состав, %					Асфальтогеновые	Тип битума
					C	H	O + N + S	масла	смолы бензольные	смолы спирто-бензольные	асфальтены			
S ₂	о. Долгий	И.С. Гольдберг, 1981, Ю.Г. Самойлович, 1982	Трещины, залеченные кальцитом и флюоритом	Черный блестящий с графитовым блеском	89.4	2.9	87.0	—	—	—	—		Низший антраксолит	
C _{1v}	о. Долгий, м. Нгабтенасала		Известняк пористый	Черный блестящий с графитовым блеском	89.4	5.8	48.0	—	—	—	—		Высший керит (импсонит)	
C _{1v}			Известняк пористый	Черный жидкий	—	—	—	24.1	46.0	15.8	9.6	4.5	Асфальт	
C _{1v}			Битуминизированные доломиты	Черный	—	—	—	31.0	33.3	17.2	11.9	5.4	Асфальт	

динатах XYZ. Для реальных геологических объектов подразумевается построение температурного распределения в зависимости от широты, долготы и глубины. Таким образом, трехмерная термотомографическая модель отличается от температурного разреза тем, что позволяет “заглянуть” за линию профиля, что особенно важно при работе с изометричными или мозаичными структурами. С помощью соответствующего программного обеспечения легко можно создать или карты-срезы температур (тепловых потоков) на определенных глубинах, или показать конфигурацию изотермических поверхностей, или построить геотермический профиль по любому сечению.

Практическое значение термотомографической методики заключается в нахождении температурных границ, контролирующих тот или иной процесс генерации или трансформации вещества. Например, для прогнозирования нефтегазоносности с помощью термотомографии оценивается глубина нахождения температурного интервала катагенеза ОБ.

Программное обеспечение и методика термотомографического моделирования подробно нами была описана во многих публикациях [Хуторской, 1996; Хуторской и др., 2004, 2008, 2013].

Спецификой задания теплофизической структуры моделей в пределах архипелагов было сочетание на одном геотраверсе участков акваторий и островов, что сопровождалось чередованием температурных краевых условий на верхней границе моделей, характерных для температуры на дне акваторий или на границе “нейтрального слоя” на островах. Эти температуры нами задавались на основании эмпирических данных, полученных при непосредственных полевых измерениях. Так, было установлено, что придонная температура в трое Франц-Виктория и в проливе Британский канал на ЗФИ составляет +1°C, а на “нейтральном слое” в скважине СГ-5 на месторождении “Павловское” (Новая Земля) — -1°C [Хуторской и др., 2009; Никитин, Хуторской, 2018]. Глубина нижней границы моделируемой области зависела от изученности разреза коры методом МОВ-ОГТ и находилась на уровне от 6 до 8 км. Такой относительно небольшой интервал глубин позволяет не учитывать в нем влияние радиогенной теплогенерации, что обосновывает задание на нижней границе области моделирования не редуцированного, а фоновое тепловое потока. Его значение было адекватно полученному при измерениях в ближайших к геотраверсу пунктах. Это могли

Таблица 5. Плотность теплового потока в глубоких скважинах Баренцева моря

Скважина	Координаты		Интервал, м	G, мК/м	k, Вт/(м К)	ТП, мВт/м ²	
	с.ш.	в.д.				по интервалу	средний
Штокмановская 1	73.0	44.0	2000–2150	30.0	2.43	73	71
			2722–3070	24.4	2.84	69	
Арктическая 1	71.7	43.6	2500–2570	31.4	2.43	76	77
			2640–2670	31.4	2.42	77	
			2845–2925	31.3	2.45	77	
Адмиралтейская 1	75.65	53.15	1050–2610	38.4	2.4	92	92
Крестовая 1	74.5	50.46	1600–3000	29.1	2.4	70	70
Северо-Кильдинская 82	71.58	37.1	2973–3098	35.2	2.39	84	84
Лудловская 1	74.86	46.78	1305–1710	39.7	1.8	71	71
Мурманская 26	69.9	41.7	2030–2530	30.8	2.2	68	68
Куренцовская 1	70.45	47.2	210–380	36.4	1.6	58	58
Приразломная 1	69.316	54.751	2429–2802	24.7	2.45	60	60

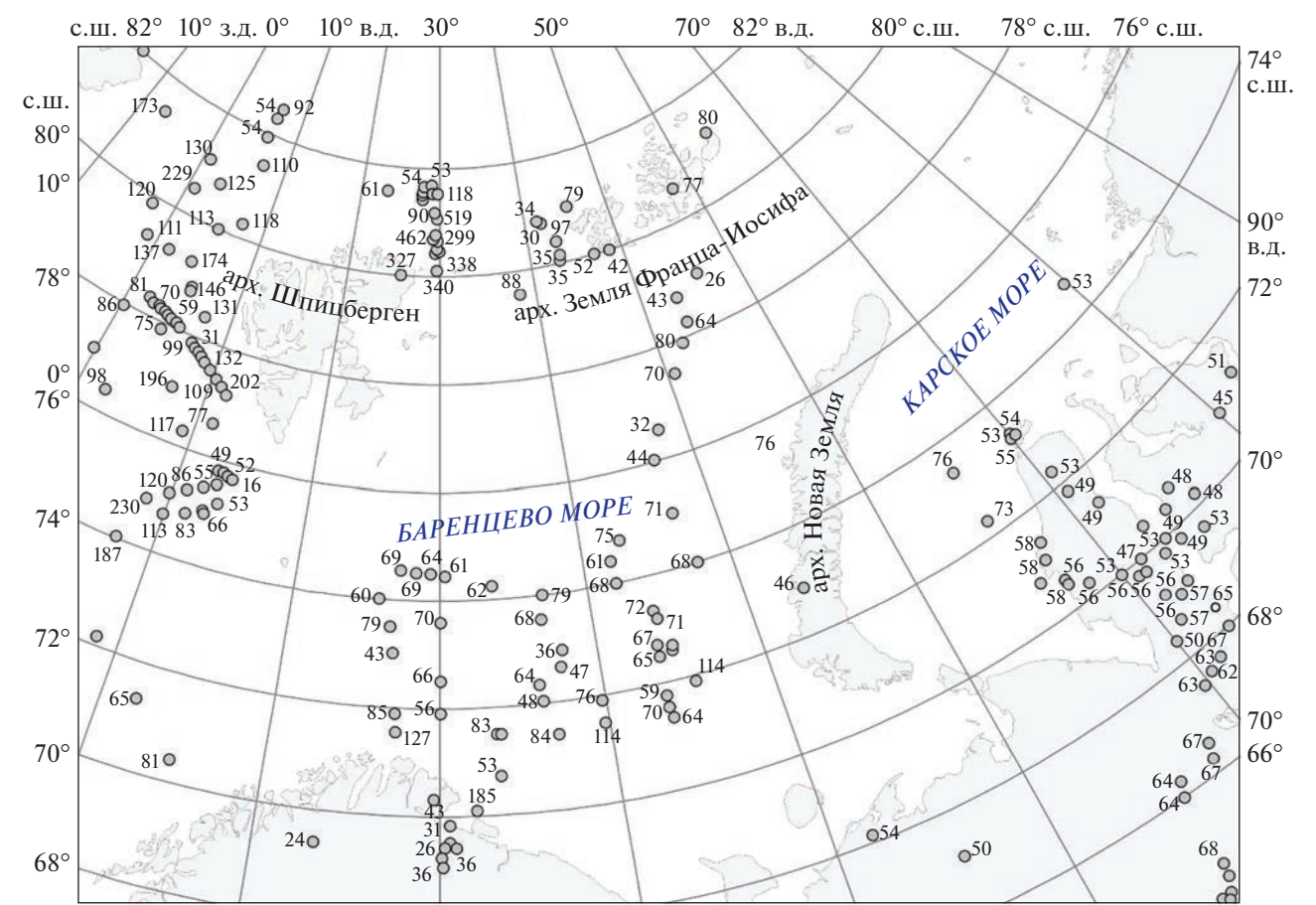


Рис. 3. Геотермическая изученность Западно-Арктического региона (плотность теплового потока, мВт/м²).

Таблица 6. Физические и теплофизические свойства грунтов

№№	Описание грунта	Плотность, кг/м ³	Влажность, %	Теплопроводность, Вт/(м К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ К)	
				Т	М	Т	М
1	Мохо-растительный слой	180	50	0.3	1	4000	2000
2	Песок мелкий	1460	28.5	1.6	3	2850	1970
3	Гравийный грунт	2020	6.3	1.7	2	2100	1980
4	Песок пылеватый	1630	20.4	1.6	3	2620	1930
5	Песок средней крупности	1700	16.2	1.6	2	2440	1860
6	Суглинок, мягкопластичный	1880	31.4	1.5	2	4130	2890
7	Песок гравелистый	1850	9.4	1.7	2	2120	1760
8	Песок мелкий	1680	18.1	1.8	3	2540	1900
9	Дресвяный грунт	2000	9	1.3	2	2150	1940
10	Суглинок, полутвердый	1560	24.2	1.3	2	2950	2160
11	Алеврит	2440	0.6	2	2	1660	1480

Примечание. Т – талое состояние, М – мерзлое состояние.

быть или измерения в скважинах (табл. 5), или измерения зондовым методом в морском дне. Карта геотермической изученности Баренц-региона приведена на рис. 3 [Хуторской и др., 2013].

Теплофизические свойства пород каждого профиля выбирались в соответствии с их геологическим строением и литологией. Теплопроводность пород, вскрытых бурением, определялась инструментально методом оптического сканирования (табл. 6). Более глубокие слои не доступ-

ны для инструментальных наблюдений. В таких случаях обычно применяются косвенные методы оценки теплопроводности на основе корреляционных зависимостей теплофизических и других геофизических параметров, чаще всего это сейсмические скорости [Hosney, 2000].

На рис. 4 показана зависимость коэффициента теплопроводности от граничной скорости на основе сопоставления стратиграфических подразделений арх. ЗФИ с выделяемыми сейсмоком-

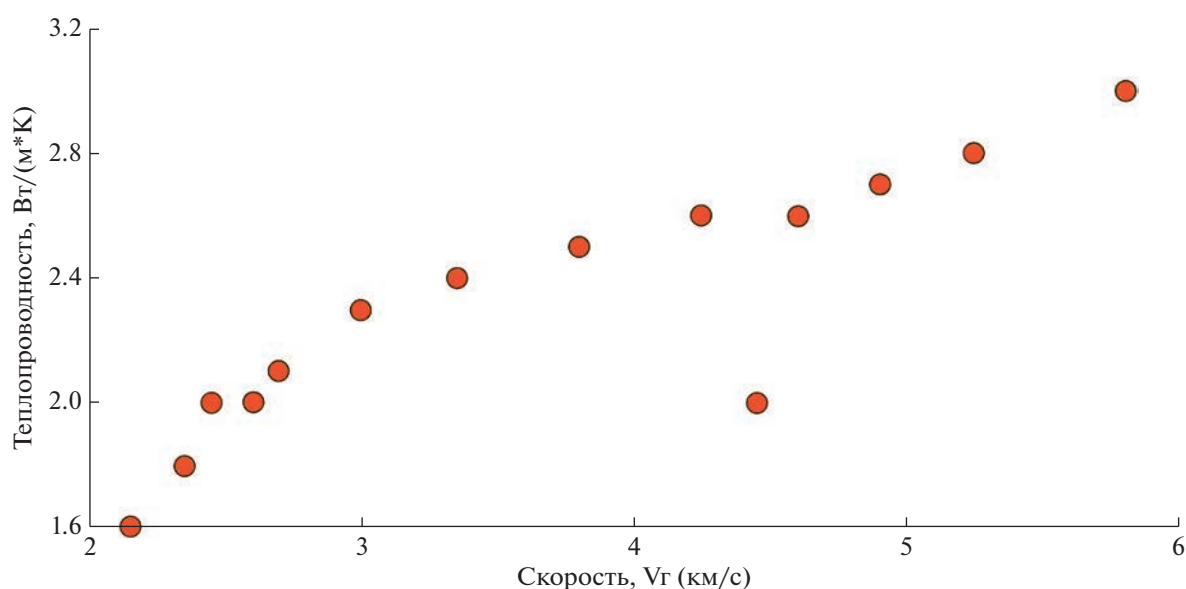


Рис. 4. Зависимость теплопроводности от граничной скорости сейсмических волн.

плексами на акватории и в трех скважинах. Обоснование возраста выделяемых подразделений на островах архипелага проводилось по данным определений фаунистических остатков и палинологических исследований. Основой для расчленения и выделения сейсмокомплексов по акватории послужили материалы сейсмических работ (профили МОГТ и сейсмоакустики, пункты зондирования МПВ, МОВ) [Дымов и др., 2011]. Данные о теплопроводности получены путем прямых измерений этого параметра по кернам скважин “Нагурская”, “Хейса” и “Северная” [Левашкевич, 2005].

Для получения результата о распределении температур в структурно и теплофизически неоднородном разрезе с помощью численного метода конечных элементов решалось нестационарное уравнения теплопроводности с временной производной:

$$\left(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + A(x, z) = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где k , c , ρ — соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность слоев литосферы, $A(x, z)$ — плотность источников тепла в слое, τ — время.

Для перехода к стационарной модели критерием наступления стационарного состояния теплового поля было условие инвариантности температур на последовательных временных шагах расчета. Время прихода теплового фронта в стационарное состояние (τ) можно оценить теоретически, исходя из критерия Фурье: $\tau = H^2/4a$, где H — глубина нижней границы области моделирования, a — коэффициент температуропроводности ($a = k(c\rho)^{-1}$). Принимая глубину нижней границы 8 км, а температуропроводность $5 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, получим время наступления стационарного режима ≈ 1.2 млн лет. Таким образом, задавая время расчета температурного поля 3 млн лет, мы уверенно в решении получаем стационарное распределение температур в разрезе.

Профили, пересекающие острова арх. ЗФИ и прилегающую акваторию, построены по данным МОВ-ОГТ и опираются на результаты бурения трех глубоких скважин (Нагурская, Северная, Хейса) (см. рис. 1), по данным которых наблюдаются резкие изменения мощностей отложений и отсутствие на большей части архипелага отложений моложе триасовых. Разрез триасовых отложений насыщен интрузивными образованиями, которые отчетливо фиксируются как в разрезах скважин, так и на профилях МОВ-ОГТ. Ниже триаса, в разрезе Нагурской скважины, установ-

лены раннепалеозойские и позднепротерозойские отложения, но в прогибах, там, где общие мощности увеличиваются до 6 км, предполагается развитие полных разрезов перми, карбона, девона и силура. В акваториальной части разрезов по данным МОВ-ОГТ предполагается также существование юрских и меловых отложений.

В скважинах усилиями ПО “Арктикморнефтегазгеофизика” был проведен термический каротаж, результаты которого явились основой для расчета значений геотермических градиентов и плотности теплового потока [Левашкевич и др., 1992]. После учета поправок, обусловленных инерционностью датчиков температуры при проведении непрерывного термического каротажа, были получены фоновые значения геотермических параметров по скважинам ЗФИ (рис. 5).

Эти параметры использовались при задании граничных условий на нижней границе области моделирования и при оцифровке теплофизических свойств двумерных моделей.

Результаты расчета современных температур и плотности теплового потока вдоль субширотного профиля V—V и меридионального профиля VI—VI показаны на рис. 6. Разрезы построены по данным геологических съемок и опираются на результаты бурения скважин Нагурская, Северная и Хейса.

Вариации теплового потока вдоль профилей связаны с его рефракцией в условиях структурно-теплофизических неоднородностей, обусловленных различной мощностью и теплопроводностью геологических комплексов.

Мы отмечаем существование интервала температур катагенеза ОВ в градации МК_{1–3} на островах Хейса, Земля Вильчека и Грэм-Белл в отложениях триаса. Но на о. Земля Александры этот же интервал температур находится в отложениях фундамента позднепротерозойского—раннепалеозойского возраста, что является маловероятным признаком формирования на этом острове углеводородов, в том числе природных битумов (ПБ), имеющих гидротермальное происхождение. Таким образом, отсутствие находок ПБ на Земле Александры можно объяснить относительно низкими температурами в мезозойском осадочном чехле острова (менее 80°C), не способствующими процессу катагенеза.

Площадное распространение катагенетического интервала температур под архипелагом ЗФИ можно увидеть на трехмерной температурной модели. Как мы отмечали выше, осадочные бассейны Западно-Арктического сектора имеют изометрическое мозаичное строение, для которых

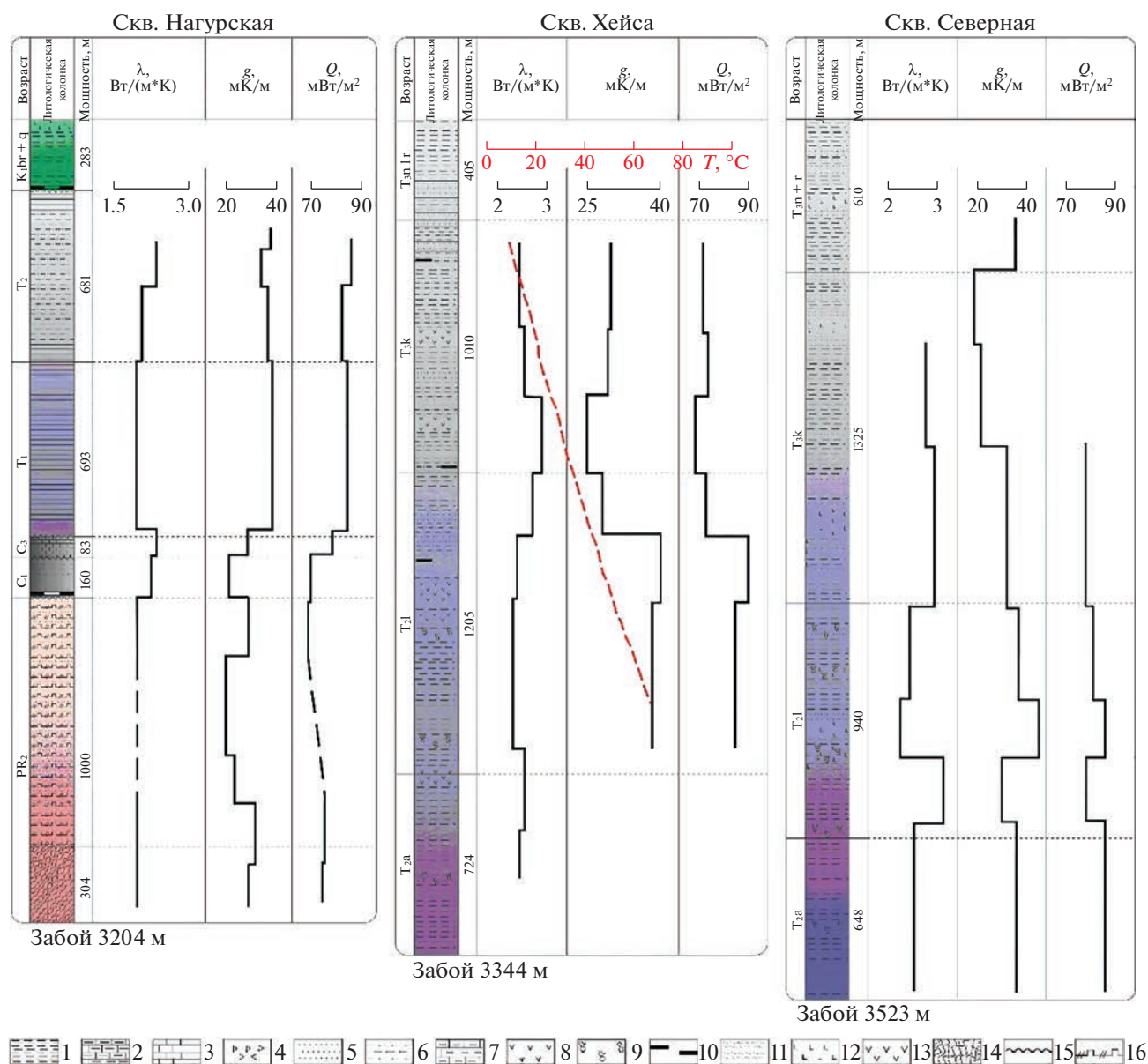


Рис. 5. Геологические разрезы и результаты геотермических измерений по скважинам архипелага Земля Франца-Иосифа.

1 – аргиллиты, глины, 2 – мергели, 3 – известняки, 4 – брекчии, 5 – песчаники, 6 – алевролиты, 7 – калькаренины, 8 – туфопесчаники, туфоалевролиты, 9 – газопроявление, 10 – углистость в породах, 11 – супеси, суглинки, 12 – изверженные породы основного состава, 13 – долериты, габбро-долериты, 14 – гнейсы и кристаллические сланцы, 15 – границы стратиграфического несогласия, 16 – кремнистые породы.

3D-модели дают наиболее корректную картину распределения температур в толще земной коры. При изометричности оценки глубин нахождения катагенетических температур по двухмерной и по трехмерной модели различаются на 10–15%. Этот факт не требует специальных доказательств, т.к. хорошо известен из классических работ по теории теплопроводности (см. например, [Карслоу, Егер, 1964]).

Для того, чтобы перейти к трехмерной модели, все профильные створы помещаются на единый трехмерный плот в координатах “широта–долгота–глубина”. Точность расчетов оценивалась по двум критериям: во-первых, по совпадению модельного и измеренного в скважинах теплового потока; во-вторых, по совпадению температур на пересечении профилей. Метод наименьших квадратов, примененный для оценки погрешно-

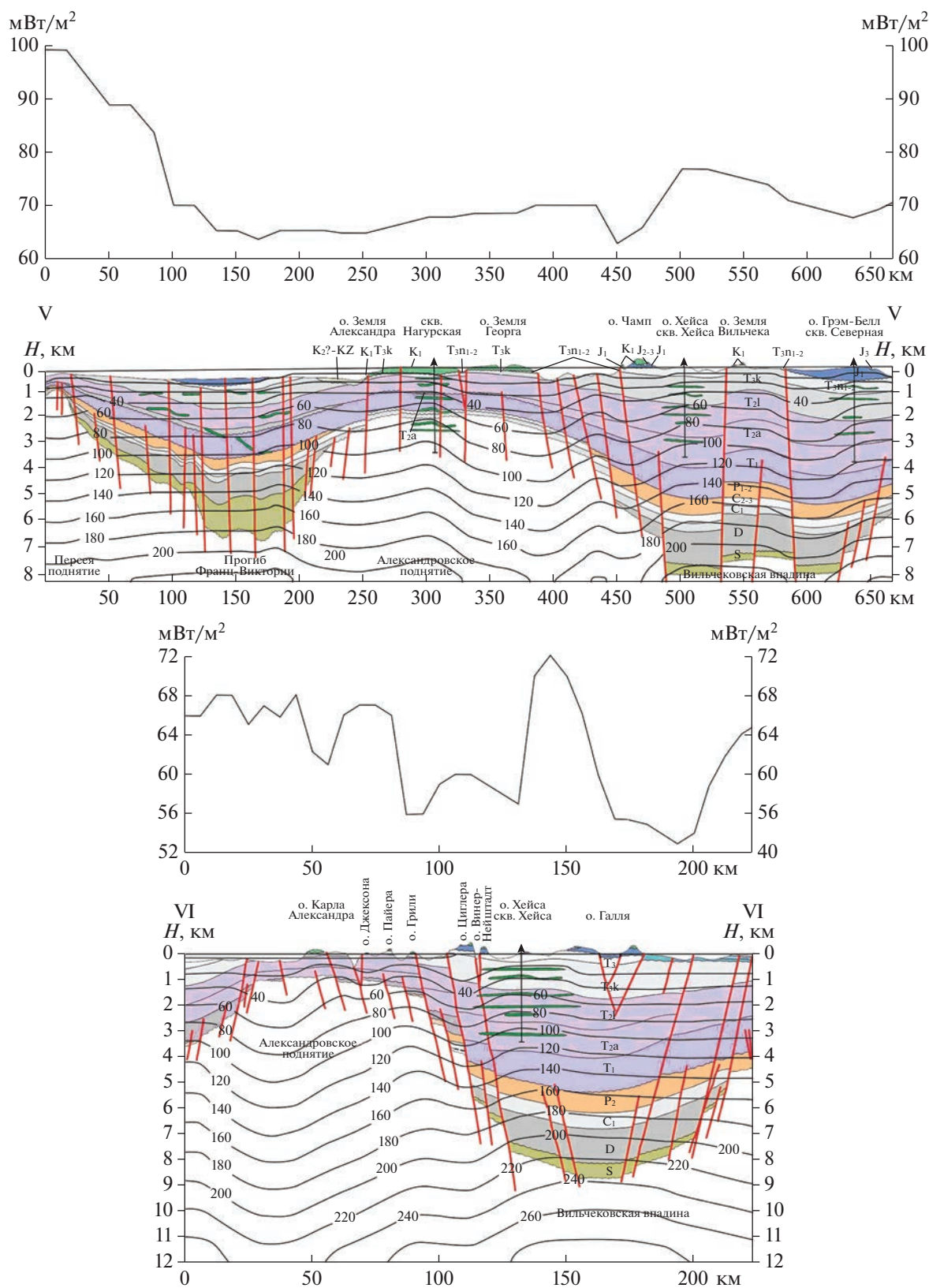


Рис. 6. Распределение температур ($^{\circ}\text{C}$) и плотности теплового потока (мВт/м^2) вдоль профилей V и VI на архипелаге ЗФИ (расположение профилей см. рис. 1).

сти глубины нахождения изотерм в створе пересечения профилей на примере геотемпературной модели для Баренцева моря, показал, что она составляет ± 50 м, что при средней глубине расчета температур 10 км составляет относительную погрешность 0.5% [Хуторской и др., 2013].

Особенностью трехмерного моделирования является установление температур, а следовательно, и всех остальных геотермических параметров в геометрии “широта—долгота—глубина” для всего региона. Построение трехмерной региональной геотермической модели производилось с помощью пакета трехмерной графики “TECPLOT v.10.0” (Amtec Engineering Inc.), который позволяет провести объемную интерполяцию наблюдаемого поля (в нашем случае температуры, теплового потока, а также структурных сейсмотомографических границ) в координатах: широта—долгота—глубина. Программа “TECPLOT” предусматривает трехмерную интерполяцию по сетке любой конфигурации. В большинстве случаев используется неравномерная сетка, “привязанная” к простираанию сейсмических профилей, вдоль которых выполнялись двумерные расчеты глубинных температур. Таким образом, рассчитанная вдоль профиля 2D температурная модель в координатах X —“простираание” и Z —“глубина” дополняется третьей недостающей производной $\left(k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)$ и “превращается” в трехмерное уравнение теплопроводности.

Результаты расчета температурного поля с помощью интерполяционного приближения будут отличаться от результатов, получаемых с помощью решения прямой задачи для трехмерной среды, только на величину искажений, обусловленных пертурбацией теплового потока вдоль оси Y . Поэтому, чем меньшее расстояние существует между соседними геотраверсами, тем точнее будет интерполяционное приближение к 3D-модели. Однако, наш многолетний опыт двухмерного термического моделирования показывает, что величина искажений теплового потока вдоль оси Y ничтожно мала. Например, для типичного осадочного бассейна горизонтальная компонента теплового потока вдоль оси Y составляет не более 0.04 мВт/м², т.е. на три порядка ниже фоновой величины глубинного теплового потока. Следовательно, получение трехмерного распределения температур с помощью объемной интерполяции практически адекватно решению прямой задачи для объемного теплового поля.

Нами была использована возможность увеличения числа профилей при построении трехмер-

ной термотомографической модели за счет включения еще трех геолого-геофизических разрезов на ЗФИ. Это профили а—б, в—г и д—е (см. рис. 1). Профили построены по данным сейсмических работ (профили МОВ-ОГТ и пункты зондирования МПВ) [Школа и др., 2000].

На рис. 7 показаны результаты расчетов температур для каждого профиля, полученные при тех же граничных условиях, которые описаны выше для профилей V—V и VI—VI. На этих профилях можно видеть, что катагенетический температурный интервал в осадочном чехле выявлен на островах Хейса и Грем-Белл. На о. Земля Александры этот интервал температур обнаруживается в фундаменте. Это, как обсуждалось выше, не способствует появлению битумов в относительно маломощном мезозойском осадочном чехле острова.

Для перехода к трехмерному плотингу все рассчитанные 2D-профили были размещены в координатах “широта—долгота—глубина” (рис. 8) в соответствии с их простираанием. Процедура построения 3D-плотинга заключается в объемной интерполяции температур в пределах крайних координат по широте, долготе и глубине.

После интерполяции получаем непрерывную картину распределения температур (рис. 9), которая наиболее адекватно отражает геотермическое поле в центре архипелага, т.е. там, где плотность пространственного расположения профилей наибольшая. В периферийных участках погрешность интерполяции увеличивается из-за разрежения исходных 2D-профилей.

По расчетным данным отмечается уменьшение температуры в земной коре под ЗФИ в западном направлении. Так, температура на глубине 8 км под островами Грем-Белл и Земля Вильчека составляет 360°C , а под островами Земля Александры, Гукера и Земля Георга — 300°C . По-видимому, с этими особенностями температурного поля под архипелагом связано большее количество проявлений ПБ именно на островах восточной части ЗФИ. Этот факт также демонстрируется на рис. 10 и 11.

На архипелаге Новая Земля в настоящее время проводится освоение свинцово-цинкового месторождения “Павловское” на Южном острове в бассейне реки Безымянная. В комплекс работ входят геоморфологические, гидрогеологические, инженерно-геологические и геофизические исследования, а также поисково-разведочное бурение, в том числе, глубоких скважин. Можно надеяться, что в процессе изысканий в этом районе будут обнаружены новые проявления природных

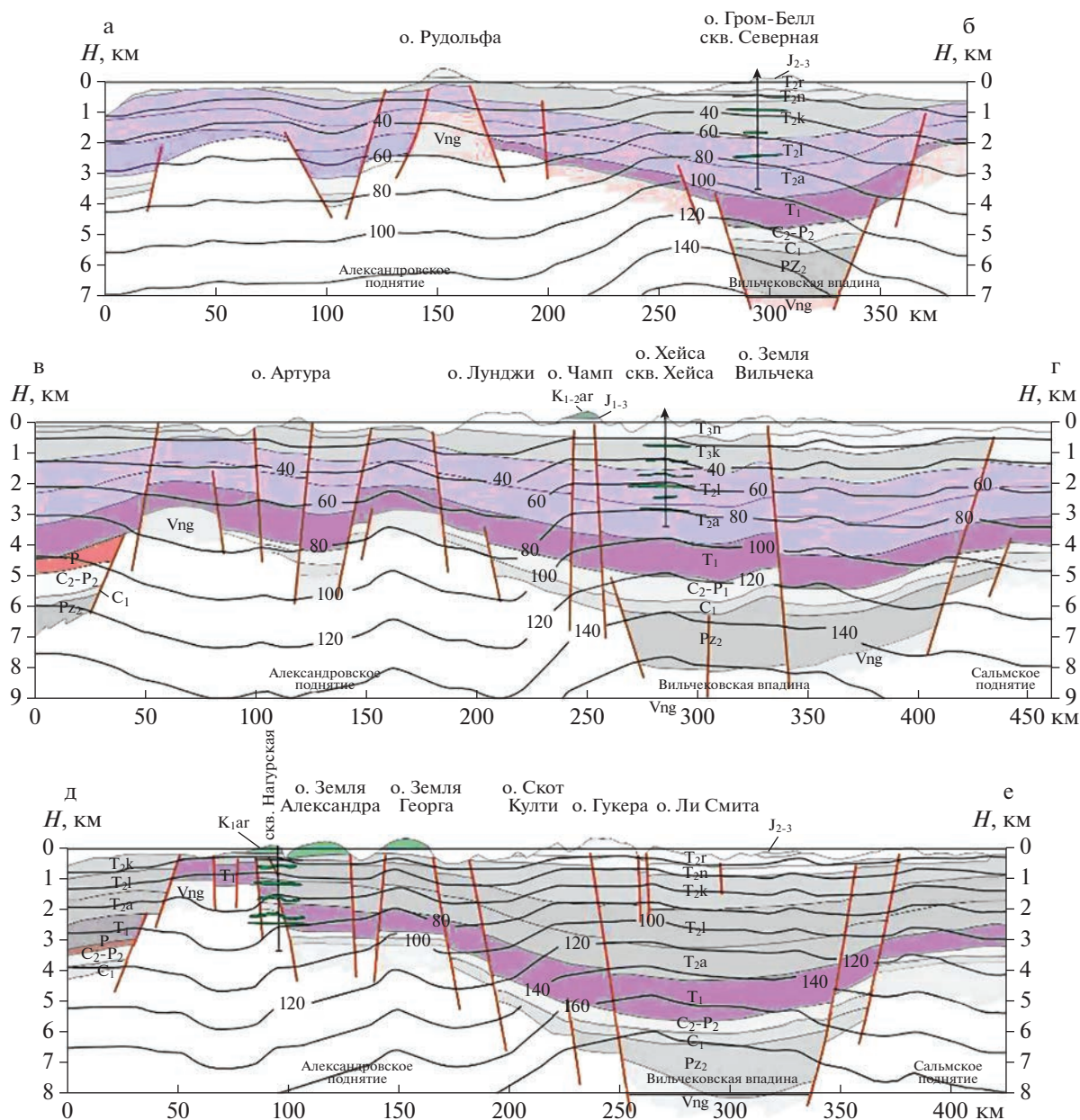


Рис. 7. Распределение температур в разрезах профилей а–б, в–г и д–е (расположение профилей см. рис. 1).

битумов, так как редкие находки антраксолитов в этом районе уже имеются (см. рис. 2).

Профиль I–I построен по данным геологической съемки и бурения на участке месторождения, а также геофизических работ (профилирование МОВ, грави- и магниторазведка).

В региональном плане Безымянская площадь, включающая в себя Павловское месторождение, входит в состав Пайхойско-Новоземельской складчатой системы, формирование которой относит-

ся к ранним фазам киммерийского тектогенеза (конец триаса–начало юры). На территории представлен практически полный разрез палеозоя – от кембрийской по пермскую системы включительно. Эти породы сложены разнообразными по составу и фациальным особенностям осадочными морскими отложениями, а также классом вулканогенных и вулканогенно-осадочных формаций, играющим подчиненную роль в общем разрезе палеозойских толщ. Видимых угловых несогласий в размещении палеозойских формаций не

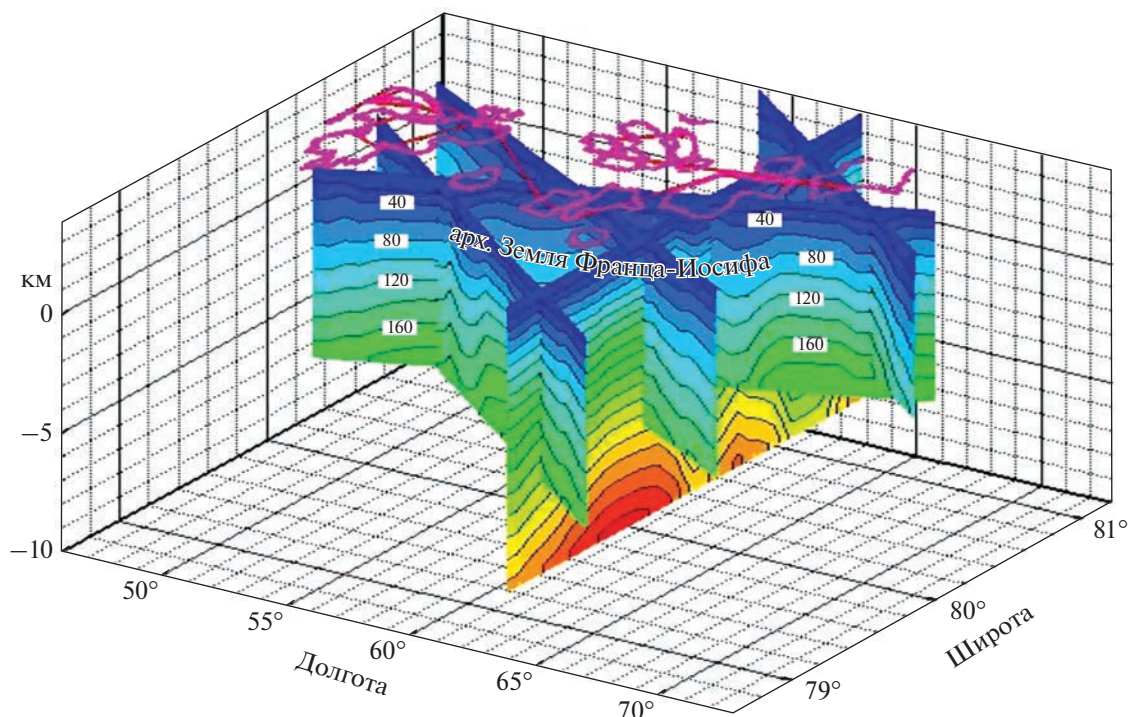


Рис. 8. Расположение двухмерных температурных разрезов в 3D-плоте в районе ЗФИ.

установлено. Стратиграфические перерывы наблюдаются на границах кембрия и ордовика, среднего и верхнего девона. В первом случае из разреза выпадают отложения среднего и верхнего ордовика, во втором — зафиксировано залегание пород верхнего девона на различных горизонтах средне- и нижнедевонских отложений. Интрузивные породы (преимущественно основного состава) представлены двумя разновозрастными комплексами: верхнедевонским и мезозойским.

В районе исследуемого профиля прослеживается зона сочленения разрывных структур Пайхойско-Новоземельской провинции: Главного Новоземельского и Байдарацкого разломов. Эти линейменты являются разломами глубокого заложения, разграничивающими различные блоки докембрийского фундамента Новой Земли. Влияние указанных разрывных структур отражается в распределении вулканоплутонических ассоциаций и структурно-формационных комплексов палеозоя, отвечающих палеотектоническим обстановкам: пассивной континентальной окраины с фациями внутреннего и внешнего шельфа.

Магматические образования в районе имеют ограниченное распространение. Они представлены интрузиями двух возрастных комплексов —

позднедевонского и мезозойского. К позднедевонскому комплексу относятся силлы и дайки долеритов и габбро-долеритов. В районе наиболее распространены субпластовые интрузии этого комплекса. Силлы габбро-долеритов имеют мощность от 1–2 до 50–70 м, а протяженность их достигает 500–700 м. Мезозойский интрузивный комплекс представлен дайками субшелочных пикрито-долеритов; фиксируются как пологозалегающие, так и крутопадающие дайки. Мощность их варьирует от 2–3 до 10–30 м, протяженность — первые десятки метров, редко — сотни метров.

В скважине СГ-5 на месторождении “Павловское” был измерен тепловой поток [Никитин, Хуторской, 2018]. Это было первое измерение на Новой Земле. Скважина СГ-5 была пробурена до глубины 490 м. В нее была размещена термокаса, имевшая вдоль кабеля 20 датчиков температуры. Скважина прошла всю криолитозону и на глубине 240 м был зафиксирован переход от отрицательных к положительным температурам. На забое скважины была зафиксирована температура 3,9°C. При расчете теплового потока учитывалось значение геотермического градиента при равновесном режиме температур в стволе скважины и в окружающем массиве горных пород. Для опреде-

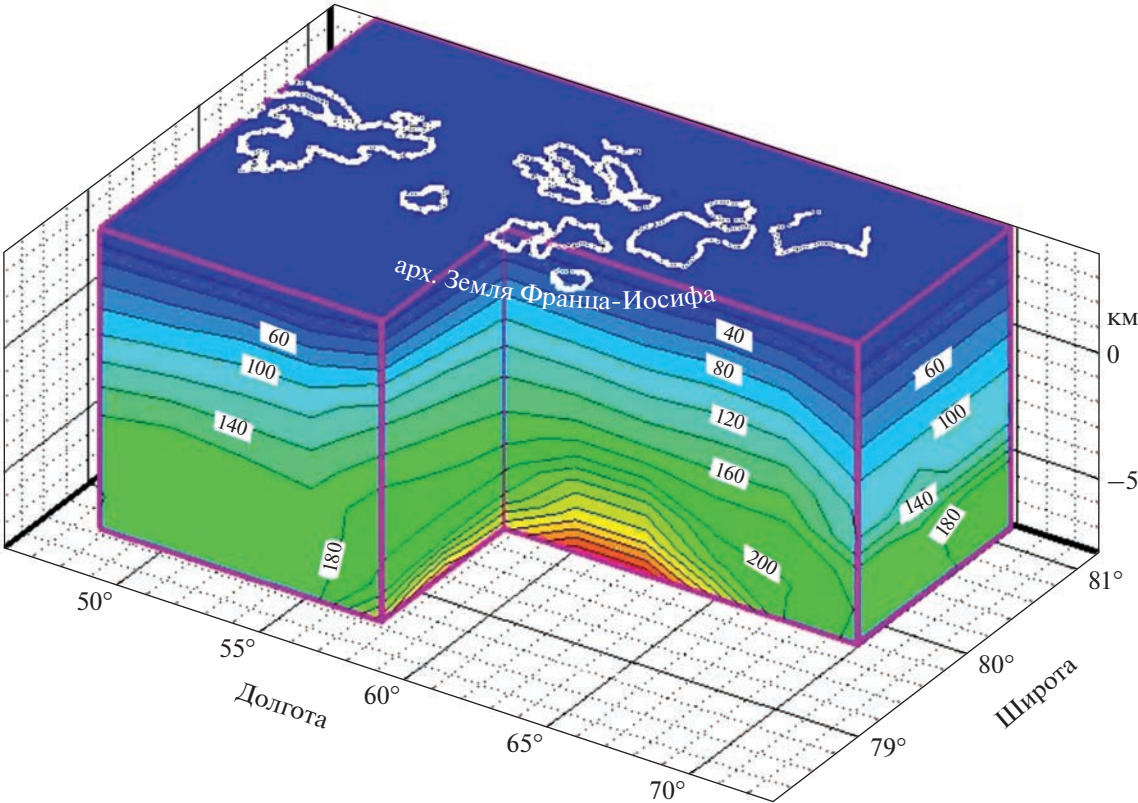


Рис. 9. 3D-модель температурного поля в районе ЗФИ.

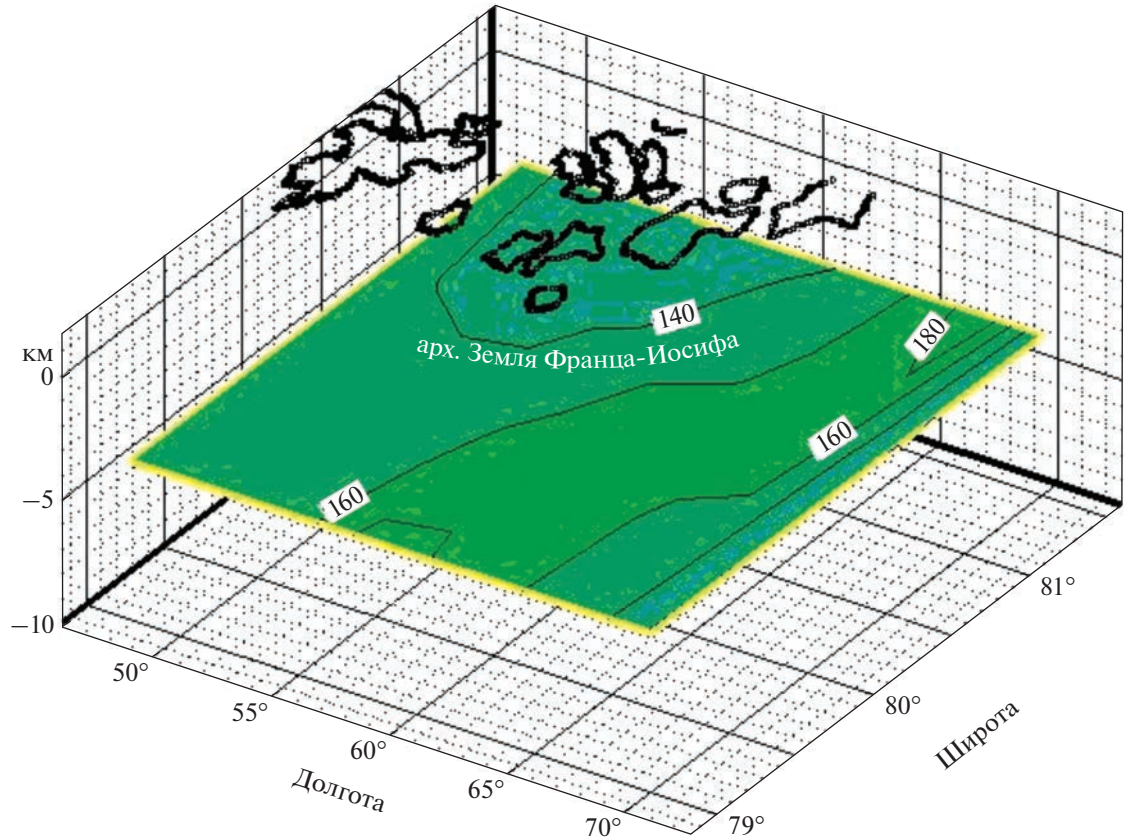


Рис. 10. Распределение температур (°C) на глубине 4 км.

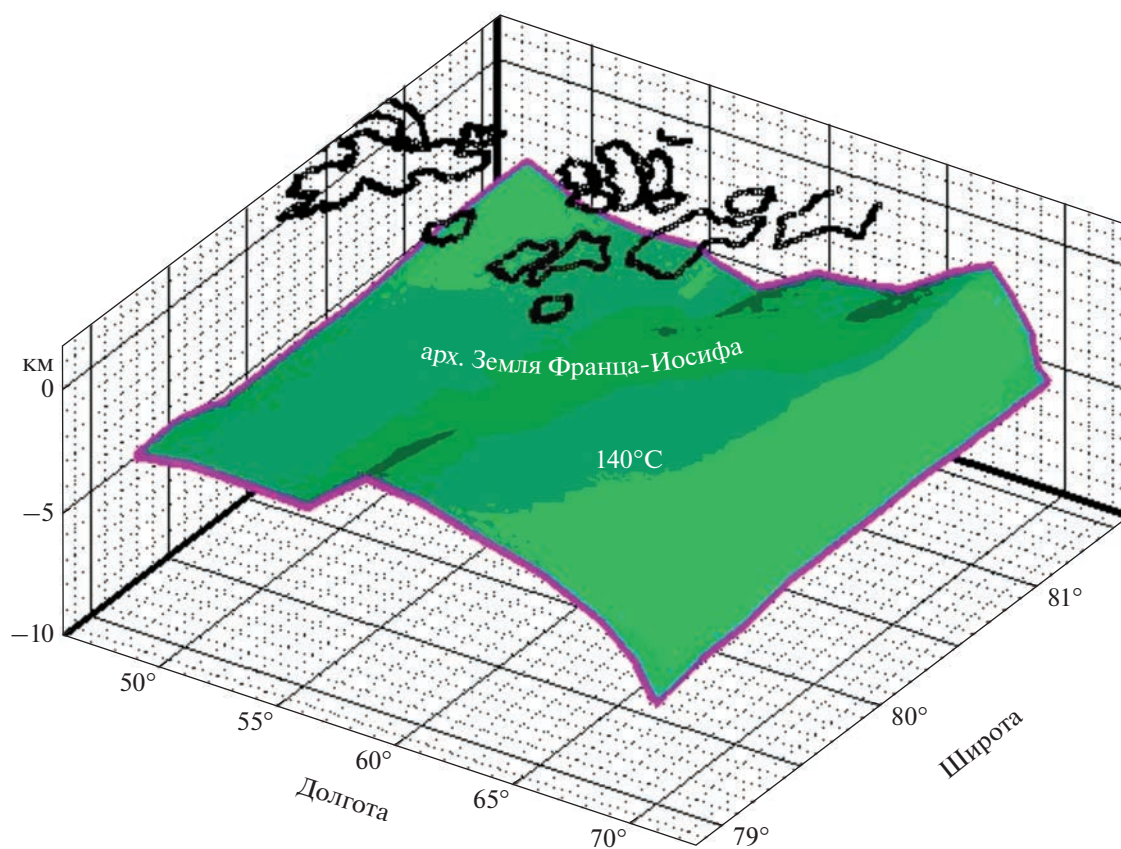


Рис. 11. Положение изотермической поверхности 140°C.

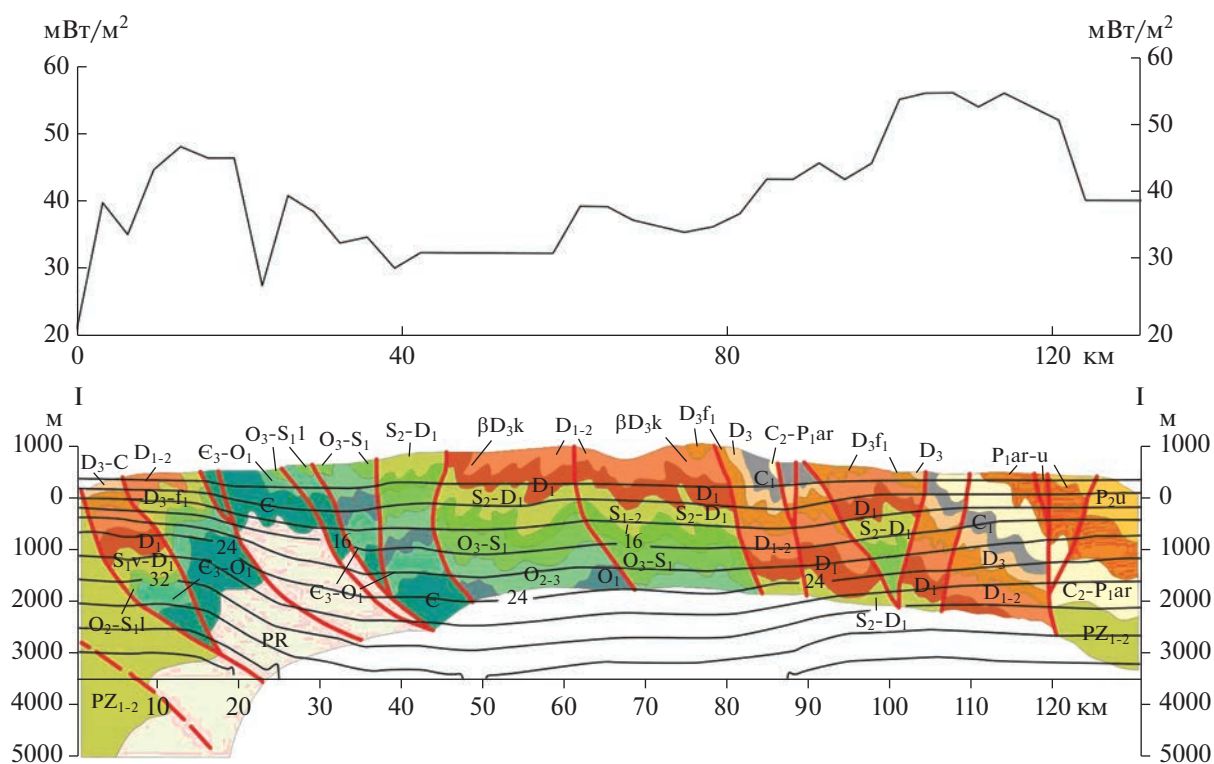


Рис. 12. Распределение температуры (внизу) и теплового потока вдоль профиля I—I на архипелаге Новая Земля.

ления теплопроводности и величины радиогенной компоненты теплового потока проанализирована представительная коллекция из образцов керна этой скважины. Таким образом, мы констатируем, что полученное значение теплового потока — 46 мВт/м² можно считать фоновым для западной части архипелага.

При численном моделировании геотемпературного поля вдоль профиля I—I (рис. 12) это значение теплового потока задавалось как нижнее граничное условие второго рода на глубине 4 км. На верхней границе области моделирования, совпадающей с рельефом вдоль профиля, задавалась температура —1°С, зафиксированная в устье скважины СГ-5.

В результате численного моделирования установлено, что температура на глубине 4 км составляет всего 60–65°С. Это существенно более низкая температура, чем на архипелаге ЗФИ, где на той же глубине отмечалась температура 100–120°С. Этот факт объясняется более низким тепловым потоком на Новой Земле (46 мВт/м²) по сравнению с ЗФИ (79–80 мВт/м²).

Природа понижения теплового потока на Новой Земле связана с геодинамической обстановкой геологического прошлого. Здесь произошло “экранирование” глубинного теплового потока аллохтонной литосферной пластиной, надвинутой со стороны палеоокеана при его закрытии в позднем палеозое. Заметим, что аномально низкий тепловой поток в Уральском складчатом поясе объясняется именно этим, что подтвердило проведенное эволюционное геотермическое моделирование [Хуторской, 1996].

Редкие находки антраксолитов приурочены к локальным зонам в узких бухтах на о-вах Южный, Долгий и Вайгач, которые, собственно, и образовались из-за разломной тектоники. Находки природных битумов, вероятнее всего, объясняются гидротермальной деятельностью, которая генетически связана с разрывом сплошности массивов пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные находки жидких, вязко-жидких и твердых ПБ на арктических архипелагах свидетельствуют об активном гидротермальном процессе, происходившем здесь в геологическом прошлом и, вероятно, продолжающимся в недавней геологической истории. По локализации находок ПБ можно проследить действие гидротерм, пронизывающих скопления углеводородов. Процесс гидротермальной разгрузки сопровождал, а

порой и способствовал формированию структурно-геологических обстановок на островах архипелага.

Вместе с веществом гидротермы адвективно выносят большое количество энергии, повышая температуру окружающих пород и изменяя их геотермические характеристики по сравнению с фоновыми значениями. Тепловое поле при гидротермальной разгрузке приобретает большую энтальпию и нестационарный характер. Температура в недрах и плотность теплового потока изменяются в зависимости от тепло- и теплопроводности среды, так что фиксируемые величины геотермических параметров — это результат суперпозиции всех тепловых воздействий: как генерации тепла, так и его расхода на прогрев окружающей среды и на излучение в тропосферу. Это обуславливает важность проведения геотермических исследований в районах распространения продолжительного гидротермального процесса, в том числе там, где этот процесс маркируется существенными признаками. Появление природных битумов, приуроченных к разломам и проницаемым зонам, один из таких признаков.

Проведенный расчет глубинных температур и теплового потока в геометрии 2D и 3D на арктических архипелагах продемонстрировал существование катагенетического интервала температур в осадочном чехле именно там, где фиксируются находки ПБ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00054А и госбюджетной темы Лаборатории тепломассопереноса ГИН РАН № 122012700311-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакиров А.А., Бакиров Э.А. Теоретические основы и методы поисков и разведки скоплений нефти и газа / В 2 томах. Кн. 1. Теоретические основы прогнозирования нефтегазоспособности недр. М.: Недра, 2012. 467 с.
- Безруков В.М. Природные битумы о-ва Грем-Белл Земли Франца-Иосифа и их значение для оценки перспектив нефтегазоносности арктической окраины Баренцево-Северо-Карского шельфа // Геология нефти и газа. 1997. № 02. С. 20–25.
- Безруков В.М., Винокуров И.Ю., Пигготт Н., Фугелли Э., Стоувер Ш. Результаты битуминологических исследований на островах Севера Баренцевоморского шельфа // Природные битумы и тяжелые нефти. СПб.: Недра, 2006. 588 с.

- Богомолов А.И., Гайле А.А., Громова В.В. и др. Химия нефти и газа / Учебное пособие для вузов / 3-е издание, доп. и испр. СПб.: Химия, 1995. 356 с.
- Винокуров И.Ю. Литолого-петрографические характеристики мезозойских отложений архипелага Земля Франца-Иосифа в связи с оценкой перспектив их нефтегазоносности / Автореф. дисс. ... канд-та геол.-мин. наук. СПб.: ВНИГРИ, 1998. 24 с.
- Гольдберг И.С. Природные битумы СССР: (закономерности формирования и размещения). Л.: Недра, 1981. 195 с.
- Дорохин В.П., Палий А.О. Состояние и перспективы добычи тяжелых и битуминозных нефтей в мире // Нефтепромысловое дело. 2004. № 5. С. 6–9.
- Дымов В.А., Качурина Н.В., Макарьев А.А., Макарьева Е.М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист U-41–44 – Земля Франца-Иосифа (восточные острова). Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 220 с. + 6 вкл.
- Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
- Клубов Б.А. Природные битумы Севера. М.: Наука, 1983. 205 с.
- Клубов Б.А. Принципиальная модель образования природных битумов в свете новых данных // Горючие сланцы. 1988. № 5/4. С. 365–374.
- Клубов Б.А., Кораго Е.А. О природе жидких битумов севера Новой Земли // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. № 4. С. 1143–1147.
- Клубов Б.А., Безруков В.М. Антракосолиты Новой Земли // Сов. геология. 1992. № 4. С. 22–30.
- Клубов Б.А., Острой А.С. О первых находках природных битумов на Земле Франца-Иосифа // Докл. РАН. 1995. Т. 342. № 6. С. 785–788.
- Клубов Б.А., Винокуров И.Ю., Гарибьян Е.В. Битумопроявления на о-ве Хейса // Геология нефти и газа. 1997. № 02. С. 10–13.
- Левашкевич В.Г., Цыбуля Л.А., Десятков В.М. Тепловой поток на островах Баренцевоморского региона // Сов. геология. 1992. № 8. С. 67–70.
- Левашкевич В.Г. Закономерности распределения геотермического поля окраин Восточно-Европейской платформы (Баренцевоморский и Белорусско-Прибалтийский регионы) / Автореф. дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2005. 42 с.
- Летников Ф.А., Жатнуев Н.С., Лашкевич В.В. Флюидные термоградиентные системы. Новосибирск: Наука, 1985. 190 с.
- Муслимов Р.Х., Романов Г.В., Каюкова Г.П., Юсупова Т.Н., Петров С.М. Перспективы тяжелых нефтей // ЭКО. 2012. № 1. С. 35–40.
- Никитин Д.С., Хуторской М.Д. Первые измерения теплового потока на архипелаге Новая Земля // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478. № 6. С. 692–696.
- Николаев А.В. Проблемы геотомографии // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 4–38.
- Поконова Ю.В. Нефтяные битумы. СПб.: Синтез, 2005. 54 с.
- Пуцаровский Ю.М. Нелинейная геодинамика: Кредо автора // Геотектоника. 1993. № 1. С. 3–6.
- Пчелина Т.М., Богач С.И., Гаврилов Б.П. Новые данные по литостратиграфии девонских отложений района Мимердален // Геология осадочного чехла арх. Шпицберген. Л.: ПГО “Севморгеология”, 1986. С. 5–19.
- Самойлович Ю.Г. Погребенная речная сеть на акватории Баренцево-Карского шельфа // Стратиграфия и палеогеография позднего кайнозоя Арктики. Л.: ПГО “Севморгеология”, 1982. С. 5–9.
- Спичак В.В. Магнитотеллурические поля в трехмерных моделях геоэлектрики. М.: Научный мир, 1999. 204 с.
- Тараканов Ю.А. Гравитационная томография // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 236–265.
- Хуторской М.Д., Подгорных Л.В., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. Термотомография Западно-Арктического бассейна // Геотектоника. 2003. № 3. С. 79–96.
- Хуторской М.Д., Вискунова К.Г., Подгорных Л.В., Супруненко О.И., Ахмедзянов В.Р. Геотемпературная модель земной коры Баренцева моря: исследования вдоль геотраверсов // Геотектоника. 2008. № 2. С. 36–54.
- Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В. и др. Геотермия арктических морей. М.: ГЕОС, 2013. 232 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 605)
- Черевко Н.К. Твердые битумы европейского северо-востока России. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 100 с.
- Школа И.В., Фефилова Л.А., Макарьев А.А. Верхний триас Земли Франца-Иосифа (стратиграфическое расчленение для целей геологического картирования) // Стратиграфия и фауна палеозоя и мезозоя Арктики. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. С. 62–73.
- Dziewonski A.M. Mapping the lower mantle: Determination of lateral heterogeneity in P-velocity up to degree and order 6 // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 5929–5952.
- Dziewonski A.M., Anderson D.L. Seismic tomography of the Earth's interior // Amer. Sci. 1984. V. 72. № 5. P. 483–494.
- Hosney H.M. Geophysical parameters and crustal temperatures characterizing tectonic and heat flow provinces of Egypt // ICEHM. Cairo: Cairo University, 2000. P. 152–166.
- Seismic tomography: Theory and practice / Eds H.M. Iyer, K. Hirahara. Cambridge: University Press, 1993. P. 519–584.
- Stern R.J., Anthony E.Y., Ren M., Lock B.E., Norton I., Kimura J.I., Miyazaki T., Hanyu T., Chang Q., Hirahara Y. Southern Louisiana salt dome xenoliths: First glimpse of Jurassic (ca. 160 Ma) Gulf of Mexico crust // Geology. 2011. V. 39. P. 315–318.

Thermobaric Conditions of Organic Matter Catagenesis in the Russian Segment of Barents Region Archipelagos (Franz Josef Land, Novaya Zemlya)

D. S. Nikitin^{1, *}, M. D. Khutorskoy¹, O. S. Samsonova¹

¹*Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: ndsnomination@mail.ru*

The natural bitumen (NB) localization finds in the archipelagos of Russian Arctic Western segment is considered. The nature of their appearance in connection with the geothermal regime of the subsurface is discussed. Based on numerical simulation, temperatures and heat flow density are calculated in 2D geometry along seismogeological profiles and in 3D geometry for the Franz Josef Land isometric structure. It is concluded that all the noted NB manifestations are genetically related to hydrothermal activity, the signs of which are adequately recorded in the geotemperature field.

Keywords: natural bitumen, hydrothermal processes, catagenesis, temperature, heat flow, modeling.