

УДК 551

## ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ГЕОТЕМПЕРАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА УСЛОВИЙ КАТАГЕНЕЗА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

© 2008 г. М. Д. Хуторской

Геологический институт РАН

119017 Москва, Пыжевский пер., 7; E-mail: mkhutorskoy@ginras.ru

Поступила в редакцию 06.02.2008 г.

Проведено трехмерное моделирование геотермического поля вдоль геотраверсов в Баренцевом море и в Прикаспийской впадине, построенных по данным МОВ ОГТ и глубокого бурения. Рассчитаны глубины интервала катагенетического преобразования органического вещества для различных участков осадочного бассейна. Наименьшая глубина этого интервала приурочена к Южно-Баренцевской впадине, где по геологоразведочным данным установлен самый высокий углеводородный потенциал. На трехмерных моделях к этому району приурочен “термический купол”, выделяемый впервые. Тот же эффект обнаружен и в Прикаспийской впадине – термические купола располагаются в районе Южной Эмбы, Мангышлака и Астраханского свода, где проводится наиболее интенсивная добыча углеводородного сырья.

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 проявляется в мозаичных, изометрических 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, РТ-условия фаций регионального метаморфизма в конкретном регионе.

В работах 1998–2004 гг. [Подгорных, Хуторской, 1998; Подгорных и др., 2001; Хуторской, Подгорных, 2001; Хуторской и др., 2003, 2004] была показана связь температурных аномалий с выявленной нефтегазоносностью недр в Печорском бассейне Баренцева моря, в Южно-Карской

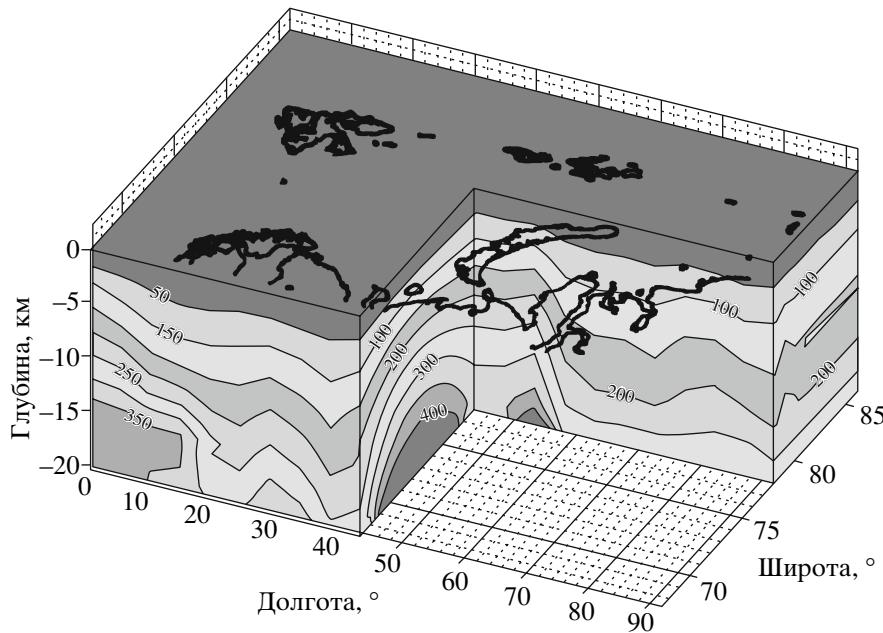
впадине, в южной части моря Лаптевых, в районах Южной Эмбы, Мангышлака и Астраханского свода. Было предложено понятие “термический купол” как визуальное проявление этой связи – локализация месторождений углеводородов была приурочена к термическим куполам, зонам подъема изотерм (рис. 1, 2). Термические купола не выделялись при одно- или двухмерном термическом моделировании, т.к. подобная методика не позволяла “заглянуть за линию профиля”.

Таким образом, 3D-геотермические модели обусловили появление дополнительного поискового признака при разведке углеводородов в осадочных бассейнах в акваториях и на суше.

Физический смысл связи расположения термических куполов и площадей нефтегазоносности заключается в том, что купола могут появиться только при существовании двух факторов: при наличии контраста теплопроводности внутри слоев осадочного чехла и при нарушении их плоско-параллельного залегания, т.е. в условиях структурно-теплофизических неоднородностей. Именно этим объясняется связь между распределением температурного поля и локализацией структур-ловушек.

### МЕТОДИКА ТЕРМОТОМОГРАФИИ

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 отдаём себе отчет в



**Рис. 1.** 3D-модель распределения глубинных температур ( $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) в Баренцево-Карском регионе.

том, что эта методика не должна применяться автономно, а только в комплексе геолого-геофизических поисково-разведочных работ на углеводородное сырье.

Реализация термотомографического метода основана на применении комплекса компьютерных программ, часть которых разработана при непосредственном участии автора, а часть – адаптирована для решения задач по объемному геотермическому моделированию из готовых фирменных программных продуктов.

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.

Температурное поле вдоль каждого из сейсмических профилей рассчитывалось с помощью программы для нестационарного моделирования теплового поля “TERMGRAF” [Хуторской, 1996].

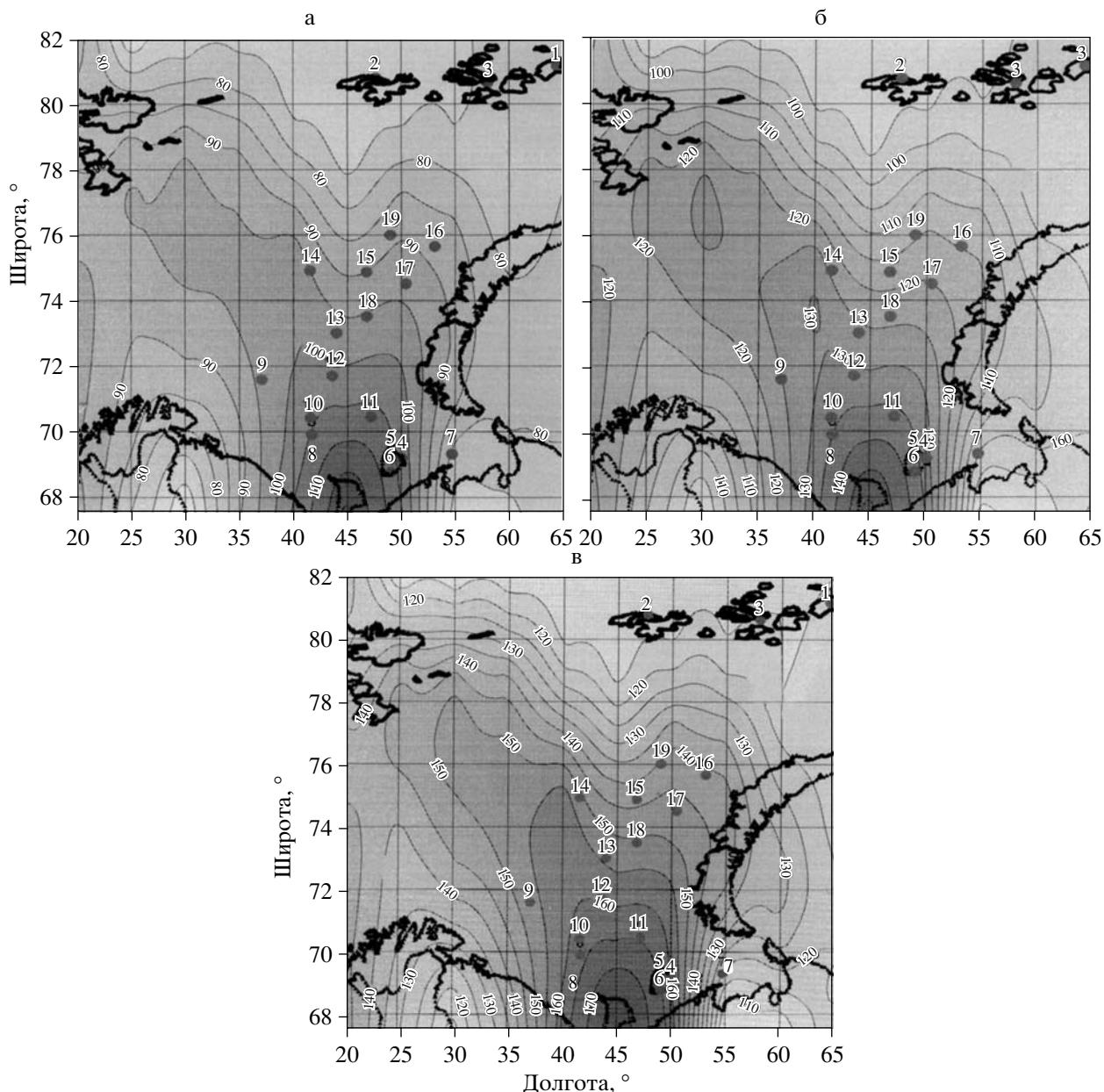
Для решения задачи о распределении температур в разрезе используется численный метод конечных элементов с квадратичной аппроксимацией функции температуры между узлами прямоугольной сетки. В программе предусматривается сетка  $41 \times 41$  узел (т.е. решается двумерная задача), линейные размеры узла по осям  $X$  и  $Z$  возможно изменять по требованию оператора. Внутри области моделирования задается конфигурация контрастных сред и их теплофизические свойства: температуропроводность  $a$  ( $\text{m}^2/\text{c}$ ), теп-

лопроводность  $k$  ( $\text{Вт}/(\text{м} \times \text{K})$ ) и нормированная плотность тепловых источников  $Q/(c\rho)$  ( $\text{К/с}$ ). В расчетной части комплекса задаются линейные размеры области моделирования ( $L_x$  и  $L_z$ , в км), которые определяют линейные размеры узла ( $L_x/41$  и  $L_z/41$ ), а также временной интервал дискретизации решения (в млн лет). Временной шаг итерационного процесса автоматически выбирается программой и рассчитывается как  $\tau = 10^{-7}(Z^2/4a)$ , где  $Z$  – толщина области моделирования.

В результате решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов:

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

где  $k$ ,  $c$ ,  $\rho$  – соответственно, теплопроводность, теплоемкость и плотность слоев литосферы,  $A(x, z)$  – плотность источников тепла в слое,  $\tau$  – время, мы получаем распределение температур и тепловых потоков  $q(z)$  и  $q(x)$  для принятой теплофизической среды в конечный момент временно-го этапа дискретизации. Полученный файл результатов переименовывается в файл начальных температур, и на следующем этапе начинается расчет с конечного момента предыдущего этапа. Возможность дискретизации решения удобна, если необходимо изменить теплофизическую среду в связи со структурно-вещественными перестройками геологического разреза, задать распределение новых источников и стоков тепла, а также просмотреть результаты расчета палеотемпературного поля. Если в модели требуется задать тепломассоперенос, то его можно имитировать



**Рис. 2.** Температурные карты-срезы в Баренцевом море на глубинах: а – 3 км, б – 4 км, в – 5 км.

Точками показано расположение скважин. Цифрами обозначены скважины: 1 – Северная; 2 – Нагурская; 3 – Хейса; 4 – Песчаноозерская; 5 – Ижим-Таркская; 6 – Бугринская; 7 – Северо-Гуляевская; 8 – Мурманская; 9 – Северо-Кильдинская; 10 – Северо-Мурманская; 11 – Куренцовская; 12 – Арктическая; 13 – Штокмановская-1; 14 – Ферсмановская; 15 – Лудловская-1; 16 – Адмиралтейская; 17 – Крестовая; 18 – Ледовая; 19 – Лунинская.

установкой граничных температур и/или адиабатического градиента в интервале глубин, на которые распространяется конвекция.

Для каждого профиля при моделировании задается значение краевой температуры на верхней границе в соответствии с метеорологическими данными и тепловой поток – на нижней границе ( $q_{\text{гр}}$ ), соответствующий его измерениям в ближайших скважинах ( $q_{\text{набл}}$ ) за вычетом теплового потока, генерируемого в вышележащем слое зем-

ной коры при спонтанном распаде долгоживущих радиоизотопов ( $q_p$ ), т.е.  $q_{\text{гр}} = q_{\text{набл}} - q_p$ .

Радиогенный тепловой поток ( $q_p$ ) рассчитывается на основании сейсмической информации о мощности слоя ( $z_i$ ) и его составе, а также из общепринятых традиционных величин удельной теплогенерации ( $A(x, z)$ ) для соответствующего типа пород:  $(q_p)_i = A(x, z)z_i$  [Смыслов и др., 1979].

Точность расчетов оценивается по двум критериям: во-первых, по совпадению модельного и из-

меренного в скважинах теплового потока; во-вторых, по совпадению температур на пересечении профилей.

Построение трехмерной региональной геотермической модели производится с помощью пакета трехмерной графики “TECPLOT v.7.0” (Amtec Engineering Inc.), который позволяет провести объемную интерполяцию наблюденного поля (в нашем случае температуры, теплового потока, а также структурных сейсмических границ) в координатах: широта–долгота–глубина.

Программа “TECPLOT” предусматривает трехмерную интерполяцию по сетке любой конфигурации. В большинстве случаев используется неравномерная сетка, “привязанная” к простиранию сейсмических профилей, вдоль которых выполнялись двухмерные расчеты глубинных температур. Таким образом, уравнение (1) 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  $Y$ . Однако многолетний опыт двухмерного термического моделирования показывает, что эта величина ничтожно мала. Например, для типичной структуры осадочного бассейна (например, для надсолевого комплекса Прикаспийской впадины) тепловой поток вдоль оси  $Y$  составляет не более  $0.04 \text{ мВт}/\text{м}^2$ , т.е. на три порядка ниже фоновой величины глубинного теплового потока [Хоторской и др., 2004]. Следовательно, получение трехмерного распределения температур с помощью объемной интерполяции практически адекватно решению прямой задачи для объемного теплового поля.

Теплофизическая среда, т.е. конфигурация контрастных теплофизических слоев и значения тепло- и температуропроводностей, задавалась на основе соответствующей оцифровки выделенных по сейсмическим данным структурных комплексов.

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: по совпадению модельного и измеренного в скважинах теплового потока и по совпадению температур на пересечении профилей. Метод наименьших квадратов, примененный для оценки погрешности определения глубины нахождения изотерм в створе пересечения профилей, пока-

зал, что она составляет  $\pm 150 \text{ м}$ , что при средней глубине расчета температур  $30 \text{ км}$  дает относительную погрешность  $0.5\%$ .

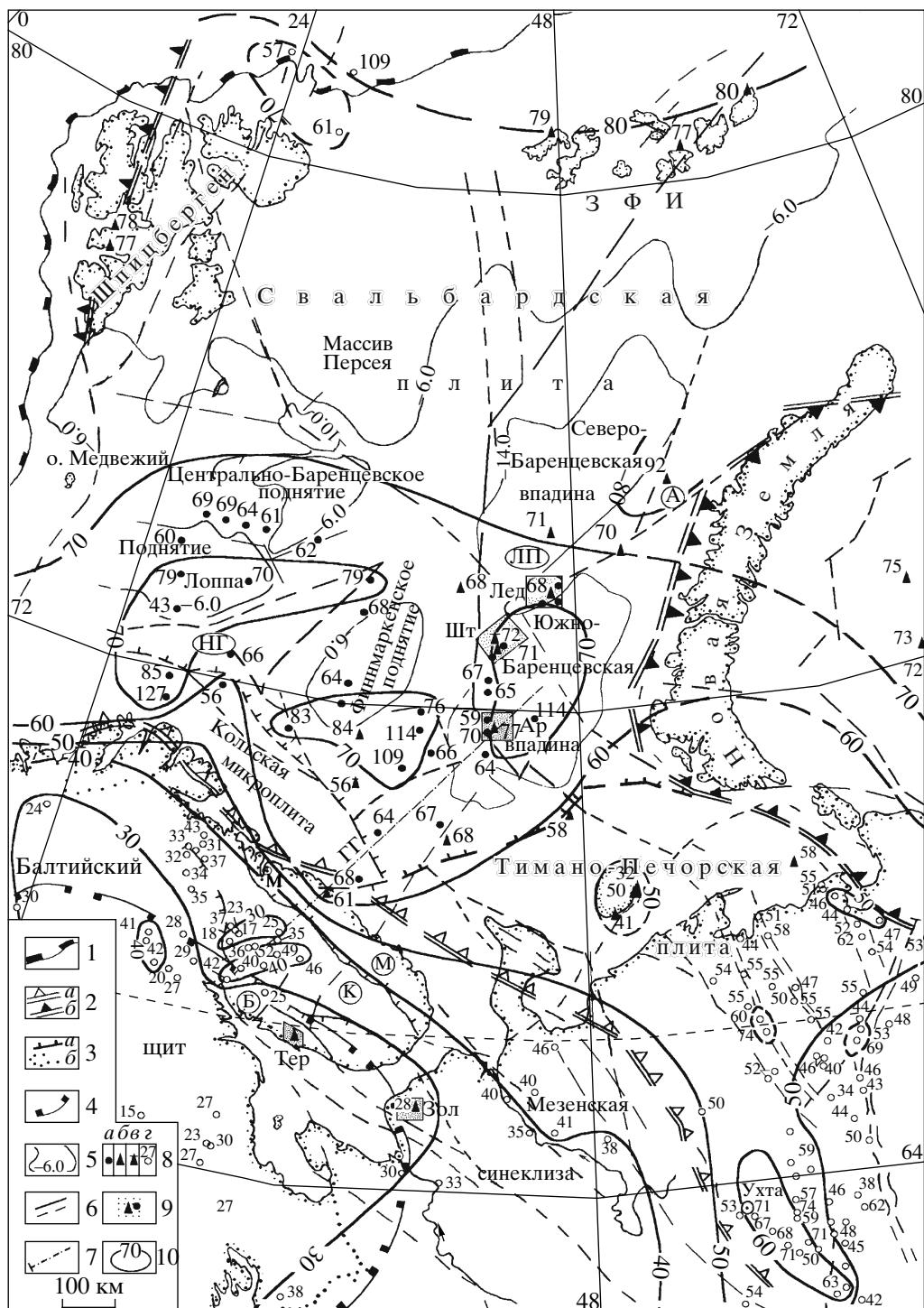
## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ КАТАГЕНЕЗА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

### *Западно-Арктический бассейн*

Начавшаяся в 80-е годы прошлого века интенсивная разведка нефтегазовых месторождений на шельфе Баренцева моря сопровождалась бурением в пределах акватории и на островах глубоких скважин, в которых проводились каротажные исследования, в том числе и термокаротаж. К этому времени относятся и первые измерения теплового потока в скважинах, пробуренных в южной части Карского моря. Обработка термических измерений позволила оценить значения градиентов температуры, а теплофизические исследования керна скважин – теплопроводность пород. Таким образом, были получены первые кондиционные измерения теплового потока в регионе [Цыбуля, Левашевич, 1992], значения которого позже были уточнены В.Г. Левашевичем [2005] (рис. 3). Однако геотермические измерения по скважинам для такой обширной территории были редки и не позволяли составить картину распределения температур и тепловых потоков, а тем более рассчитать глубинные температуры в литосфере региона.

Тем не менее обобщение имеющихся данных скважинных и зондовых измерений позволяет говорить о тенденции повышения теплового потока в северо-восточном и северо-западном направлениях. Так, в зоне сочленения Кольской микроплиты и Балтийского щита среднее значение теплового потока составляет  $54 \text{ мВт}/\text{м}^2$ , а в районах Северо-Баренцевской впадины и Центрально-Баренцевского поднятия –  $70 \text{ мВт}/\text{м}^2$ . Такую тенденцию тренда теплового потока можно объяснить приближением к Северо-Атлантическому центру спрединга, где возрастает термическая активность астеносферы. Однако полученные нами геологические данные позволяют говорить о вторичных процессах в породах коры Баренцевской плиты, омоложение которых происходит в северном направлении. Ранее уже высказывалось предположение о рифтогенной природе вторичных термических процессов на основании интерпретации геотермических данных [Подгорных, Хоторской, 1998].

Вдоль каждого из профилей, расположение которых показано на рис. 4, было проведено моделирование нестационарного теплового поля с целью расчета глубинных температур и тепловых потоков.



**Рис. 3.** Карта плотности теплового потока Баренцевоморского района и сопредельных территорий (по данным [Левашкевич, 2005]).

1–4 – границы: 1 – континентальной окраины, 2а – Восточно-Европейской платформы, 2б – Баренцево-Печорской платформы, 3а – между Сvalльбардской и Тимано-Печорской плитами, 3б – Балтийского щита, 4 – Свекофенокарельской мегаструктуры; 5 – изолинии поверхности фундамента, км; 6 – разломы и разломные зоны; 7 – линия геотермического профиля; 8 – пункты определения ТП и его значения, мВт/м<sup>2</sup>: а – в донных отложениях, б – в глубоких скважинах, в – в инженерных скважинах, г – с известными значениями ТП, выполненными ранее; 9 – район геотермических исследований в пределах локальных структур: Лед – Ледовый, Шт – Штокмановский, Ар – Арктический, Тер – Терский, Зол – Золотицкий; 10 – изолинии ТП, мВт/м<sup>2</sup>.

ЛП – Лудванская перемычка; поднятия: ЦБ – Центрально-Баренцевское, А – Адмиралтейское, Л – Лоппа, Ф – Финнмаркенское; впадины: СБ – Северно-Баренцевская, ЮБ – Южно-Баренцевская; НГ – Нордкапский грабен; мегаблоки Кольского полуострова: М – Мурманский, К – Кольский, Б – Беломорский.

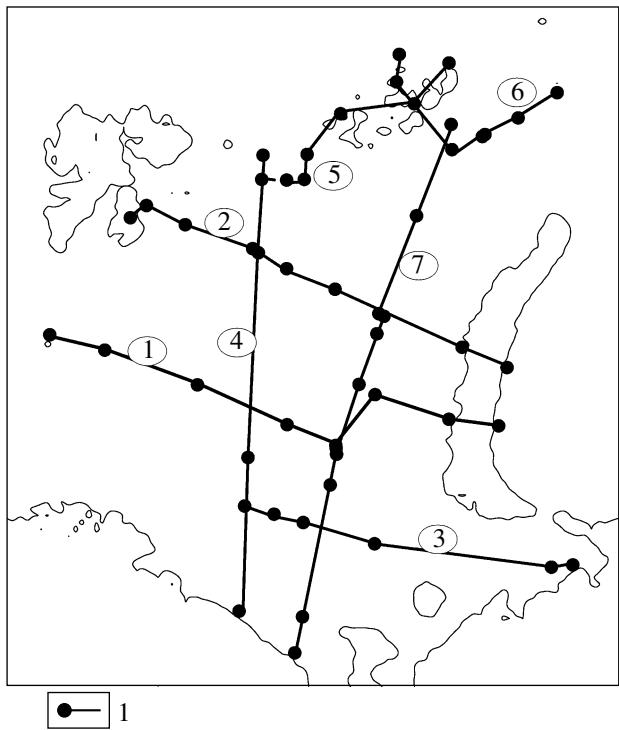


Рис. 4. Схема расположения исследованных профилей-геотраверсов.

1 – линия профиля с точками его перегиба.

Геотраверсы проходили через скважины, где проводились кондиционные определения теплового потока. Это позволило корректно задать краевые условия второго рода на нижней границе для каждого из профилей.

В Западно-Арктическом бассейне наибольшие значения геотермических градиентов наблюдаются в юго-восточной и восточной частях Баренцева моря, прилегающих к п-ову Канину, о-ву Колгуев и арх. Новая Земля, а также в Южно-Карской впадине. Это естественно вызывает появление температурных аномалий на глубинных срезах. Величина аномалий температуры относительно фоновых значений изменяется от +20°C на глубине 3 км (при фоновых температурах 90–100°C) до +40°C на глубине 5 км (при фоновых температурах 125–140°C). Однако эти аномалии связаны не столько с незначительно повышенным глубинным тепловым потоком в этом районе, сколько с относительно пониженной теплопроводностью пород разреза, т.к. в сторону континента увеличивается мощность сравнительно низкотеплопроводного гранитно-метаморфического слоя. Тем не менее юго-восточная и восточная части Баренцева моря характеризуются подъемом изотермических поверхностей, в том числе и тех, которые контролируют температурный интервал катагенетических изменений углеводородного вещества. С этим, по-видимому, связана приурочен-

ность уже открытых нефтегазовых месторождений именно к “температурному куполу” на юго-востоке и востоке моря, что хорошо иллюстрируется на рис. 1 и 2.

Мы не исключаем возможности нахождения месторождений в других частях Баренцева моря на большей глубине. Пользуясь теми же интерпретационными критериями о приуроченности месторождений к температурному интервалу процессов катагенеза, можно предположить их нахождение на глубинах 6–8 км в юго-западной и западной частях моря и на глубинах 5.5–7.0 км – в северо-западной его части. Конфигурация изотермической поверхности 140°C в Баренцевом море показана на рис. 5.

По-видимому, сходная ситуация существует и в Карском море – термический купол Южно-Карской впадины пространственно совпадает с локализацией крупнейших месторождений углеводородов – Русановским и Ленинградским (см. рис. 1).

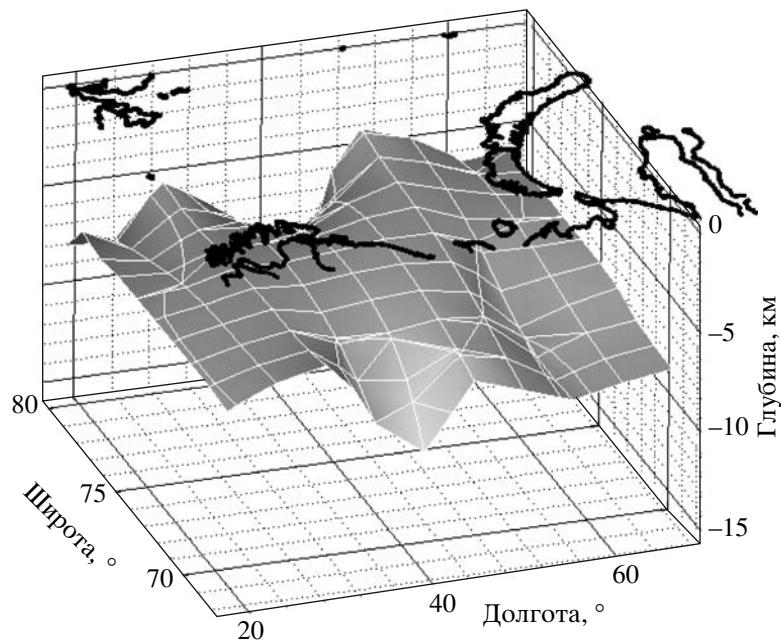
Подъем изотерм, формирующих “термический купол”, выявлен и в море Лаптевых (рис. 6). Пространственно он приурочен к району акватории между о. Столбовой и устьем р. Яны. Можно предположить, что южный сектор моря Лаптевых является наиболее перспективным регионом для проведения геологоразведочных работ на углеводородное сырье.

#### Прикаспийский бассейн

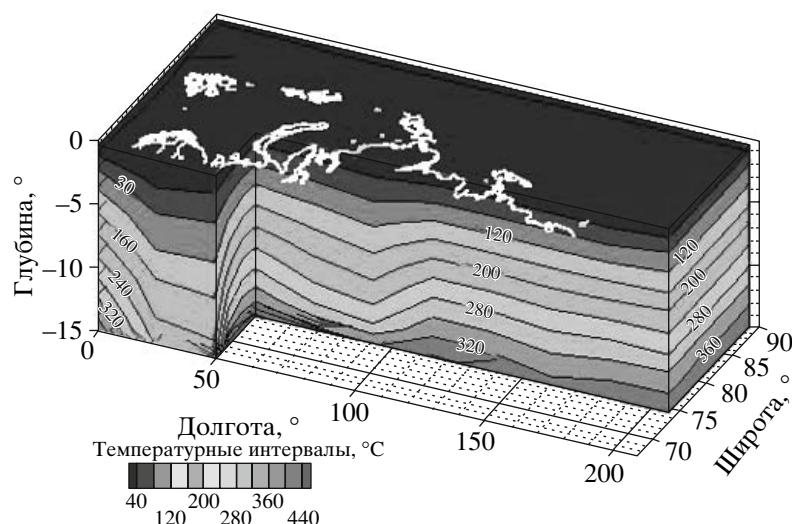
Особенностью строения осадочного чехла Прикаспийской впадины является присутствие в разрезе эвапоритов кунгурского яруса перми, имеющих форму куполов и штоков вследствие тектонической и гравитационной неустойчивости. Они представлены в основном каменной солью с редкими включениями сульфатов и прослоями разной мощности сульфатно-терригенных пород – аргиллитов, песчаников и ангидритов. Углы падения этих пород изменяются от нескольких градусов до 75°, что связано с пластическим перемещением соли из межкупольных зон в ядра соляных массивов.

Теплопроводность каменной соли очень высока. Она лежит в пределах 4.5–5.5 Вт/(м × К), значительно превышая теплопроводность вмещающих терригенных пород, которая составляет 1.6–2.0 Вт/(м × К). Такой резкий контраст теплопроводности при крутых углах наклона границ раздела сред обуславливает сильное перераспределение глубинного теплового потока. Как и другие потенциальные поля, он распространяется по пути наименьшего сопротивления, т.е. концентрируется в теле соляных куполов и разряжается в межкупольных зонах.

Таким образом, рефракция теплового потока – главная причина неоднородности теплового



**Рис. 5.** Положение изотермической поверхности 140°С в Баренцевом море.



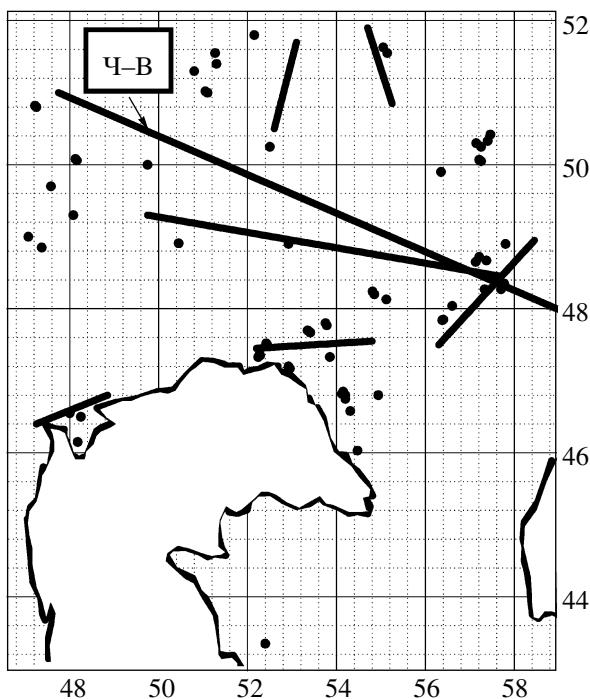
**Рис. 6.** 3D-модель распределения температур в Евразийском секторе Арктики.

поля в Прикаспийской впадине. Анализируя эмпирические данные, можно видеть, что положительные аномалии теплового потока над соляными куполами создаются в основном за счет структурно-геологических неоднородностей и присутствия "тепловодов" – толщ каменной соли. Другими возможными причинами появления аномалий являются генерация тепла за счет радиоактивного распада и экзотермических реакций, выделение тепла при трении, а также за счет тепломассопереноса при галокинезе. Как показывают количественные оценки [Хуторской и др., 2004], их

значения не превышают первых процентов от величины влияния структурно-теплофизического фактора.

Основой для построения трехмерной картины распределения температур и других геотермических параметров послужили данные о термометрии скважин, полученные как во время производственного термокаротажа, так и в ходе специальных исследований.

Основной объем фактического материала по геотермии региона был собран в период составления Геотермической карты СССР [1972]. Этот



**Рис. 7.** Расположение скважин с термометрическими данными и профилей ГСЗ (МОВ-ОГТ) в Прикаспийской впадине (“Ч-В” – профиль ГСЗ “Челкар–Волгоград”).

материал, а также данные, опубликованные позднее, явились основой для наших исследований. В результате была получена информация о температурах в 115 скважинах региона, в том числе в 16 глубоких (4 и более км).

Трехмерная интерполяция проводилась по сетке произвольной конфигурации. В нашем случае была использована неравномерная сетка, “привязанная” к координатам скважин и к простианию сейсмических профилей, вдоль которых выполнялись двухмерные расчеты глубинных температур (рис. 7). Параметры интерполяции задавались таким образом, чтобы избежать необоснованных

фактическими данными скачков глубинных температур в межскважинном и межпрофильном пространстве.

Из анализа рис. 8а видно явное повышение температуры на глубинных срезах с северо-востока на юго-запад. Так, в восточной части впадины, на границе с Мугоджарами, температуры на глубине 2 и 3 км составляют, соответственно, 40–45 и 60–65°C, а в районе Южной Эмбы и Мангышлака на тех же глубинах – 55–60 и 70–75°C. Это в первом приближении согласуется с выводом о снижении теплового потока в восточной части Прикаспийской впадины, причиной которого являются нестационарные процессы экранирования глубинного теплового потока, проявившиеся на Южном Урале и в Мугоджах [Хуторской, 1996].

Другая трехмерная температурная модель была рассчитана для интервала глубин 0–50 км, включающего всю мощность коры в Прикаспийской впадине (см. рис. 8б). Для ее построения были использованы данные о структуре и пластовых скоростях сейсмических волн вдоль профилей в пределах Прикаспийской впадины [Булин, Егоркин, 2000; Сейсмические..., 1980].

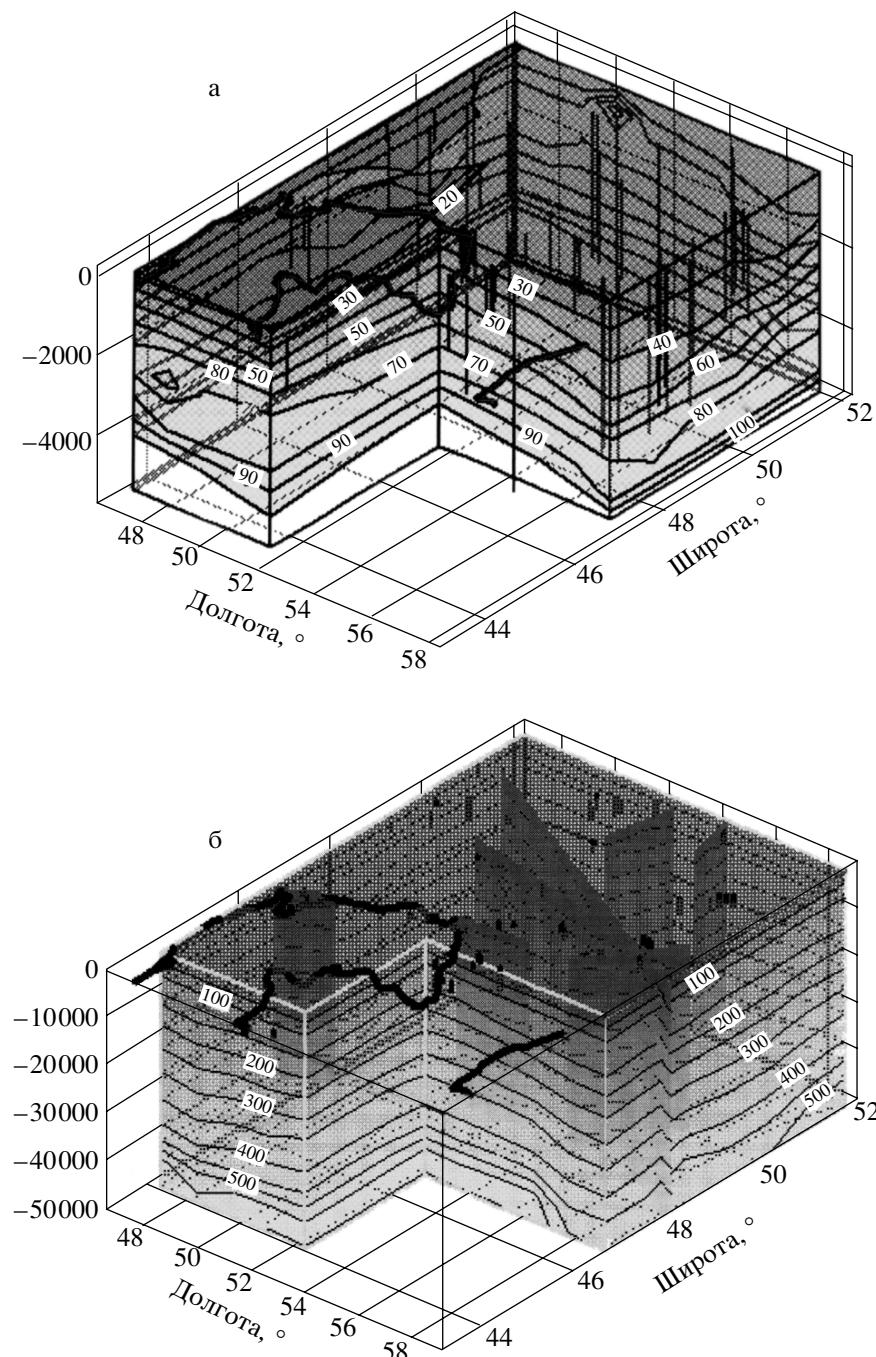
В соответствии с сейсмическим разрезом были приняты значения теплофизических свойств пород, которые использовались для расчета глубинных температур и теплового потока (таблица).

Как видно из таблицы, основными контрастными комплексами в разрезе являются соль и эклогиты, если принять, что последние действительно имеются в низах коры Центрально-Прикаспийской депрессии и ассоциируются с линзой высокоскоростных пород (7.9–8.1 км/с) мощностью до 10 км на глубинах 50–40 км.

При моделировании на нижней границе разреза задавался постоянный тепловой поток, значение которого было адекватно измеренному фоновому значению в глубоких скважинах этого региона за вычетом радиогенной теплогенерации в земной коре (см. таблицу). Этот редуцированный

#### Теплофизические параметры, принятые для моделирования геотермического поля

Структурно-формационный комплекс	Температуропроводность, $n \times 10^{-7}$ , $\text{м}^2/\text{с}$	Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \times \text{К})$	Теплогенерация, $\text{мкВт}/\text{м}^3$
Надсолевой комплекс терригенных пород	5.0	2.1	1.5
Каменная соль	12.0	5.9	0.4
Подсолевой комплекс терригенных пород	7.0	2.3	1.3
Метаморфический комплекс ( $v_{\text{тр}} = 6.6 \text{ км/с}$ )	8.0	2.5	1.5
Геофизический гранитный 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



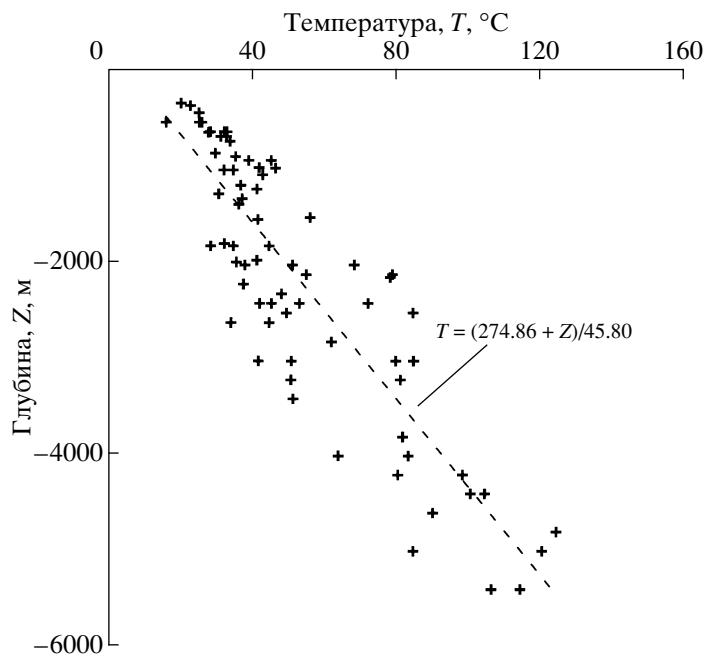
**Рис. 8.** 3D-температурные модели Прикаспийской впадины.

а – расположение скважин (вертикальные линии) и фактическое распределение температур ( $^{\circ}\text{C}$ ); б – распределения температур в земной коре.

Показано расположение скважин (вертикальные линии) и температурных разрезов вдоль профилей ГСЗ.

тепловой поток составлял 23 мВт/м<sup>2</sup>. На верхней границе задавалась постоянная температура – температура “нейтрального слоя”, которая была рассчитана из анализа зависимости температур на забое скважины от их глубины (рис. 9). Линейный фитинг данных позволил вывести формулу ре-

грессии, связывающую температуру (T) и глубину забоя (Z):  $T = (274.86 + Z)/45.80$  [Хуторской и др., 2004]. Если принять  $Z = 0$ , то  $T = 6^{\circ}\text{C}$ . С помощью регрессионной зависимости было также рассчитано значение среднего геотермического градиента в интервале глубин измерений (21.8 мК/м).



**Рис. 9.** Зависимость температуры на забое скважин от их глубины (центральная и восточная части Прикаспийской впадины).

На боковых границах в модели соблюдалось условие отсутствия латерального оттока тепла, т.е.  $\partial T / \partial x = 0$ .

Построение трехмерной матрицы температур основано на объемной интерполяции всех полученных численных данных, т.е. измерений по скважинам и расчетных данных по сейсмическим профилям. Как показало сравнение эмпирических и расчетных данных для скважин, лежащих на линии профилей, или для створов пересечений профилей, невязка в определении глубины нахождения одноименных изотерм весьма невелика. Она составляет всего  $\pm 50$  м при глубине модели до 5 км или  $\pm 150$  м при глубине модели до 50 км. Таким образом, относительная погрешность не превышает 1%.

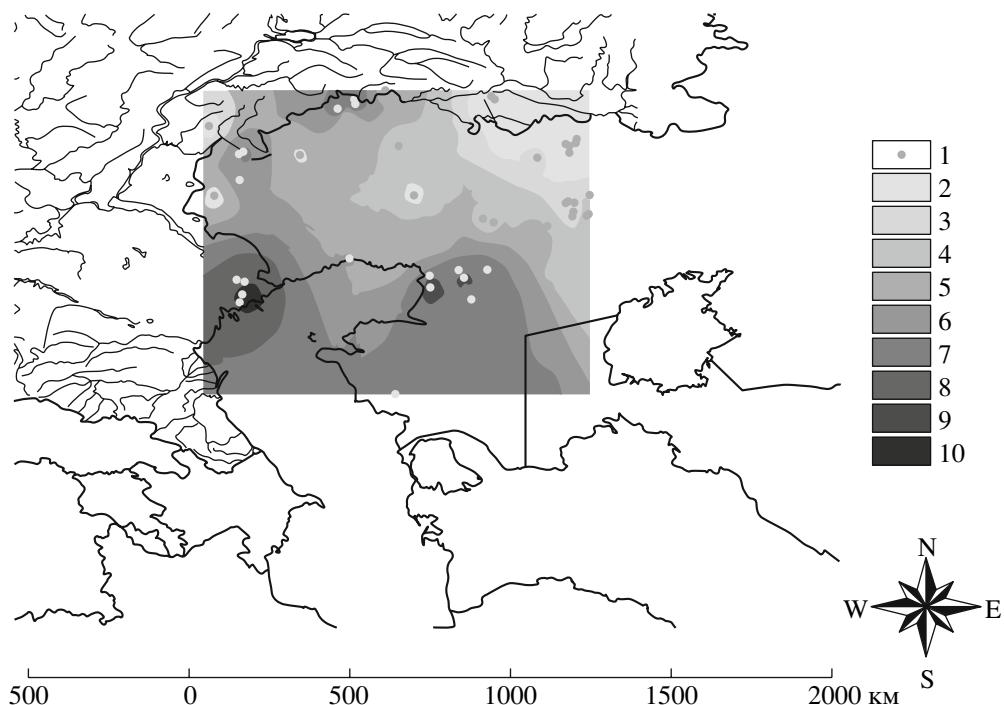
Распределение температур в земной коре до глубины 50 км имеет ту же тенденцию, что и в интервале бурения скважин, т.е. они плавно увеличиваются в юго-западном направлении (см. рис. 8б). В восточной части впадины, на границе М температура составляет  $400^{\circ}\text{C}$ , т.е. такая же, как и под складчатыми сооружениями Южного Урала и Мугоджар [Хоторской, 1996], а в Центрально-Прикаспийской депрессии, и особенно в районе Южной Эмбы, на границе М температура достигает  $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$ .

От меридиана Мугоджар в западном направлении изотермы, поднимаясь, образуют купол, вершина которого приурочена к районам Южной Эмбы, сопа Мертвый Култук и Северного Манышлака. Другой “термический купол” зафиксирован

в районе Астраханского свода (рис. 10). Заметим, что отмеченная нами пространственная корреляция температурных куполов и зон промышленной нефтегазоносности в Печорском бассейне Баренцева моря и в Южно-Карской впадине проявляется и в данном случае, т.к. названные районы России и Республики Казахстан – это районы интенсивной добычи углеводородного сырья.

В целом, анализируя картину распределения геотермического поля в Прикаспийской впадине, можно утверждать, что все вариации температур, геотермических градиентов и плотности теплового потока в пределах региона обусловлены только перераспределением глубинного потока тепла в условиях контрастной теплопроводности. Наиболее резкие искажения теплового потока возникают на контакте каменной соли и вмещающих терригенных пород и на контакте эклогитов и смежных пород нижней коры. Исключение, по-видимому, можно сделать только для зоны соединения восточной части Прикаспийской впадины и Мугоджар, где глубинные шарьяжи складчатого пояса создают зоны пониженного теплового потока, проявляющиеся и в соседних частях осадочного бассейна.

Как видно из рис. 9, во всех скважинах глубиной 1.0–1.5 км, пробуренных в надсолевом комплексе или в межкупольных зонах, градиент температуры повышен, что обусловлено низкой теплопроводностью терригенных пород. В скважинах



**Рис. 10.** Температурный термотомографический срез на глубине 1000 м в Прикаспийской впадине.  
1 – скважины; 2–10 – температуры, °С: 2 – 20–24, 3 – 24–27, 4 – 27–30, 5 – 30–34, 6 – 34–37, 7 – 37–40, 8 – 40–44, 9 – 44–47, 10 – 47–50.

более глубокого заложения, достигших толщи эвапоритов, средний градиент заметно меньше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Геотермическое поле изометричных или мозаичных областей может быть корректно отражено только в трехмерной геометрии; этот способ предоставляет возможность оценить изменения теплового поля как по латерали, так и по глубине.

2. Температурные аномалии и аномалии теплового потока формируются за счет неравномерного распределения тепловых источников, а также за счет структурно-теплофизических неоднородностей, обусловленных литолого-фациальным и тектоническим факторами.

3. Термотомографический анализ нефтегазоносных бассейнов показал, что промышленные скопления углеводородного сырья локализуются над зонами подъема изотерм, над “термическими куполами”, которые впервые выделены с помощью 3D-моделирования геотермического поля в Баренцевом и Карском морях, в районе Южной Эмбы, на севере Туранской плиты, на Мангышлаке и на Астраханском своде. В связи с этим появление “термического купола” в южной части моря Лаптевых позволяет дать прогноз потенциальной нефтегазоносности этой акватории шельфа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 08-05-00012 и ФЦП Минобрнауки РФ “Развитие научного потенциала высшей школы”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Булин Н.К., Егоркин А.В. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М.: ГЕОН, 2000. 194 с.

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

Левашевич В.Г. Закономерности распределения геотермического поля окраин Восточно-Европейской платформы (Баренцевоморский и Белорусско-Прибалтийский регионы) / Автореф. дисс. ... доктора геол.-мин. наук М.: МГУ, 2005. 44 с.

Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Термическая эволюция литосферы зоны сочленения Балтийского щита и Баренцевоморской плиты // Изв. РАН. Физика Земли. 1998. № 3. С. 56–65.

Подгорных Л.В., Хуторской М.Д., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. Трехмерная геотермическая модель Карского шельфа и прогноз нефтегазоносности // ДАН. 2001. Т. 380. № 2. С. 333–338.

Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. М.: Наука, 1980. 183 с.

*Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.И.* Тепловой режим и радиоактивность Земли. Л.: Недра, 1979. 191 с.

*Хуторской М.Д.* Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. М.: Изд-во РУДН, 1996. 289 с.

*Хуторской М.Д., Подгорных Л.В.* Объемная модель геотермического поля Баренцевоморского региона // ДАН. 2001. Т. 377. № 1. С. 265–269.

*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., Антипов М.П., Волож Ю.А., Поляк Б.Г.* Температурное поле и трехмерная геотермическая модель Прикаспийской впадины // Геотектоника. 2004. № 1. С. 63–73.

*Цыбуля Л.А., Левашкевич В.Г.* Тепловое поле Баренцевоморского региона. Апатиты, 1992. 114 с.

Сдано в набор 19.03.2008 г.

Подписано к печати 15.05.2008 г.

Формат бумаги 60 × 88<sup>1</sup>/<sub>8</sub>

Цифровая печать

Усл. печ. л. 14.5

Усл. кр.-отт. 2.7 тыс.

Уч.-изд. л. 14.5

Бум. л. 7.25

Тираж 189 экз.

Зак. 376

Учредители: Российская академия наук,  
Геологический институт РАН

Изатель: Академиздатцентр “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90

Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерperiодика”

Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6