

УДК 550.361

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА АСТРАХАНСКОЙ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОВИНЦИИ

© 2024 г. М. Д. Хуторской*, О. С. Белых, Д. С. Никитин, Е. Л. Прикащикова

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

*e-mail: mdkh1@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.08.2023 г.

После доработки 20.10.2023 г.

Принята к публикации 03.11.2023 г.

В статье рассматриваются данные о распределении температур и теплового потока в осадочном чехле Астраханского свода в Прикаспийской впадине. Проведен расчет глубинных температур в двух- и трехмерном пространстве на основе технологии термической томографии. Параметрами для этого расчета являлись оригинальные данные о теплофизических свойствах пород осадочного чехла и о концентрации долгоживущих изотопов в породах. Палинспастические реконструкции истории седиментации чехла послужили основой для расчета эволюции температур на протяжении 400 млн лет.

Ключевые слова: Прикаспийская впадина, Астраханский свод, тепловой поток, теплопроводность, радиогенная теплогенерация, численное моделирование.

DOI: 10.31857/S0024497X24020044, **EDN:** zbvugq

Применение теоретических и методических аспектов геотермии в геологоразведочной практике на нефтегазовых месторождениях сейчас становится повсеместным. Достаточно вспомнить, что ни один программный продукт, реализующий технологию бассейнового моделирования, не обходится без задания редуцированного теплового потока в качестве граничного условия, а теплофизических свойств (температуро- и теплопроводности, теплоемкости) — как параметров модели. Отсюда следует вывод, что точность, а, следовательно, и достоверность при прогнозе нефтегазоносности с помощью бассейнового моделирования зависят от корректности задания редуцированного теплового потока как условия на нижней границе области моделирования.

Под редуцированным тепловым потоком мы понимаем тот тепловой поток, который поступает к подошве слоя активной радиогенной теплогенерации (РТГ). Толщина этого слоя зависит от концентрации долгоживущих изотопов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в земной коре, и в платформенных структурах она обычно изменяется от 7 до 20 км. Такой заметный разброс глубин заставляет более детально анализировать долю радиогенного тепла в общем тепловом балансе и эмпирически исследовать редукцию, т.е. убывание

теплового потока с глубиной по мере уменьшения концентрации перечисленных долгоживущих изотопов.

В этой работе мы постарались обобщить данные материалов термокаротажа и высокоточных температурных зондирований скважин и результаты определения теплопроводности образцов керна Астраханского свода и смежных территорий, а также выполнить расчет численных моделей распределения температур и теплового потока в геометрии 2D и 3D по скважинным температурным измерениям вдоль профилей МОВ ОГТ и провести расчет нестационарного процесса тепловой эволюции осадочного бассейна для интервала геологического времени от 400 млн лет до настоящего времени.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И РАДИОГЕННОЙ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИИ ПОРОД РАЗРЕЗА

Использование трехмерного геотермического моделирования, которое мы идентифицировали как метод термической томографии [Хуторской и др., 2003], основан на объемной интерполяции геотермического поля. Применение этого

метода открыло возможности для обнаружения аномалий температуры и теплового потока, которые совершенно не проявлялись при анализе одно- или двухмерного распределения этих параметров.

Особенно ярко большая информативность 3D-геотермических моделей по сравнению с 1D- и 2D-моделями подтверждается в изометричных структурах, которыми в большинстве случаев являются впадины осадочных бассейнов.

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 температурного интервала, в пределах которого происходят катагенетические изменения органического вещества. С помощью той же методики можно определить глубину температурных интервалов, контролирующих гидротермальное рудообразование, глубину изотермы Кюри, *PT*-условия фаций регионального метаморфизма в конкретном регионе.

Метод термотомографии может применяться при любом масштабе исследований — от осадочного бассейна в целом до локальной его структуры. В первом случае он может рассматриваться как прогнозный, а во втором — как поисково-разведочный. Естественно, мы отдаем себе отчет в том, что эта методика не должна применяться автономно, а только в комплексе геолого-геофизических поисково-разведочных работ на углеводородное сырье [Хуторской, 2008].

Для реализации метода необходима информация о структуре разреза, получаемая по данным бурения и/или сейсмического профилирования, а также о величине фонового теплового потока для конкретного региона, что позволяет задать краевые условия для последующего численного моделирования.

Для каждого профиля при моделировании задается значение краевой температуры на верхней границе (как правило, на подошве гелиотермозоны) в соответствии с метеорологическими данными, и редуцированный тепловой поток — на нижней границе ($q_{ред.}$), соответствующий его измерениям в ближайших скважинах ($q_{набл.}$) за вычетом теплового потока, генерируемого в вышележащем слое земной коры при спонтанном распаде долгоживущих радиоизотопов (q_p), т.е. $q_{ред.} = q_{набл.} - q_{рад.}$

Радиогенный тепловой поток ($q_{рад.}$) рассчитывается на основании сейсмической информации о мощности слоя (z_i) и его составе, а также на основе расчета этой величины из аналитически определенных концентраций содержания долгоживущих радионуклидов: ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K , $(q_{рад.})_i = A(x, z) \cdot z_i$ [Смыслов и др., 1979].

Точность расчетов оценивается 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 погрешности определения глубины нахождения изотерм в створе пересечения профилей, показал, что она составляет 0.5–0.6%, т.е. при средней глубине расчета температур 8 км относительная погрешность составит ± 50 м.

Для решения задач данного исследования мы использовали результаты температурных скважинных измерений, выполненных производственными организациями.

Важным параметром для геотермической характеристики региона и для проведения моделирования теплового поля является значение коэффициента теплопроводности пород разреза. В солянокупольных бассейнах основными контрастными комплексами являются эвапориты (соль, гипс, ангидрит), обладающие высокой теплопроводностью (от 3.0 — для ангидритов до 5.3 Вт/(м·К) — для галита), и вмещающий терригенно-карбонатный комплекс с относительно низкой теплопроводностью. Нами проведены измерения теплопроводности пород этого комплекса по образцам керна из подсолевого разреза скважин Астраханского свода. Измерения проводились методом оптического сканирования на установке ТС14, сконструированной в ГИН РАН [Никитин и др., 2016].

При моделировании температур в призабойных частях глубоких скважин, которые достигают нижних горизонтов подсолевых пород или внедряются в породы кристаллического фундамента, мы обязаны учесть радиогенный тепловой поток, который генерируется в вышележащих породах. Таким образом, в качестве нижнего граничного условия задается, так называемый, редуцированный тепловой поток ($q_{ред.} = q_{набл.} - q_{рад.}$), в котором $q_{рад.}$ — это величина теплового потока, генерируемого при распаде долгоживущих изотопов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K , содержащихся в породах геологического разреза.

Теплогенерация приповерхностных пород (A_{sur}) рассчитывается по формуле [Birch et al., 1968]:

$$A_{sur}(\text{мкВт/м}^3) = 0.132 \cdot \rho \cdot (0.718U + 0.193Th + 0.262K),$$

где U , Th — концентрации урана и тория в г/т; K — вес. %, ρ — плотность породы, г/см³.

Данные о концентрациях были получены аналитическими методами по отобраным в кернах хранилищах образцам керна. Определение концентрации радионуклидов в порошковых пробах было выполнено рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре “S4 Pioneer” в аккредитованной лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН.

Переход от аналитически определенной величины A_{sur} к суммарной теплогенерации во всем интервале исследований (A) для традиционной в большинстве структур “экспоненциальной модели” уменьшения поверхностной теплогенерации с глубиной осуществляется с помощью формулы:

$$A_{sur} = A_{sur} \cdot \exp(-Z / D),$$

где Z — интервал глубины от поверхности до нижней границы расчета, D — параметр глубины, на которой поверхностная теплогенерация уменьшается в $e \approx 2.73$ раза. Для Восточно-Европейской платформы $D = 4.5$ км по данным [Боганик, 1975]. В пределах интервала расчета q_{pad} определяется интегрированием экспоненциальной функции в интервале глубин от Z_1 до Z_2 :

$$q_{pad} = \int_{Z_1}^{Z_2} A_{sur} \cdot \exp(-z / D) dz.$$

Интеграл легко вычисляется, в результате чего получается формула:

$$q_{pad} = D \cdot A_{sur} \cdot [1 - \exp(Z_2 - Z_1) / D],$$

с помощью которой рассчитывается радиогенный тепловой поток.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ РАБОТ

Геотермические исследования в скважинах Прикаспийской впадины начали проводиться еще в довоенные годы при разведке Южно-Эмбинской нефтеносной провинции. Здесь, на месторождениях Доссор, Таскудук, Макат, Сагиз и некоторых других в 1938–1940 гг. были измерены температуры в скважинах до глубины 2 км. Первые же обобщения термометрических данных позволили сделать вывод о неоднородности геотермических градиентов и о приуроченности повышенных

их значений к антиклинальным, а пониженных — к синклинальным структурам [Ковнер, 1941]. Несколько позже С.С. Ковнер на примере Южно-Эмбинских структур [Ковнер, 1947] дал теоретическое обоснование применению терморазведки для поисков погребенных куполов.

Несмотря на массовую термометрию скважин Прикаспийской впадины, обобщений таких данных относительно мало. Можно указать на работы И.Б. Дальяна, Ж.С. Сыдыкова и др. по восточной части впадины [Дальян, Посадская, 1972; Дальян, Сыдыков, 1972; Гидрогеотермические ..., 1977], В.С. Жеваго [Жеваго, 1972] — по центральной и восточной частям впадины, А.В. Дружинина [Дружинин, 1961] — по западной части.

Основной объем фактических данных по геотермии региона был собран в процессе подготовки Геотермической карты СССР масштаба 1:5000 000 и находился в архивах бывшей лаборатории геотермии Геологического института АН СССР в виде копий термограмм [Геотермическая ..., 1972]. Этот материал, а также данные, опубликованные позднее или любезно переданные нам производителями работ по термометрии, явились основой для наших исследований.

В процессе выполнения данного проекта были проанализированы термограммы еще 18 скважин глубиной от 4 до 6 км, расположенных в пределах Астраханской нефтегазовой провинции (НГП) (рис. 1).

Мы видим, что на четырех термограммах (скв. 1-Астраханская, 1-Долгая, 1-Хараблинская и 7-Астраханская) встречаются зоны отрицательных температурных градиентов (уменьшение температуры с глубиной), и на всех термограммах (за исключением скв. 1-Правобережная) проявились зоны резких скачков температурного градиента. Такие проявления однозначно свидетельствуют о влиянии техногенного гидродинамического фактора.

Эти два вида искажений температуры, как показывает многолетний опыт измерений, уменьшаются в процессе “выстойки” скважины после окончания бурения, т.е. в процессе приближения температуры в стволе скважины к равновесным с окружающим массивом пород. Это значит, что в данном анализе мы имеем дело с “невыветрившимися” скважинами, по которым практически невозможно выявить значения фоновых (неискаженного) геотермического градиента и плотности глубинного теплового потока. Но, несмотря на это, термограммы несут ценную информацию о влиянии

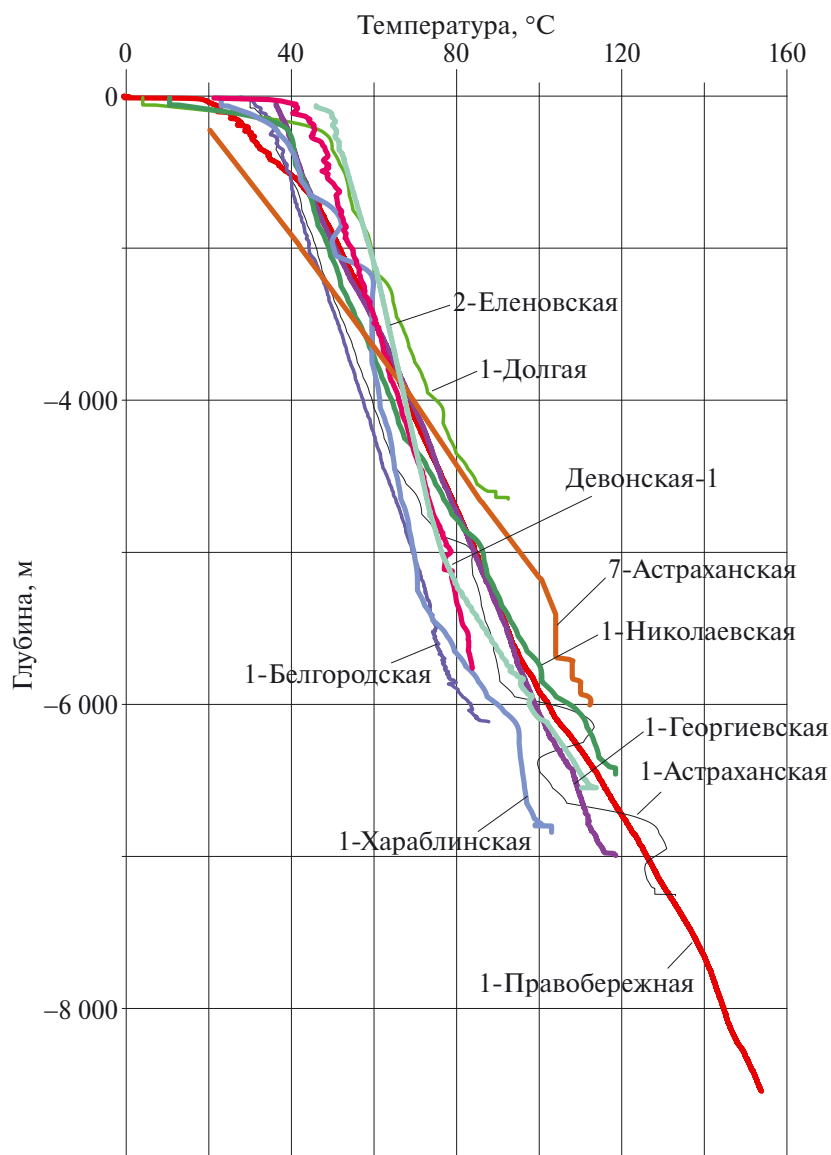


Рис. 1. Термограммы скважин Астраханской НГП.

структурно-теплофизических неоднородностей на границе контрастных сред – солей и окружающих терригенных и карбонатных пород.

Для района Астраханского свода мы рассчитали значение радиогенного теплового потока в интервале бурения скважин на основании измерений концентрации теплогенерирующих элементов: ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в образцах керна (табл. 1).

Для расчета радиогенного теплового потока (ТП) нужно априорно принять модель убывания поверхностной теплогенерации с глубиной и определить “параметр глубины D ”. Принимая традиционную экспоненциальную

модель убывания теплогенерации с глубиной [Sass et al., 1981], которая описывается формулой $A_z = A_0 \cdot e^{-z/D}$, параметр глубины D будет соответствовать глубине, на которой поверхностная теплогенерация уменьшается в e раз. Результаты соответствующих расчетов представлены на рис. 2. При заданных параметрах расчетная величина радиогенного ТП $q_{\text{рад}} = 15 \text{ мВт/м}^2$, т.е. составляет примерно 30% от фонового глубинного ТП в Прикаспийской НГП [Хуторской и др., 2004].

Повторим утверждение о том, что важнейшими параметрами для геотермической характеристики региона и для проведения моделирования

Таблица 1. Результаты определения концентрации долгоживущих изотопов в скважинах Астраханской НГП¹

№№ п/п	№ пробы	K (%)	Th г/т	U (г/т)	Глубина, м
1	2ца-73	0.0069	<1	1.1	4253.28
2	2ца-72	0.0063	<1	<1	4253.58
3	2ца-71	0.0061	<1	<1	4254.18
4	2ца-70	0.0085	<1	<1	4254.28
5	2ца-69	0.0083	<1	<1	4254.73
6	2ца-68	0.0941	1.5	<1	4255.78
7	2ца-67	0.0081	<1	2.4	4258.18
8	2ца-65	0.0084	<1	<1	4258.63
9	2ца-64	0.0099	1.8	<1	4258.33
10	2ца-63	0.0079	3.7	1.4	4259.18
11	2ца-62	0.0081	<1	<1	4259.63
12	2ца-61	0.0072	2.9	1.4	4262.58
13	2ца-60	0.0066	2.0	<1	4262.68
14	2ца-59-2	0.0087	2.5	<1	4264.48
15	2ца-59-1	0.0063	1.0	<1	4264.48
16	2ца-57	0.0081	<1	1.0	4265.53
17	2ца-56	0.0085	<1	1.3	4266.53
18	2ца-55	0.0073	1.0	<1	4267.33
19	2ца-54	0.0086	<1	<1	4267.83
20	2ца-53	0.0083	3.5	<1	4268.68
21	2ца-51	0.0084	<1	<1	4269.33
22	2ца-49	0.0072	<1	<1	4273.98
23	2ца-47	0.0180	<1	<1	4276.08
24	2ца-46	0.0085	<1	<1	4276.83
25	2ца-45	0.0095	3.6	<1	4277.83
26	2ца-44	0.0138	<1	<1	4278.13
27	2ца-42	0.0089	<1	<1	4279.28
28	2ца-41	0.0123	<1	<1	4280.18
29	2ца-39	0.0090	1.5	<1	4282.98
30	2ца-36	0.0084	<1	1.4	4286.04
31	2ца-35	0.0142	2.5	1.4	4288.59
32	2ца-34	0.0081	<1	1.4	4288.59
33	2ца-32	0.0055	2.5	2.4	4298.29
34	2ца-4	0.0144	<1	2.4	
35	3ца-100	0.0104	<1	<1	4129.85
36	3ца-101	0.0331	<1	<1	4128.45
37	3ца-102	0.2937	2.4	2.4	4128.25
38	3ца-103	0.1728	<1	1.1	4127.65
39	3ца-104	0.0263	<1	2.4	4126.6
40	3ца-105	0.0159	2.1	<1	4125.75
41	3ца-106	0.0136	<1	1.6	4125.55
42	3ца-107	0.0168	<1	1.5	4124.35
43	3ца-109	0.0523	1.8	5.4	4124.35
44	3ца-110	3.3450	30.7	2.4	4124.05

Таблица 1. Окончание

№№ п/п	№ пробы	K (%)	Th г/т	U (г/т)	Глубина, м
45	3ца-111	0.1141	3.5	1.2	4123.75
46	3ца-112	1.4251	17.5	3.3	4123.05
47	3ца-113	1.3280	14.8	2.4	4122.85
48	3ца-114	0.0110	<1	1.4	4188.5
49	3ца-115	0.0174	<1	2.4	4187.5
50	3ца-116	0.0198	<1	<1	4183.1
51	3ца-117	0.1208	<1	1.4	4175.9
52	3ца-118	0.0929	3.4	2.9	4175.2
53	3ца-119	0.0679	2.1	1.4	4174.6
54	3ца-120	0.0427	<1	2.4	4171.59
55	3ца-121	0.0215	2.6	<1	4161.09
56	3ца-123	0.0254	1.0	<1	4161.89
57	3ца-124	0.1477	3.1	3.4	4156.29
58	3ца-125	0.0144	<1	<1	4153.19
59	3ца-126	0.0225	<1	<1	4138.09

Примечание. ¹ – аналитические определения проведены С.М. Ляпуновым и Е.П. Шевченко (ГИН РАН, Москва).

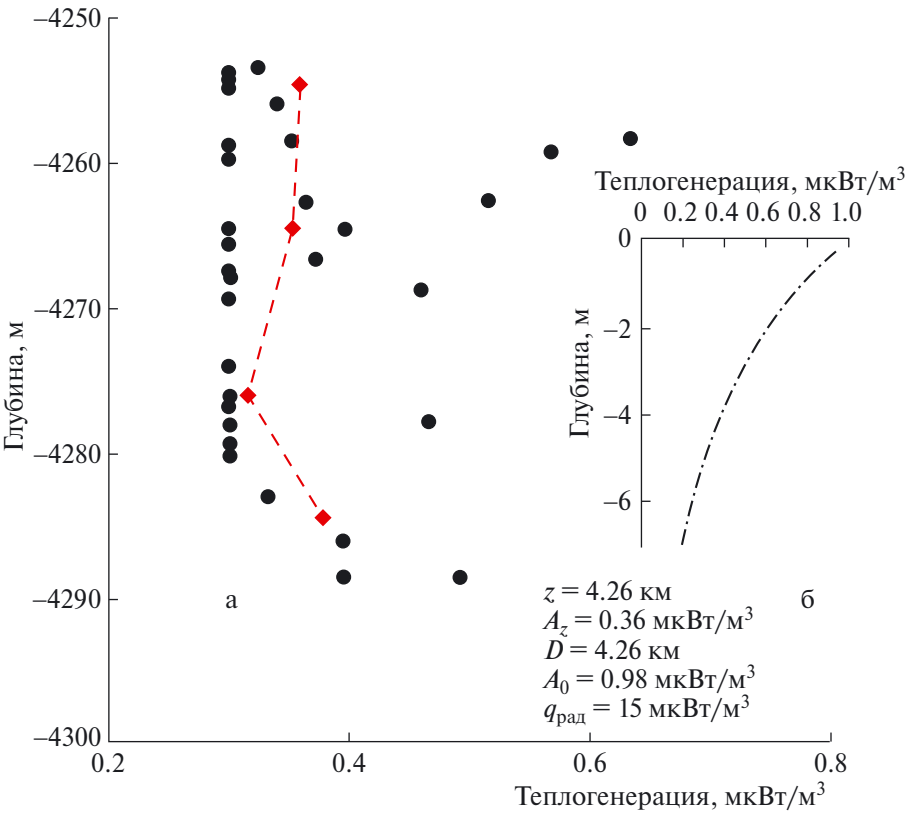


Рис. 2. Радиогенная теплогенерация в скважинах Астраханской НГП. а – теплогенерация керна с соответствующих глубин (черные точки) в скважинах № 2ца и № 3ца Центрально-Астраханского свода и поинтервальное осреднение данных (красный пунктир); б – аппроксимация распределения теплогенерации с глубиной для экспоненциальной модели.

Таблица 2. Результаты измерения теплопроводности образцов карбонатных пород из скважин Астраханской НГП

Порода	Возраст	Номер образца	Теплопроводность (k), Вт/(м·К)			Дисперсия	Глубина отбора, м
			k, mean	k, min	k, max		
Калькаренит	P1fl	1пр-127	2.17	2.11	2.21	0.002	4038
Калькаренит		1пр-129	2.53	2.39	2.58	0.002	4036.4
Калькаренит		1пр-131	2.38	2.36	2.52	0.002	4032.25
Калькаренит		1пр-130	2.5	2.4	2.64	0.004	4034
Известняк		1пр-132	2.13	1.94	2.34	0.006	4006.45
Калькаренит		3ца-100	2.65	2.54	2.78	0.002	4129.85
Калькаренит		3ца-101	2.57	2.42	2.68	0.002	4128.45
Калькаренит		3ца-102	2.19	2.06	2.3	0.002	4128.25
Известняк		3ца-103	2.12	2.01	2.23	0.002	4127.65
Известняк		3ца-104	2.22	2.06	2.38	0.004	4126.6
Известняк		3ца-105	2.3	2.12	2.42	0.006	4125.75
Известняк		3ца-106	1.7	1.63	1.78	0.001	4125.55
Известняк		3ца-107	2.21	2.03	2.45	0.004	4124.35
Известняк		3ца-109	2.38	2.26	2.47	0.001	4124.35
Известняк		3ца-110	1.97	1.9	2.03	0.001	4124.05
Известняк		3ца-111	2.46	2.36	2.58	0.002	4123.75
Известняк		3ца-112	1.68	1.59	1.85	0.002	4123.05
Калькаренит		3ца-113	2.23	2.16	2.29	0.001	4122.85
Калькаренит		3ца-114	2.1	2.02	2.17	0.001	4188.5
Известняк		3ца-115	2.43	2.22	2.56	0.004	4187.5
Известняк	P1ar	3ца-116	2.16	2.08	2.25	0.002	4183.1
Калькаренит		3ца-121	2.04	1.91	2.17	0.002	4161.09
Калькаренит		3ца-122	2.54	2.37	2.71	0.004	4161.89
Калькаренит		3ца-123	1.99	1.75	2.19	0.01	4156.29
Калькаренит		3ца-124	1.9	1.82	2.02	0.002	4153.19
Калькаренит		3ца-126	2.28	2.09	2.4	0.003	4138.09
Карбонатные и терригенно-глинистые породы		2ца-96	2.64	2.24	2.95	0.022	4237.89
Слоистая, глинистая порода		2ца-95	1.6	1.5	1.69	0.002	4238.29
Обломочный известняк		2ца-92	2.3	2.09	2.48	0.007	4239.34
Известняк		2ца-91	2.68	2.33	3.15	0.02	4239.99
Брекчированная порода фельзит жильного типа	C2cm	2ца-90	2.76	2.56	2.89	0.003	4241.59
Брекчия, зона дробления, окварцевание.		2ца-89	2.04	1.95	2.11	0.001	4242.39
Известняк		2ца-88	2.28	2.07	2.37	0.002	4242.64
Известняк		2ца-87	2.23	2.08	2.36	0.002	4242.89
Известняк		2ца-86	2.08	1.94	2.21	0.004	4242.99
Известняк		2ца-85	2.19	1.96	2.37	0.005	4243.64
Известняк		2ца-84	2.29	2.22	2.38	0.001	4243.89
Известняк		2ца-83	2.1	1.93	2.22	0.002	4243.34
Известняк		2ца-82	2.56	2.39	2.73	0.004	4244.89
Известняк		2ца-81	2.08	1.99	2.15	0.001	4245.89
Известняк		2ца-80	2.84	2.54	3.05	0.012	4246.89

Таблица 2. Продолжение

Порода	Возраст	Номер образца	Теплопроводность (k), Вт/(м·К)			Дисперсия	Глубина отбора, м
			k, mean	k, min	k, max		
Известняк	C2pr	2ца-79	2.4	2.47	2.79	0.007	4250.49
Известняк		2ца-78	2.84	2.56	3.01	0.01	4250.39
Известняк		2ца-77	2.67	2.33	2.92	0.015	4251.14
Известняк		2ца-76	2.38	2.6	3.13	0.015	4251.29
Известняк		2ца-75	2.42	2.31	2.51	0.001	4251.79
Известняк		2ца-74	1.98	1.17	2.23	0.012	4251.79
Детрит		2ца-73	2.4	2.23	2.6	0.004	4253.28
Калькарениит		2ца-72	2.3	2.2	2.38	0.001	4253.58
Калькарениит		2ца-71	1.86	1.82	1.93	0.0006	4254.18
Калькарениит		2ца-70	2.04	1.93	2.2	0.002	4254.28
Калькарениит		2ца-69	2.86	2.65	3.18	0.011	4254.73
Калькарениит		2ца-68	2.37	2.26	2.49	0.001	4255.78
Калькарениит		2ца-67	2.23	2.15	2.34	0.001	4258.18
Известняк		2ца-66	2.12	1.98	2.29	0.003	4258.33
Известняк		2ца-65	2.4	2.26	2.6	0.003	4258.63
Известняк		2ца-63	2.05	1.92	2.18	0.003	4259.18
Калькарениит		2ца-62	2.06	2	2.15	0.0009	4259.63
Калькарениит		2ца-61	1.91	1.8	1.99	0.001	4262.58
Калькарениит		2ца-60	2.01	1.89	2.1	0.002	4262.68
Известняк		2ца-59	2.59	2.42	2.7	0.003	4264.48
Известняк		2ца-58	2.26	2.19	2.34	0.001	4264.83
Калькарениит		2ца-57	1.97	1.88	2.11	0.003	4265.53
Известняк		2ца-56	1.75	1.65	1.84	0.002	4266.53
Известняк		2ца-55	2.09	2	2.16	0.0001	4267.33
Известняк		2ца-54	1.94	1.86	2.02	0.001	4267.83
Известняк		2ца-53	1.57	1.55	1.6	0.0001	4268.68
Калькарениит		2ца-51	2.15	2.05	2.23	0.0009	4269.33
Калькарениит		2ца-49	2.07	1.97	2.21	0.002	4273.98
Калькарениит		2ца-47	1.74	1.64	1.84	0.001	4276.08
Калькарениит		2ца-46	1.99	1.91	2.09	0.001	4276.83
Калькарениит		2ца-45	1.95	1.86	2.03	0.001	4277.83
Калькарениит		2ца-44	2.29	2.19	2.43	0.002	4278.13
Известняк		2ца-42	2.08	1.98	2.22	0.003	4279.28
Известняк		2ца-41	1.99	1.91	2.07	0.001	4280.18
Калькарениит		2ца-39	1.94	1.84	2.04	0.002	4282.98
Кальцилютит		2ца-36	2.18	2.06	2.31	0.003	4286.04
Известняк		2ца-35	2.24	2.04	2.43	0.005	4288.59
Калькарениит		2ца-34	2.38	2.23	2.47	0.001	4288.59
Калькарениит		2ца-33	2.06	1.89	2.16	0.002	4293.98
Известняк		2ца-32	2.39	2.32	2.46	0.001	4298.29
Известняк		2ца-31	1.93	1.86	2.05	0.004	4300.94
Обломочный детрит		2ца-30	2.19	1.75	2.71	0.022	4303.63
Калькарениит		2ца-28	2.05	1.99	2.11	0.0009	4304.73
Известняк		2ца-27	3.69	3.27	4.06	0.033	4304.83
Калькарениит		2ца-26	1.77	1.66	1.85	0.001	4306.78

Таблица 2. Окончание

Порода	Возраст	Номер образца	Теплопроводность (k), Вт/(м·К)			Дисперсия	Глубина отбора, м
			k, mean	k, min	k, max		
Известняк	C2pr	2ца-25	1.91	1.85	1.97	0.0009	4307.28
Калькаренит		2ца-24	1.59	1.49	1.72	0.002	4307.83
Известняк		2ца-23	1.75	1.64	1.93	0.006	4308.68
Известняк		2ца-22	1.98	1.81	2.21	0.008	4308.78
Калькаренит		2ца-21	1.84	1.79	1.9	0.0008	4310.08
Калькаренит		2ца-20	3.19	2.77	3.37	0.014	4322.51
Калькаренит		2ца-19	2.04	1.92	2.19	0.003	4323.16
Калькаренит		2ца-18	2.09	1.7	2.43	0.049	4323.61
Калькаренит		2ца-17	2.2	2.02	2.37	0.008	4323.91
Калькаренит		2ца-16	2.01	1.87	2.18	0.006	4324.08
Калькаренит		2ца-14	2.79	2.13	3.8	0.281	4324.76
Калькаренит		2ца-13	2.02	1.94	2.16	0.001	4325.01
Калькаренит		2ца-12	1.95	1.77	2.06	0.008	4325.26
Калькаренит		2ца-7	2.24	2.08	2.37	0.004	4327.06
Калькаренит		2ца-6	2.08	1.89	2.34	0.012	4327.81
Калькаренит		2ца-5	2.24	2.08	2.37	0.002	4328.75
Калькаренит	C2sk	2ца-2	1.9	1.8	1.99	0.001	4330.66
Калькаренит		2ца-1	1.99	1.75	2.26	0.008	4331.11

Таблица 3. Результаты измерения теплопроводности терригенных пород из скважин Астраханской НГП

№ п/п	Площадь	№ скв.	Интервал, м	Теплопроводность, Вт/(м·К)				Тепловая неоднородность ($k_{\max}-k_{\min}$)/ $k_{\text{сред.}}$
				среднее	минимальное	максимальное	дисперсия	
1	Правобережная	1	6247–6253	1.753947	0.996573	3.949382	0.276366	1.68352
2	Девонская	1	5970–5979	1.742817	1.101665	3.193683	0.138165	1.20037
3	Девонская	1	6024–6033	1.281602	0.740118	3.264903	0.129429	1.97002
4	Девонская	1	5970–5979	1.334436	0.954991	2.54467	0.052703	1.19127
5	Девонская	1	5970–5979	1.310506	0.874544	2.532376	0.075003	1.26503
6	Девонская	1	6024–6033	1.564319	0.951565	3.446834	0.128729	1.59512
7	Девонская	1	6024–6033	2.269171	1.270308	4.042561	0.289587	1.22170
8	Девонская	1	6024–6033	1.388105	0.871854	2.788758	0.136678	1.38095
9	Девонская	2	6570–6576	1.632522	0.925446	2.634688	0.129575	1.04699
10	Девонская	2	6536–6545	1.302478	0.763234	2.899431	0.092415	1.64010
11	Девонская	2	6197–6204	1.060416	0.668673	2.213663	0.068046	1.45697
12	Девонская	2	6177–6184	1.081293	0.713999	2.081629	0.049515	1.26481
13	Девонская	2	6177–6184	1.354987	0.744588	2.721114	0.109897	1.45870
14	Девонская	2	6083–6089	1.446411	0.916252	2.141131	0.06126	0.84684
15	Девонская	2	6536–6545	0.91083	0.619158	2.60867	0.048221	2.18428
16	Девонская	2	5750.5–5757.5	1.353903	0.789891	2.51991	0.081565	1.27780
17	Девонская	2	6619–6627	1.1853	0.807978	2.850513	0.072539	1.72322
18	Девонская	2	6177–6184	1.368615	0.879056	2.637168	0.097872	1.28459

Таблица 3. Окончание

№ п/п	Площадь	№ скв.	Интервал, м	Теплопроводность, Вт/(м·К)				Тепловая неоднородность ($k_{\max}-k_{\min}$)/ $k_{\text{сред.}}$
				среднее	минимальное	максимальное	дисперсия	
19	Девонская	2	6545–6563	1.122835	0.68642	2.447058	0.078111	1.56803
20	Девонская	2	6197–6204	1.21996	0.824682	2.131434	0.057619	1.07114
21	Девонская	2	6325–6331	1.660223	1.300486	2.181776	0.02254	0.53083
22	Девонская	2	6520–6528	1.507052	1.060083	2.735106	0.057323	1.11146
23	Ширияевская	1	4254–4261	1.269847	0.796834	2.264687	0.054427	1.15593
24	Ширияевская	1	4218–4225	1.054221	0.688271	2.027593	0.038189	1.27044
28	Астраханская	40	3973.7–3978.7	1.420187	1.04814	2.247144	0.042476	0.84426
30	Астраханская	16	4195.26–4206	1.398916	0.801095	2.797353	0.11857	1.42700
31	Астраханская	27	3884.11–3898.52	1.599949	0.866766	4.243244	0.289491	2.11037
32	Астраханская	27	3946–3960	1.615065	1.193783	2.507076	0.051499	0.81315
33	Астраханская	37	4018.05–4024.95	1.136453	0.77114	2.319617	0.04192	1.36255
36	Черная Падина	1	5085.9–5092	1.561751	0.984126	2.935642	0.117579	1.24957
49	Астраханская	37	4036.98–4043.67	1.245161	0.745373	2.556118	0.081435	1.45423
50	Астраханская	37	4012.49–4018.05	1.066547	0.724495	1.881392	0.037578	1.08471
51	Астраханская	37	4036.98–4043.67	1.478	1.148029	1.982116	0.021076	0.56433
52	Астраханская	43	3941–3955	1.676781	0.649149	4.460526	0.520596	2.27303
54	Астраханская	5	4072–4079	0.948559	0.681036	1.383678	0.013558	0.74075
57	Астраханская	27	3960–3966	1.270328	0.727877	2.902544	0.080248	1.71189
58	Астраханская	27	3927.7–3932	1.380763	0.791625	2.814778	0.122554	1.46524
60	Девонская	2	6530–6539	1.67022	1.066377	2.809542	0.08838	1.04367
61	Погодаево-Остафьевская	45	4321–4332	1.987113	1.211667	3.226027	0.130635	1.01371
62	Девонская	2	5580–5583	3.194334	1.871666	5.548245	0.756418	1.15097

Таблица 4. Теплофизические параметры, принятые для моделирования геотермического поля Прикаспийской впадины [Хуторской и др., 2004]

Структурно-формационный комплекс	Температуропроводность, $(a) \cdot 10^{-7} \text{ (м}^2/\text{с)}$	Теплопроводность, $(k) \text{ (Вт/(м} \cdot \text{К))}$	Теплогенерация, $\text{(мкВт/м}^3\text{)}$
Надсолевой комплекс терригенных пород	5.0	2.0	1.5
Каменная соль	12.0	5.3	0.4
Подсолевой комплекс терригенных пород	7.0	2.3	1.3
Метаморфический комплекс (vгр. = 6.6 км/с)	8.0	2.5	1.5
Геофизический гранитно-метаморфический слой	6.0	2.5	1.8
Геофизический базальтовый слой	8.0	2.9	0.3
Эклогиты	10.0	3.2	0
Верхняя мантия	10.0	3.4	0

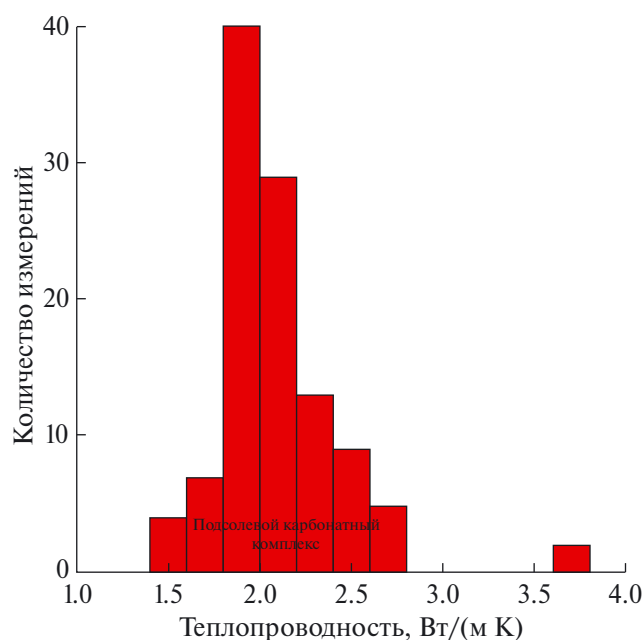


Рис. 3. Гистограмма теплопроводности пород подсолевого карбонатного комплекса.

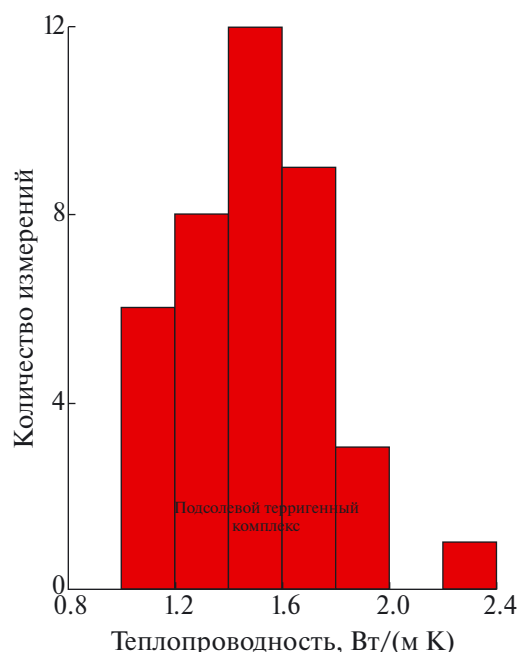


Рис. 4. Гистограмма теплопроводности пород подсолевого терригенного комплекса.

теплого поля являются значения коэффициента теплопроводности пород разреза в случае стационарного моделирования или два коэффициента: температуро- и теплопроводность — в случае нестационарного (эволюционного) моделирования.

В рамках задач данного исследования нами были использованы ранее полученные измерения теплопроводности карбонатных пород подсолевого комплекса [Хуторской, 2018], а также замерены коэффициенты теплопроводности терригенных пород подсолевого комплекса Астраханского свода. Результаты определения теплопроводности кернов из карбонатного и терригенного комплексов Астраханской НГП представлены соответственно в табл. 2 и 3.

На рисунках 3 и 4 приведены гистограммы распределения теплопроводности соответственно для карбонатных и терригенных пород подсолевого комплекса.

Обобщение полученных аналитических данных показало, что теплофизический разрез подсолевых комплексов Астраханского свода и его окрестностей характеризуется пониженной теплопроводностью по сравнению с теми значениями, которые мы применяли ранее для модельных геотермических расчетов в Прикаспийской впадине (табл. 4).

Как видно из табл. 4, основными контрастными комплексами в разрезе являются соль и эколгиты. Появление последних в низах коры является отличительной особенностью Центрально-Прикаспийской депрессии [Волож, 1991]. Эколгиты ассоциируются с линзой высокоскоростных пород (7.9–8.1 км/с) мощностью до 10 км. (Заметим, что ассоциация линзы высокоскоростных пород с эколгитами неоднозначна. Можно предложить и другое объяснение существования высокоскоростной линзы, например, появление слэба океанической коры Уральского палеоокеана в низах коры впадины в результате субдукции.).

ГЕОТЕРМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР И ТЕПЛОвого ПОТОКА

Двухмерное моделирование геотемпературного поля и теплового потока выполнено вдоль профиля “Еленовский-2” и основывалось на данных температурных измерений в скважинах, лежащих на линии профиля. Это скважины 1-Правобережная, 1-Девонская, 1-Астраханская, 2-Еленовская и 1-Долгая (рис. 5). Скважина 1-Правобережная пробурена через тело соляного купола и подсолевых пород. Остальные скважины вскрывают отложения межкупольных мульд. При выполнении расчетов были

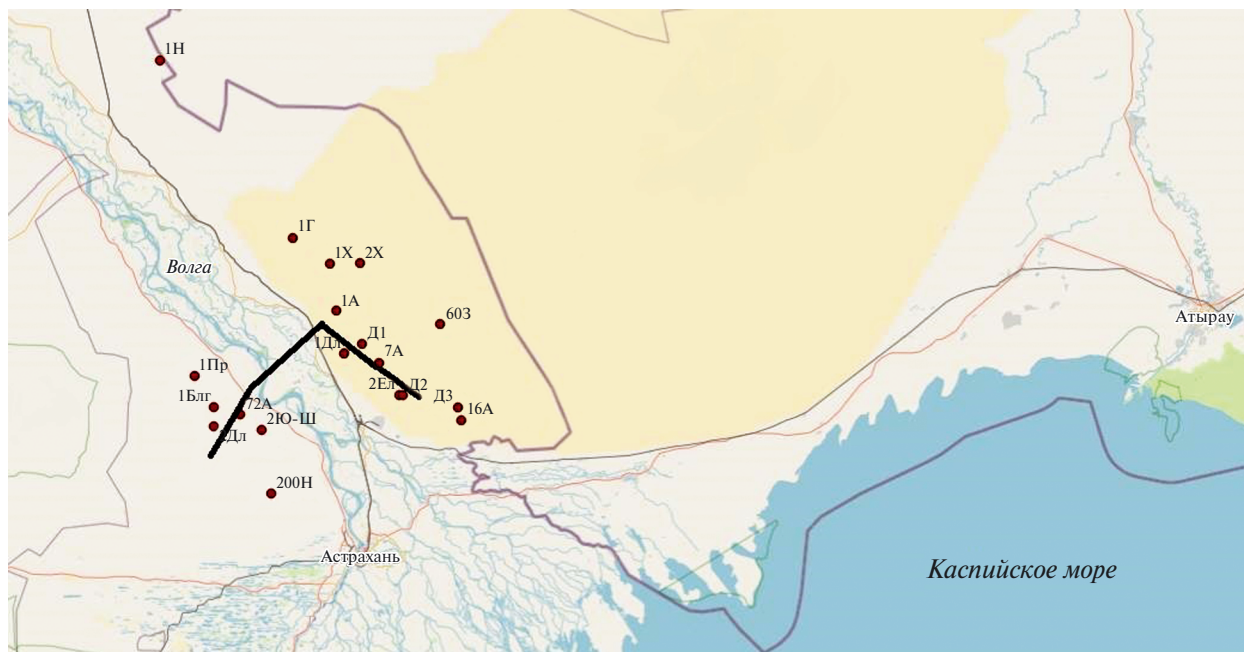


Рис. 5. Схема расположения исследованных скважин (красные точки) и профиля “Еленовский-2” (черная линия).

отбракованы те скважины, в которых встречены зоны отрицательных температурных градиентов, т.к. их происхождение не имеет отношения к реальной геологической ситуации. Профиль был нами выбран в связи с тем, что он проходит по всем глубоким параметрическим скважинам, для которых были известны термометрические измерения. Эти скважины вскрыли подсолевой разрез от нижнего девона до нижней перми и охарактеризовали весь спектр литологических разностей осадочного подсолевого разреза. Кроме того, вдоль этого профиля известны изменения плотностей горных пород (ρ) в подсолевом комплексе [Астраханский ..., 2008], что позволяет корректно рассчитать коэффициент температуропроводности ($a = k \cdot (c \cdot \rho)^{-1}$).

Расчет температур в разрезе с помощью программы TERMGRAF [Хуторской, 1996] требует задания граничных условий первого или второго рода на верхней и нижней границах, а также полное описание теплофизической структуры разреза, т.е. назначение температуропроводности, теплопроводности, теплоемкости (c), начальной температуры и теплогенерации в каждой узловой точке. В программе предусмотрен расчет температур в массиве $41 \cdot 41 = 1681$ узловых точек. На боковых границах области моделирования выполняется условие, “защитное” в программе, а именно $\partial T / \partial x = 0$, т.е. исключается отток

тепла в горизонтальном направлении на боковых границах области моделирования.

На верхней границе области, совпадающей с положением “нейтрального слоя”, задавалась температура (граничное условие первого рода), которая соответствовала средней метеорологической температуре на подошве слоя сезонных колебаний. Как правило, это глубина 18–20 м. Мы использовали методику определения данной температуры на основе построения кривой регрессии между глубиной скважины и призабойной температурой. Линейный фитинг данных позволил вывести формулу регрессии, связывающую температуру (T) и глубину забоя (Z): $T = (274.86 + Z) / 45.80$.

Если принять $Z = 20$ м, то $T = 6.4^\circ\text{C}$. Примерно такая температура была реально зафиксирована на “нейтральном слое” (на глубине 20 м) при термозондировании.

На нижней границе области моделирования, на глубине 9 км, задавался редуцированный тепловой поток (ТП), методика расчета которого изложена выше. Его величина составляла 35 мВт/м^2 , исходя из того, что в районе профиля наблюдается $\text{ТП} = 50 \text{ мВт/м}^2$, а радиогенный ТП составляет 15 мВт/м^2 . Реально же в программе для удобства реализации процедуры МКЭ¹ исполь-

¹ МКЭ — метод конечных элементов.

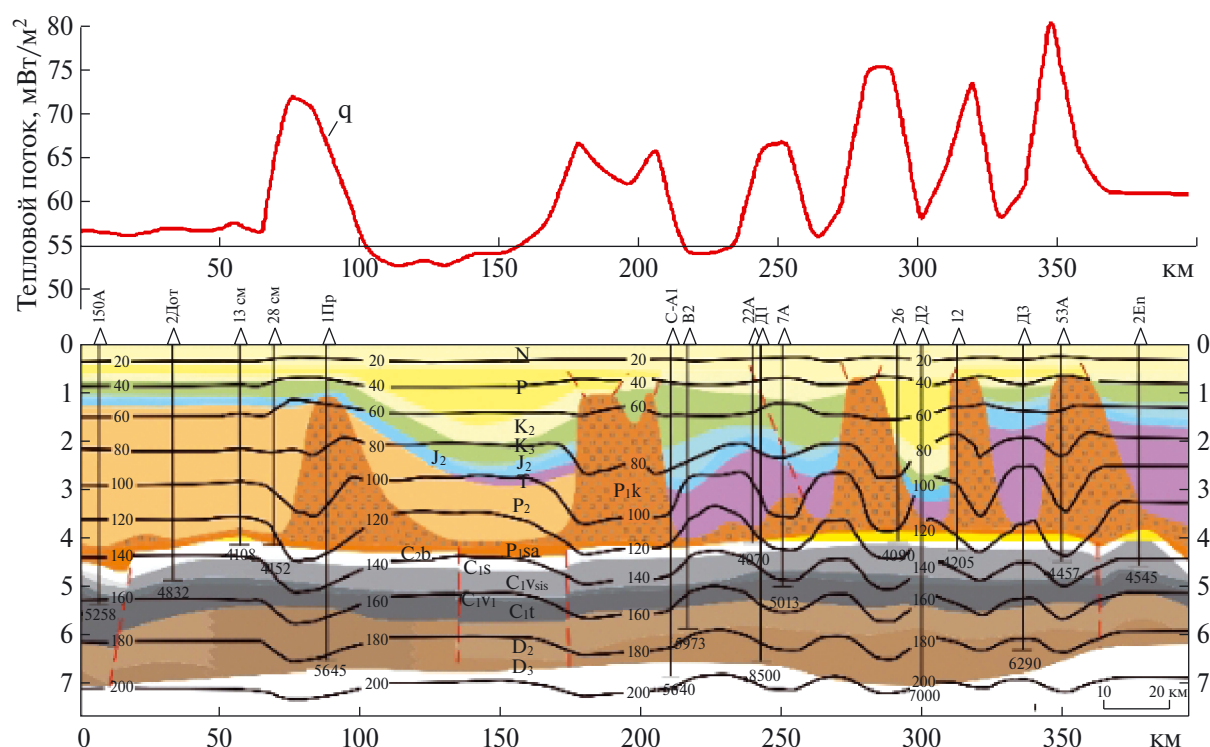


Рис. 6. 2D-температурный разрез, °С, и распределение ТП, мВт/м², вдоль профиля “Еленовский-2” от скважины Южно-Астраханская-16 (16ЮА) до скважины Еленовская-2 (2Ел).

зуется “приведенный” ТП на нижней границе, т.е. $q_{ред}/(c \cdot \rho)$, где c — теплоемкость пород².

На профиле (рис. 6) четко выделяются зоны рефракции глубинного ТП на границах соляных куполов и межкуповых мульд. Это связано с увеличением напряженности теплового поля из-за его концентрации в высокотеплопроводных солях и с соответствующим разряжением в относительно низкотеплопроводных породах надсолевого комплекса.

Полученное модельное распределение температур позволяет рассчитать ТП вдоль всего профиля. На рис. 6 мы наблюдаем значительные аномалии теплового потока над соляными куполами.

Заметим, что аномалии теплового потока не существовали бы в случае плоско-параллельного залегания солей. Но в условиях структурно-геологических неоднородностей, созданных галокинезом, тепловой поток испытывает заметную пертурбацию. Как мы видим, он в мульдах равен

52–55 мВт/м², а над соляными куполами увеличивается до 70–75 мВт/м².

Мы уже отмечали, что галогенные отложения обладают высокой теплопроводностью по сравнению с вмещающими терригенными породами. Сосуществование контраста теплопроводности и резких структурных границ между куполами и отложениями межкуповых зон создают условия для пертурбации глубинного теплового потока. Он концентрируется в теле солей, создавая над апикальными их частями и в прибортовых частях резкие аномалии теплового потока, на 50–60% превышающие фоновый. Это одна из главных особенностей распределения геотермического поля в солянокупольных бассейнах [Хуторской и др., 2004, 2010].

Температурный интервал катагенеза органического вещества в подсолевом комплексе приурочен к каменноугольным породам, C_{2v} , и лежит на глубинах от 4500 до 5000 м.

Корректность расчета модельных температур мы проверили, сравнив их рассчитанное распределение в наиболее глубокой скважине 1-Правобережная (1-PR) и реальные измерения температур в той же скважине, а также сравнив модельные

² Теплоемкость горных пород — это довольно консервативная величина. Для различных типов пород теплоемкость лежит в узких пределах, составляя от 800 до 820 Дж/(кг·К). В наших расчетах мы принимали нижний предел этого интервала.

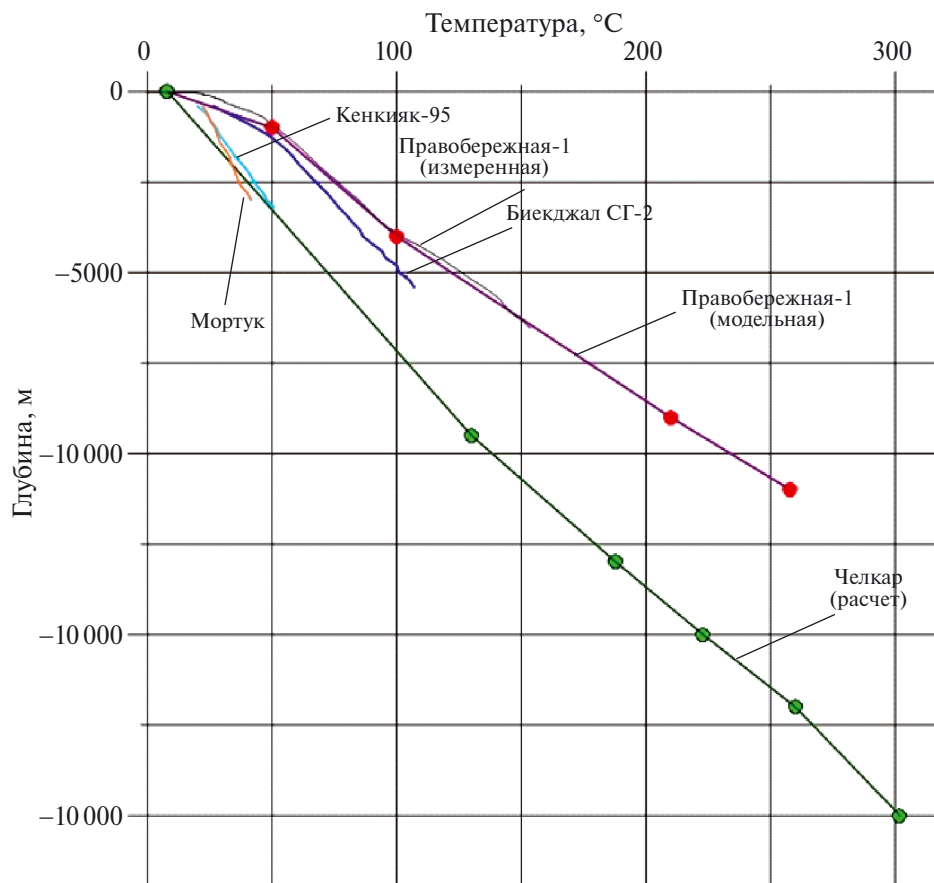


Рис. 7. Сравнительный анализ температур в глубоких скважинах.

и эмпирические данные о температурах в модельных скважинах “1-PR” и “Биекджал СГ2”, а также прогнозная термограмма для купола Челкар представлены на рис. 7. Как видно из рис. 7, модельный расчет глубинных температур в скважине “Правобережная-1” практически не отличается от эмпирически полученного во время термокаротажа.

Тепловой поток в этой скважине как по данным измерения, так и по результатам 2D-моделирования составляет 65 мВт/м^2 . Экстраполяция температур в нижнее полупространство выполнялась послойно в соответствии с теми мощностями контрастных пород, которые указаны на профиле “16ЮА–2Ел” (см. рис. 6). На верхней границе задавалась температура “нейтрального слоя”. Теплофизические свойства³ задавались по экспериментальным данным (см. табл. 2, 3) и составляли: для надсолевого терригенного комплекса — 1.8 Вт/(м·К) [Смыслов и др., 1979], соли — 4.8 Вт/(м·К) , для

подсолевых карбонатов — 2.0 Вт/(м·К) [Хуторской, 2018], подсолевых аргиллитов — 1.9 Вт/(м·К) , метаморфитов фундамента — 2.5 Вт/(м·К) (по аналогии с теплопроводностью нижнепалеозойских пород из скважин Мугоджар: “Лиманное-58 и 73”, “Юбилейное-05” и “Приорское-6318” [Хуторской, 1996]). Заметим, что на поверхности фундамента был задан не поверхностный, а редуцированный тепловой поток как нижнее граничное условие.

Рассчитаем прогнозное распределение температур на гигантском куполе Челкар, используя известные нам эмпирические факты. Из анализа региональных геотермических данных в регионе известно, что тепловой поток монотонно понижается в восточном направлении в пределах Прикаспийской впадины. Так, в районе Астраханского свода он составляет 55 мВт/м^2 , в скважине “Биекджал СГ2” — 48 мВт/м^2 , а в восточной прибортовой зоне впадины (Кенкияк, Мортук) — 38 мВт/м^2 (см. рис. 7). Это дает основание для задания ориентировочного значения теплового потока на куполе Челкар, т.к. реально там он не измерялся. В связи с тем, что Челкар расположен западнее Биекджала,

³ Для двухмерных нестационарных моделей использовались экспериментально определенные температуро- и теплопроводность, а для стационарных — только теплопроводность.

мы приняли для этой структуры значение теплового потока на поверхности 50 мВт/м^2 . Дальнейшая интерполяция производилась исходя из этого значения.

Верхним граничным условием для Челкара, так же как и для других скважин, была температура нейтрального слоя — 6°C . Реперными точками в разрезе являлись верхняя граница солей на глубине 1 км (в интервале 0–1 км залегают надсолевые терригенные отложения мезозоя–кайнозоя с теплопроводностью $1.8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$); нижняя граница эвапоритов на глубине 9.5 км (в интервале 1.0–9.5 км для солей традиционно принято экспериментально определенное значение теплопроводности — $4.8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$); подсолевые терригенные породы девона и нижнего, среднего карбона в интервале 9.5–13 км с теплопроводностью $1.9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; слой карбонатных пород позднего ордовика–силура в интервале 13–15 км со средней для карбонатов теплопроводностью $2.0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; еще глубже, в интервале 15–17 км — кембрийские и ордовикские терригенные слои с теплопроводностью $2.1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Образцы из нижнего палеозоя нами экспериментально не исследованы. Значение их теплопроводности получено косвенно по скважине Биекджал СГ2. Зная распределение температур с глубиной, т.е. температурный градиент ($G = 0.0231 \text{ К/м}$) в скв. Биекджал СГ2 и значение теплового потока (q), определенное на более мелком интервале глубин (48 мВт/м^2), можно рассчитать теплопроводность более глубокой части разреза как $k = q / G$. $k = 48 \cdot 10^{-3} / 0.0231 = 2.08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Ниже 17 км располагается рифейский складчатый комплекс. Для него с большой долей вероятности можно принять значение теплопроводности, характерное для докембрия Восточно-Европейской платформы. Это значение неоднократно подтверждалось в целом ряде публикаций и составляет $2.5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [Смыслов и др., 1979; Кутас и др., 1982]. Экстраполяция температур в интервале глубин 17–20 км рассчитывалась, исходя из значения редуцированного теплового потока (35 мВт/м^2), аналогично расчету по 1-PR. Полученная таким образом термограмма представлена на рис. 7.

Корректировка приведенного сравнительного анализа может быть реализована после проведения специальных геотермических исследований на куполе “Челкар”.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ 3D-МОДЕЛЬ АСТРАХАНСКОЙ НГП

При построении 3D-модели для района Астраханской НГП были отбракованы те скважины, в которых встречены зоны отрицательных температурных градиентов, т.к. их происхождение не имеет отношения к реальной геологической ситуации. Расположение исследованных скважин Астраханской НГП и ее окрестностей показано на рис. 8.

Глубинный диапазон для построения термической модели составлял 8 км, хотя максимальная глубина скважин, в которых измерена

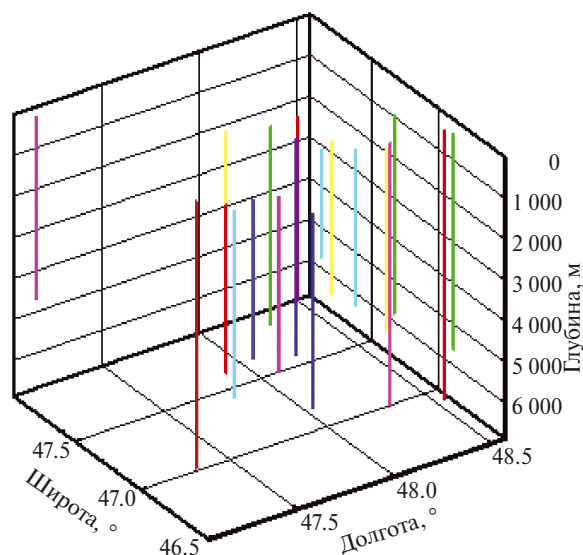


Рис. 8. Пространственное положение исследованных скважин Астраханской НГП и ее окрестностей.

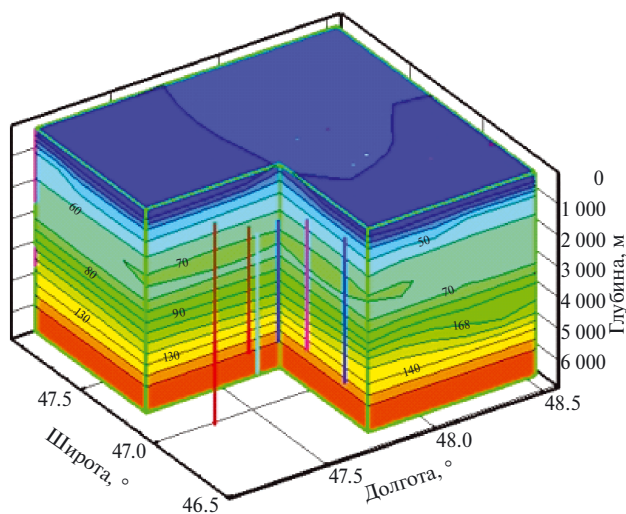


Рис. 9. 3D-температурная модель Астраханской НГП.

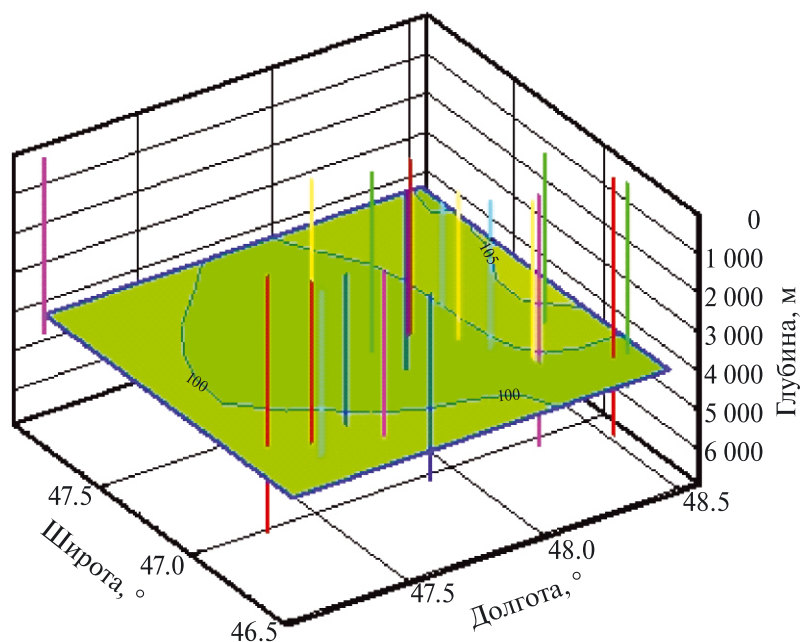


Рис. 10. “Срез” (slice) температур на глубине –4000 м.

температура, составляла 6500 м, 1.5 км разреза ниже забоя скважин не имеют внутри этого интервала контрастных теплофизических слоев, что позволяет экстраполировать температурные условия в нижнее полупространство.

В результате трехмерной интерполяции была получена 3D-модель температур в данном районе (рис. 9). Эта модель дает возможность посмотреть значения температур в любом срезе в геометрии X–Y–Z, т.е. она становится полностью “прозрачной” (рис. 10).

ЧИСЛЕННАЯ 2D-МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ ЭВОЛЮЦИИ АСТРАХАНСКОГО СВОДА И ЕГО ОКРЕСТНОСТЕЙ ВДОЛЬ ПРОФИЛЯ “ЕРШОВ–АСТРАХАНЬ”

Анализ термических данных тесно связан с прогнозом фазового состояния углеводородов в глубоких горизонтах Астраханского карбонатного массива. Здесь всегда существовали две точки зрения. Одни исследователи [Бочкарев и др., 2001; Постнова и др., 2001], указывая на высокую степень углефикации рассеянного органического вещества и высокие современные температуры в подсолевом комплексе отложений, полагают, что здесь могут быть выявлены только газовые и газоконденсатные залежи. Другие [Бродский и др., 1996; Орлов, Воронин,

2001], ссылаясь на обнаруженные в процессе бурения нефтепроявления, настаивают на возможности открытия крупных месторождений нефти в девонских отложениях. Следует заметить, что выводы о высокой степени литогенеза девонских и каменноугольных отложений Астраханского карбонатного массива (градации МК₄ на срезе 5.0 км, МК₅–АК₁ на срезе 6.5 км), сделаны на основании изучения разрезов палеозоя кряжа Карпинского и Каракульско-Смушковой зоны и без достаточных на то оснований экстраполированы на территорию Астраханского карбонатного массива, который принадлежит к совершенно иному тектоническому региону – Прикаспийской впадине. В то же время, как известно, флюидосистема подсолевого комплекса Прикаспийской впадины характеризуется аномально высокими давлениями, что кардинально сказывается на ходе процессов постдиагенетического преобразования, как осадка, так и заключенного в нем органического вещества [Ермолкин и др., 1989].

Влияние термофлюидодинамического фактора на процессы генерации и аккумуляции углеводородов в пределах Астраханского карбонатного массива было проанализировано ранее [Астраханский ..., 2008]. Расчетам температур в двух- и трехмерной геометрии придавалось большое значение. Однако, эти расчеты, хотя

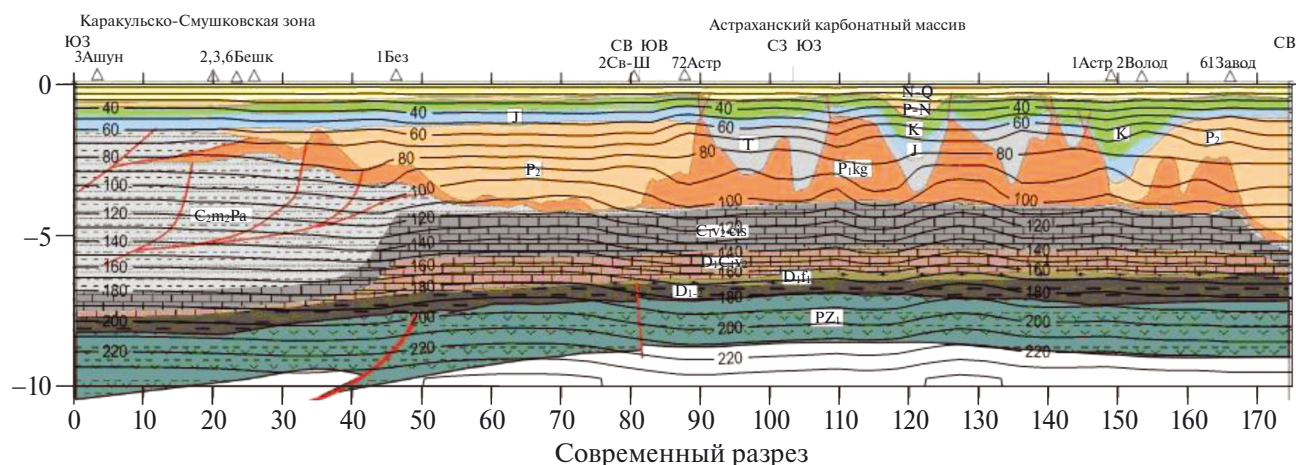


Рис. 12. Температурный разрез (изотермы, °С) настоящего времени с солянокупольными структурами.

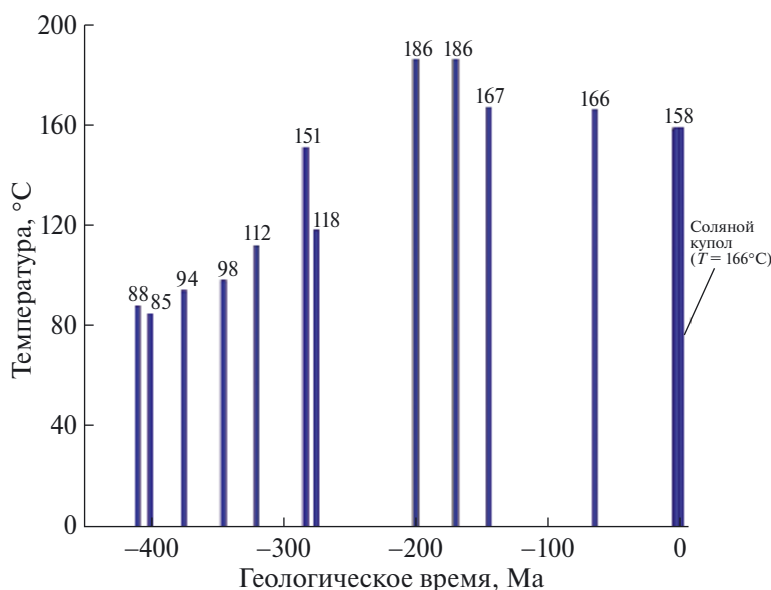


Рис. 13. Эволюция температур Астраханской НГП для точки на профиле “Ершов–Астрахань” с координатами: $X = 166$ км, $Z = -6.6$ км.

410 Ма – начало девона (рис. 11а); 384 Ма – начало франа D_3 (см. рис. 11б); 375 Ма – середина франа D_3 (см. рис. 11в); 345 Ма – начало визе C_1 (см. рис. 11г); 320 Ма – конец башкира C_2 (см. рис. 11д); 283 Ма – начало кунгура P_1 (см. рис. 11е); 275 Ма – конец кунгура P_1 (см. рис. 11ж); 205 – начало юры (см. рис. 11з); 145 – конец юры (см. рис. 11и); 65 Ма – конец мела (см. рис. 11к); 5 Ма – конец нижнего плиоцена N_2 (см. рис. 11л); 3.8 Ма – начало акчагыла N_2 (см. рис. 11м); 0 Ма – современный разрез (см. рис. 11н). В модели рис. 11н не учитывался галокинез, т.е. отложения соли,

образовавшие в послекунгурское время соляные купола, “растягивались” вдоль нижележащих геологических образований. Это искусственно делалось для того, чтобы определить глубину погружения бассейна в определенные моменты времени. Поэтому дополнительно к данной модели был рассчитан современный разрез с реально существующими солянокупольными структурами (рис. 12).

Полученная численная нестационарная модель позволяет рассчитать эволюцию температур в течение 410 млн лет геологической истории в любой точке профиля. Как пример, на рис. 13

показано изменение температуры во времени для точки с координатами: $X = 166$ км, $Z = -6.6$ км.

После отложения солей в эвапоритовом бассейне в конце кунгура разрез охладился, т.к. тепло расходовалось на прогрев отложившейся “холодной” соли. Однако, соль, обладая аномально высокой теплопроводностью, является теплопроводом, поэтому относительно быстро, за 70 млн лет, в разрезе не только восстановилась температура, но даже возросла по сравнению с докунгурским (бессолевым) временем.

После прогрева толщи солей до фоновых температур она продолжала “оттягивать” тепло из низов разреза, что обусловило монотонное падение температур в исследуемой точке за последние 200 млн лет.

ТЕПЛОВОЙ ПОТОК И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Связь “сейсмичность–тепловой поток” для геодинамических зон, характеризующихся высокой сейсмичностью, была описана во многих публикациях. Но в данном исследовании мы

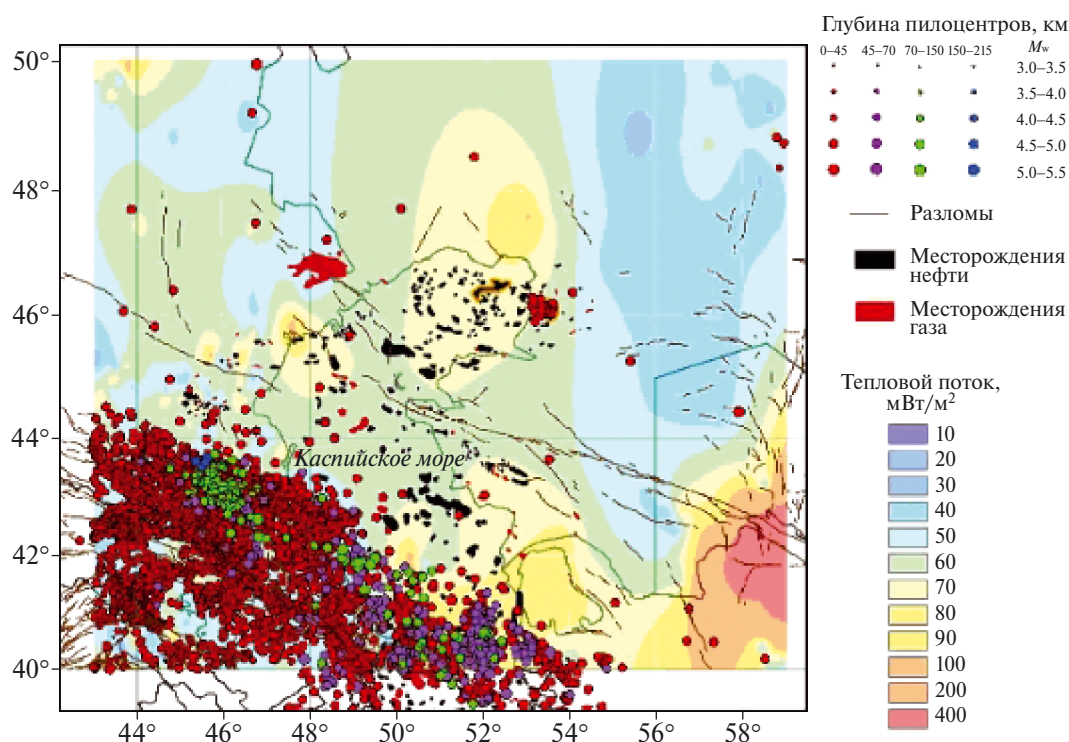


Рис. 14. Распределение теплового потока, современной сейсмичности и активных разломов в Прикаспийской впадине и в Восточном Предкавказье (M_w — магнитуда землетрясений).

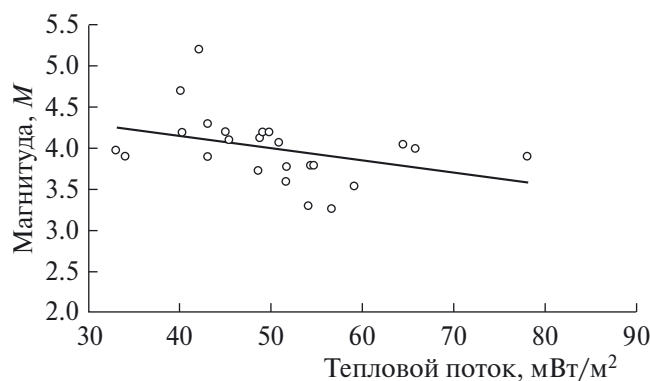


Рис. 15. Связь между магнитудой (M) и тепловым потоком (q). Уравнение регрессии: $M = -0.015q + 4.74$.

Таблица 5. Данные для расчета корреляции между тепловым потоком и магнитудой землетрясений в Прикаспийской впадине

Широта (°) центра квадрата	Долгота (°) центра квадрата	Среднее значение теплового потока (Q) в квадрате	Среднее значение магнитуды (M) в квадрате
48.75	58.75	57	3.28
44.25	57.75	40	4.70
46.75	48.25	42	5.20
42.75	47.75	50	4.20
43.25	47.75	40	4.20
43.75	47.75	54	3.80
42.75	47.25	66	4.00
43.25	47.25	49	4.13
40.75	46.75	45	4.20
43.25	46.75	51	4.08
44.75	46.75	54	3.30
47.25	46.75	55	3.80
49.25	46.75	34	3.90
42.75	46.25	43	4.30
43.25	46.25	64	4.06
43.75	46.25	78	3.90
44.25	46.25	59	3.55
43.25	45.75	52	3.78
43.75	45.75	33	3.98
44.25	45.75	49	3.74
43.25	45.25	43	3.90
43.75	45.25	49	4.20
44.75	45.25	52	3.60
43.25	44.75	45	4.10

акцентировали внимание на существовании такой связи в нашем районе, который относится к категории асейсмичных [Старовойт, 2005].

За временной период с 1980 по 2019 гг. здесь зафиксировано немногим более 200 землетрясений с магнитудой более 3. Эти данные приведены в каталоге ISC (Международный сейсмологический центр), и были нами отфильтрованы для района: 40–50° с.ш., 45–59° в.д. (рис. 14).

Мы сравнили средние значения теплового потока и магнитуды по квадратам 0.5° · 0.5° (табл. 5). Эмпирический коэффициент корреляции Пирсона для этих параметров оказался равным –0.38.

Проверка статистической значимости эмпирического коэффициента корреляции Пирсона показала, что при $r = -0.38$, $n = 24$, $k = 22$, $t_{эмп} = -1.95$. Критическое значение $t_{кр}$ – критерия Стьюдента при данном числе степеней свободы $k = 22$ и доверительной вероятности

$P = 0.93$ равно 1.904. Следовательно, $|t_{эмп}| > t_{кр}$ и коэффициент корреляции признается значимым (рис. 15), что позволяет рассчитать уравнение регрессии, связывающее тепловой поток (q) и магнитуду землетрясений (M).

Таким образом, доказана антибатная зависимость сейсмической активности, выраженной величиной магнитуды землетрясений, и теплового потока в асейсмичном Прикаспийском регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Измерения параметров теплового поля и расчетные числовые модели для Астраханской НГП позволили рассчитать глубинные температуры в над- и подсолевом комплексах. Полное совпадение эмпирически определенных температур и модельных расчетов позволяет определить значения глубинных температур и теплового потока в тех районах, где отсутствуют специально проведенные

геотермические исследования. Выявлена также пространственная корреляция температурных аномалий в осадочном чехле и районов интенсивной добычи углеводородов. Эта закономерность может рассматриваться как дополнительный поисковый признак при прогнозировании месторождений на больших глубинах.

Анализ двух- и трехмерных геотермических моделей Астраханского свода и его окрестностей позволяют сделать следующие выводы.

1. Теплофизический разрез подсолевых комплексов Астраханской НГП характеризуется пониженной теплопроводностью как карбонатных (1.8 ± 0.2 Вт/(м·К)), так и терригенных (1.40 ± 0.15 Вт/(м·К)) пород по сравнению с выполненными нами ранее измерениями теплопроводности надсолевых пород восточной прибортовой зоны Прикаспийской НГП.

2. С помощью численного моделирования методом конечных элементов рассчитан современный тепловой поток вдоль профиля “Еленовский”. Его значения в межкупольных мульдах составляет 52–55 мВт/м². Но над соляными куполами тепловой поток повышается до 72–75 мВт/м². Такие вариации связаны с рефракцией глубинного теплового потока в условиях структурно-теплофизических неоднородностей из-за контраста теплопроводности эвапоритов ($4.5\text{--}5.3$ Вт/(м·К)) и вмещающих терригенных пород надсолевого комплекса ($1.8\text{--}1.9$ Вт/(м·К)). Температурные условия катагенеза органического вещества (ОВ) в современном разрезе отмечаются в интервале глубин 4.5–5.0 км.

3. Рассчитана нестационарная температурная 2D модель Астраханской НГП вдоль профиля “Ершов–Астрахань” для интервала времени 410 млн лет — настоящее время. После отложения солей в эвапоритовом бассейне в конце кунгура разрез “охладился”, т.к. тепло расходовалось на прогрев отложившейся “холодной” соли. Однако, соль, обладая аномально высокой теплопроводностью, является теплопроводом, поэтому относительно быстро, за 70 млн лет, в разрезе не только восстановилась температура, но даже возросла по сравнению с докунгурским (бессолевым) временем. После прогрева до фоновых температур толщи солей она продолжала “оттягивать” тепло из низов разреза, что обусловило монотонное падение температур за последние 200 млн лет. Модель позволяет рассчитать глубину интервала катагенеза ОВ в геологическом прошлом. Например, для начала юрского времени, когда формировались залежи в подсолевом комплексе, температурные условия

катагенетической трансформации ОВ выполнялись в интервале глубин 3–4 км.

4. Построена 3D температурная модель Астраханского свода и его окрестностей; выявлена пространственная корреляция температурных аномалий в осадочном чехле (температурных куполов) и локализации залежей углеводородов. Эта закономерность может рассматриваться как дополнительный поисковый признак при прогнозировании месторождений на больших глубинах.

5. Расчет корреляции геотермических (теплого потока) и сейсмических (магнитуда) параметров продемонстрировал наличие статистически значимой антибатной корреляции. Полученное уравнение регрессии позволяет по величине теплового потока прогнозировать магнитуду возможного сейсмического события в регионе.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках программы госбюджетных исследований Лаборатории тепломассопереноса ГИН РАН № 122012700311-2 и при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-17-00019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астраханский карбонатный массив: Строение и нефтегазоносность / Под ред. Ю.А. Воложа, В.С. Парасыны. М.: Научный мир, 2008. 221 с.

Боганик Н.С. Радиогенное тепло земной коры Русской платформы и ее складчатого обрамления. М.: Наука, 1975. 159 с.

Бочкарев А.В., Делия С.В., Карпов П.А., Самойленко Г.Н., Степанов А.Н. Опыт предлицензионной оценки перспектив нефтегазоносности // Геология нефти и газа. 2001. № 2. С. 7–12.

Бродский А.Я., Юров Ю.Г., Волож Ю.А. Новый взгляд на строение Астраханского подсолевого поднятия // Недра Поволжья и Прикаспия. Вып. 11. Саратов: НВНИИГГ, 1996. С. 31–41.

Волож Ю.А. Осадочные бассейны Западного Казахстана (на основе сейсмостратиграфического анализа) / Автореф. дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М.: ГИН АН СССР, 1991. 49 с.

Геотермическая карта СССР / Под ред. Ф.А. Макаренко. М.: ГУГК СССР, ГИН АН СССР, 1972.

Гидрогеотермические условия Арало-Каспийского региона. Алма-Ата: Наука, 1977. 184 с.

Дальян И.Б., Посадская А.С. Геология и нефтегазоносность восточной окраины Прикаспийской впадины. Алма-Ата: Наука, 1972. 192 с.

- Дальян И. Б., Сыдыков Ж. С. Геотермические условия восточной окраины Прикаспийской впадины // Сов. геология. 1972. № 6. С. 126–131.
- Дружинин А. В. О связи между геотермическим режимом осадочной толщи и строением кристаллического фундамента // Геология нефти и газа. 1961. № 3. С. 20–25.
- Ермолкин В. И., Сорокова Е. И., Бобылева А. А. Формирование углеводородных скоплений в подсолевом комплексе Прикаспийской впадины // Советская геология. 1989. № 3. С. 31–40.
- Жеваго В. С. Геотермия и термальные воды Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1972. 253 с.
- Ковнер С. С. К теории термической разведки // Докл. АН СССР. 1941. Т. 32. № 6. С. 398–400.
- Ковнер С. С. Расчет величины термической аномалии антиклинали // Докл. АН СССР. 1947. Т. 56. № 5. С. 473–476.
- Кутас Р. И., Любимова Е. А., Смирнов Я. Б. Изучение теплового потока в Европейской части СССР // Тепловое поле Земли. М.: Мир, 1982. С. 285–294.
- Никитин Д. С., Хуторской М. Д., Никитин А. С. Бесконтактные измерения теплофизических свойств горных пород на установке ТС14 // Процессы в геосредах. 2016. № 3(7). С. 246–254.
- Орлов Г. И., Воронин Н. И. Перспективы нефтегазоносности девонского подсолевого комплекса Астраханского свода // Геология нефти и газа. 2001. № 1. С. 17–25.
- Постнова Е. В., Орешкин И. В., Писаренко Ю. А., Сизинцева Л. И. О состоянии ресурсной базы нефти и газа Прикаспийской мегавпадины // Недра Поволжья и Прикаспия. Вып. 27. Саратов: НВНИИГГ, 2001. С. 7–12.
- Смыслов А. А., Моисеенко У. И., Чадович Т. З. Тепловой режим и радиоактивность Земли. Л.: Недра, 1979. 191 с.
- Старовойт О. Е. Сейсмические наблюдения в России // Земля и Вселенная. 2005. № 2. С. 82–89.
- Хуторской М. Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. М.: Изд-во РУДН, 1996. 289 с.
- Хуторской М. Д. Применение трехмерного геотемпературного моделирования для расчета условий катагенеза органического вещества // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 4. С. 441–452.
- Хуторской М. Д. Геотемпературное поле Астраханского карбонатного массива // Процессы в геосредах. 2018. № 4(18). С. 1226–1239.
- Хуторской М. Д., Антипов М. П., Волож Ю. А., Поляк Б. Г. Температурное поле и трехмерная геотермическая модель Прикаспийской впадины // Геотектоника. 2004. № 1. С. 63–72.
- Хуторской М. Д., Подгорных Л. В., Грамберг И. С., Леонов Ю. Г. Термотомография Западно-Арктического бассейна // Геотектоника. 2003. № 3. С. 18–30.
- Хуторской М. Д., Тевелева Е. А., Цыбуля Л. А., Урбан Г. И. Тепловой поток в солянокупольных бассейнах Евразии – сравнительный анализ // Геотектоника. 2010. № 4. С. 3–19.
- Birch F., Roy R. F., Decker E. R. Heat flow and thermal history in New England and New York, chapt.33 // Studies in Appalachian Geology. N.Y., 1968. P. 437–451.
- Sass J. H., Blackwell D. D., Chapman D. S. et al. Heat flow of the crust of the United States // Physical properties of rocks and minerals. N.Y.: McGraw-Hill, 1981. P. 503–548.

THERMAL REGIME AND THERMAL EVOLUTION OF THE SEDIMENTARY COVER ON ASTRAKHAN OIL AND GAS PROVINCE

M. D. Khutorskoy*, O. S. Belykh, D. S. Nikitin, E. L. Prikachshikova

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

**e-mail: mdkh1@yandex.ru*

The article considers data on temperatures and heat flow distribution in the sedimentary cover of the Astrakhan swell in the Caspian basin. The calculation of the depth temperatures in two- and three-dimensional model with thermal tomography technology is carried out. The parameters for this calculation were original data on the thermophysical properties of sedimentary cover rocks and on the concentration of long-lived isotopes in rocks. Palinspastic reconstructions of the sedimentation history of the cover served as the basis for calculating the evolution of temperatures over 250 million years.

Keywords: Precaspian basin, Astrakhan swell, heat flow, conductivity, radiogenic heat production, digital modeling.