

ДИСТАНЦИОННОЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Рассматривается технология тепловизионного зондирования Земли на основе космических и авиационных данных с использованием новой методики обработки снимков и дешифрирования геоинформационных аномалий теплового поля.

Ключевые слова: тепловизионное зондирование, тепловой поток, геологическая среда, снимок, аномалия.

1. Введение

Предлагается технология дистанционного тепловизионного зондирования Земли, которая основана на обработке космических и авиационных снимков в инфракрасном диапазоне, что позволяет рассчитать объемную модель теплового излучения среды для решения геологических (изучение глубинного строения Земли, поиск нефти, газа и подземных вод), техногенных и экологических задач. Существенная новизна метода состоит в получении непрерывной картины распределения тепловых характеристик поля. Снимки являются полноценным источником информации для проведения всестороннего анализа и построения моделей, принятия решения при изучении природных ресурсов Земли. Используя фактически только данные дистанционного зондирования на предварительно неизученную территорию (лицензионный блок) можно оперативно дать прогноз наличия потенциальных ресурсов углеводородов (УВ) или других полезных ископаемых. По существу это один из геофизических методов, который обладает рядом преимуществ: относительная дешевизна при анализе больших территорий, высокая производительность и информативность, независимость от рельефа и условий местности, экологическая чистота.

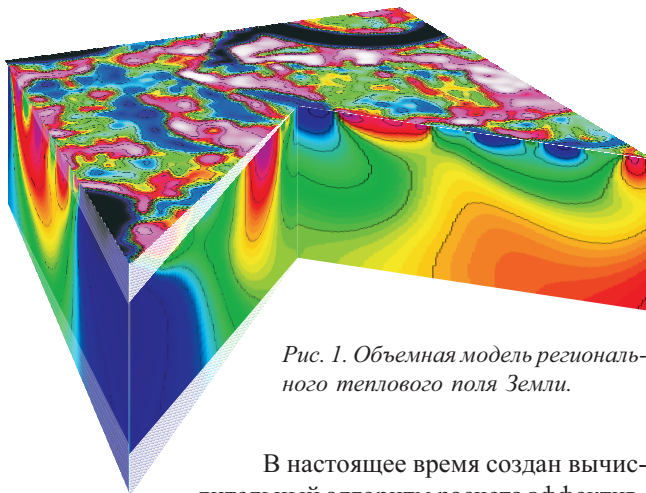


Рис. 1. Объемная модель регионального теплового поля Земли.

В настоящее время создан вычислительный алгоритм расчета эффективной плотности потока теплового излучения на заданных глубинах, программно-методический комплекс, отличающийся быстродействием и высокой формализацией решения, получил развитие метод тепловизионной генерализации для решения геологических задач в различных условиях Волго-Уральского и Сибирского регионов.

2. Дистанционное тепловизионное зондирование среды

В основу технологии положено дистанционное непрерывное зондирование Земли с получением разновременных космических и разновысотных авиационных снимков теплового излучения в инфракрасной области электромагнитного спектра (8 – 14 мкм). В качестве исходных данных для проведения исследований используются космические снимки со спутников «Landsat-7», «Landsat-5», «Terra» изображения с дирижабельных и вертолетных комплексов высокого разрешения, имеющие обширный спектр сфер применения.

Метод математического моделирования используется для вычисления по тепловому полю (ТП) поверхности Земли эффективной плотности потока теплового излучения (суммарной энергетической яркости излучающего тела) на заданных глубинах. При этом происходит осреднение контуров неоднородностей при повышении точности оценок их усредненных температурных характеристик. Практически реализован эффект непрерывного зондирования и выявления в объеме аномалий по величине плотности потока теплового излучения Земли. Тепловое (или температурное) излучение представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое веществом, и возникающее за счет его внутренней энергии. Аномальные характеристики получают с использованием генерализирующей функции, на основе отображения вклада теплового излучения элементов среды в результирующее излучение элемента поверхности δ . В этом случае имеет место фундаментальное соотношение $\delta/\Delta T_p = \text{const}$, где δ – элемент пространственного разрешения, ΔT_p – эквивалент шумовой радиационной температуры аппаратуры, $l=2,5 \div 2,72$ (Мухамедяров, 2002). Это ведет к ухудшению пространственного разрешения температурной чувствительности, а параметры модели определяют глубину проникновения. Тепловизионная съемка привязана к радиометрической температу-

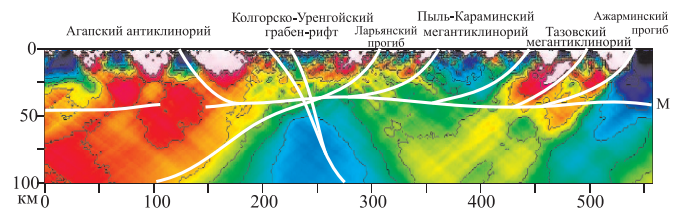


Рис. 2. Модель регионального теплового поля по геотраверсу в пределах Западно-Сибирской плиты (данные MODIS «Terra»).

ре $T_{PB} = \sqrt[4]{\varepsilon T_{TB}}$, где ε – излучательная способность объекта поиска, T_{TB} – термодинамическая температура, $\delta^2 \times (1, 4, 9, 16, 25$ и др.) определяют эффективную глубину при моделировании.

3. Методика обработки снимков и представление данных

В качестве исходных данных для обработки используется тепловизионное изображение, представленное множеством значений теплового поля, каждый элемент которого несет в себе информацию о собственной излучательной способности земной поверхности, измеряемой в Вт/(м²·ср·мкм). Такое множество назовем слоем проникновения и обозначим $L_n, n = \overline{0, N}$, где n – номер слоя проникновения.

Необходимо отметить, что исходное тепловизионное изображение уже обладает определенной проникающей способностью вглубь Земли. Оно представляет собой первый слой проникновения (L_1) и составляет $h_1 = 30$ м (ЕТМ+), 60 м (ТМ) и 500 м (MODIS). За нулевой слой проникновения (L_0) принимаем изображение видимого диапазона электромагнитных волн, отвечающее солнечному излучению, которое отражено от земной поверхности. Для оценки глубины проникновения h_n на уровне слоя n используется следующее соотношение (Мухамедяров, 2002):

$$h_n = \frac{H^2}{h_T + H} \left(\frac{n\delta_{\text{угл}}}{2} + \frac{n^2\delta_{\text{угл}}^2}{4} \right),$$

где h_T – предполагаемое расстояние от объекта исследования до земной поверхности; H – расстояние от датчика съемочной аппаратуры до земной поверхности; $\delta_{\text{угл}}$ – угловое пространственное разрешение аппаратуры.

Глубины проникновения по слоям для космических снимков представлены в таблице. Объемная модель теплового поля описывается следующим уравнением: $L_n = G(L_1, n)$, где n – номер горизонтального слоя, который необходимо получить; L_n – n -ый слой; $G(L_1, n)$ – некоторая функция, зависящая от исходного слоя L_1 и требуемого уровня проникновения.

При построении модели могут использоваться функции, вычисляющие среднее арифметическое, среднее гармоническое и распределение теплового поля по закону Гаусса. Применяя функцию среднего арифметического

$$G(L_1, n) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n L_1(i, j)}{n^2} \quad \text{можно получить наиболее точную картину глубинного строения среды.}$$

Структура теплового поля, рассчитанная с использованием функции распределения Гаусса, приводит к сглаживанию объектов в пространстве, глубина проникновения отвечает логарифмическому закону, а как следствие – снижение чувствительности метода к изменению глубинных аномалий.

| Спутник (прибор) | Номер слоя, $n...$ | | | | | | |
|--------------------|--------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | 1 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 |
| «Terra» (MODIS) | 500 | 1500 | 2500 | 5000 | 10000 | 15000 | 25000 |
| «Landsat-5» (ТМ) | 60 | 180 | 300 | 600 | 1200 | 1800 | 3000 |
| «Landsat-7» (ЕТМ+) | 30 | 90 | 150 | 300 | 600 | 900 | 1500 |

Табл. Глубина проникновения по слоям (в метрах).

В процессе обработки по алгоритму эквипотенциальной термометрии (Гонсалес, 2005) последовательно вычисляются слои $L_n, n = \overline{2, N}$ и выстраивают трехмерный образ теплового поля. При этом шаг глубинной дискретизации зависит от характеристик аппаратуры, которой получены исходные данные, выбора функции G и ее параметров.

Для наглядного представления результатов обработки строят карты-срезы на определенных глубинах и вертикальные разрезы в рамках горизонтально-слоистых и/или градиентных сред, по которым устанавливается общая схема тепловых потоков, основные их направления и неоднородности (Рис. 1).

Технология дешифрирования материалов зондирования нацелена на выявление следующих факторов: селективного отображения блоково-морфоструктурного строения (геодинамических блоков и граничных разрывов); внутренних термодинамических неоднородностей блоков; зон сжатия, растяжения и разуплотнения пород с улучшенными коллекторскими свойствами, в состав которых входят зоны флюидоперетоков и флюидонакопления (Каримов, 2007). Выявляемые в разрезе геотермические аномалии, как правило, позволяют формализовать их в реальные модели сред, так как температурный режим пород (ниже нейтрального слоя) определяется восходящим эндогенным тепловым потоком, динамикой геологической среды и тепловыми свойствами пород (Рис. 2). К поверхности тепло передается через горные породы посредством кондуктивной (молекулярной) теплопроводности, конвекцией флюидов и излучением.

Для геофизической интерпретации к данным применяют различные фильтры. Например, использование «максимизирующего» фильтра позволяет контрастировать термодинамические аномалии и выявлять зоны разуплотнения среды. При интерпретации вертикальных моделей используют дифференциальные трансформации, характеризующие градиент изменения и скорость эндогенного потока теплового излучения. По ним дешифрируются геотермические этажи и крупные разрывные нарушения.

При изучении детального строения осадочного чехла рассчитывается локальное тепловое поле. В качестве функции тренда при построении используют сферические (шаровые) функции, отвечающие региональным или локальным поверхностям относимости. В этом случае остатки между наблюдаемыми и вычисленными (прогнозируемыми) значениями аномалий, можно интерпретировать как проявления возмущений, порожденных изменением состояния (плотности) геологических тел.

Через структуру теплового поля и ее геодинамическую интерпретацию с привлечением априорных геологических данных можно определить форму и механизм тепловых потоков, слоистость среды, возможности накопления и сохранность глубинных флюидов (в частности углеводородов).

4. Геотермические модели Токмовского и Жигулевско-Пугачевского сводов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции

На рисунке 3 показана центральная часть Токмовского свода, которая характеризуется резко выраженной гетерогенностью со сложным пространственным распределением интенсивно расслоенных по различным направ-

лениям и тепловой прозрачностью зон, дискретности и штриховатости среды. Свод обладает высокой плотностью потока теплового излучения (красный цвет), который разделен относительно холодными врезами, насыщенными низкотемпературным флюидом.

Континентальная земная кора региона по своей природе неоднородна и зональность основных структурно-формационных зон отчетливо проявляется в тепловом поле. Ее неоднородности обусловлены чередованием блоков, испытавших последующую тектоно-магматическую активизацию с образованием рассланцованных, раздробленных структурно-формационных зон, которые являются по существу подвижными поясами. Границы геоблоков поэтому ступенчатые, нерезкие. Подошва верхней части консолидированной коры выделяется на глубинах до 10 – 12 км. Граница Мохоровичича фиксируется на 37 – 47 км. Участки яркого проявления инверсионного слоя на глубинах от 15 км до 24 км.

В пределах модели прослеживаются вертикальные и листрические зоны разуплотнения среды (геодинамически активные зоны флюидоперетоков и флюидонакопления), отражающиеся в тепловом поле в виде интенсивных линейных отрицательных аномалий. Крутопадающие разломы располагаются в основном в верхней части разреза, а пологие (по своей сути это листрические) разломы, постепенно выполаживающиеся и рассеивающиеся в земной коре, сохраняют следы латерального сдвига и шарьирования блоков фундамента.

На рисунке 4 приведен глубинный разрез северного склона Жигулевско-Пугачевского свода. Строение земной коры представляется валобразными структурными зонами, которые трансформируются в блоки и гряды различного простирания. Геотермические горизонты имеют закономерное чередование низко- и высокотемпературных слоев, которые представляют собой клинообразные формы. Они отождествляются с аллохтонными литопластинами, содержащими в промежутке серпентинитовую смазку, по которой происходили латеральные смещения крупных блоков коры. Зона скольжения характеризуется пологим падением. При этом прослеживаемый относительно холодный горизонт (синий цвет) имеет сложную конфигурацию, часто бывает очень отчетливым, но проявляется не везде.

Образование слоев может быть описано механизмом вклинивания, согласно которому их зарождение и развитие происходит на границе реологического слоя путем расщепления вдоль пластичного горизонта (низкотемпературного с конвективным теплопереносом) и внедрения в него жестких пластин (высокотемпературных с кондуктивным теплопереносом). Разрывные деформации, секущие выше лежащие отложения, на глубине затухают и рассеиваются. В этих условиях движущиеся пластины не прорываются к дневной поверхности, а, по-видимому, перемещаются в ограниченном интервале, образуя аллохтонные клинья.

Анализ строения и формирования клиновидных надвигов позволяет рассматривать многие из них как высокоперспективные для нефтепоисковых работ. Область формирования известных месторождений смещена относительно осевой линии глубинного вала, совпадает с зонами надвигов геоблоков, контролируемых разломной тектоникой, способствующей эффективной миграции флюидов.

5. Методика дешифрирования материалов при нефтепоисковых работах

В результате обработки строят с разным пространственным разрешением карты-срезы и модели регионального и локального теплового поля, дифференциальные характеристики плотности потока теплового излучения, разрезы блоково-разрывных (разломных) структур в теневом отображении. При этом решают следующие задачи: районирование по интенсивности теплового поля геологических объектов; построение геотермических отражающих границ по глубинам; определение природы аномалии образующих объектов; изучение флюидодинамических условий с целью выявления нефтегазоперспективных ситуаций.

Формальными критериями выделения неоднородностей геотермического поля могут быть их размеры, форма, контрастность, положение осей аномалий, линии и плоскости, по которым происходит смещение осей аномалий, характер рисунка исходного поля и его производных.

Принятая форма представления материала позволяет обеспечить систематизацию разрывных нарушений и районирования территории исследований по характеру их пространственного распределения. На таких моделях выделяются области стационарного расчетного параметра и разделяющие их градиентные зоны, вычисленные по высокочастотной составляющей поля. Последняя процедура чаще всего отражает положение в разрезе глубинных шовных зон, границ блоков коры, отдельных разрывных нарушений (Рис. 5). В ходе дешифрирования выделяются видеотоновые особенности изображений, опосредовано характеризующие разрывную и блоковую тектонику. В этой системе роль базовой информации, определяющей основные черты результирующего разреза коры, играют градиентные модели. Структуры сжатия и растяжения различаются по качественным показателям – интенсивности ТП и плановым положением линий градиента для характерных глубин (Рис. 6). Максимальная величина ТП связана с увеличением плотности горных пород и характеризуется кондуктивным теплопереносом.

Многочисленными исследованиями, проведенными в различных регионах, установлены признаки условий для накопления УВ в осадочном чехле: особенности строения регионального и локального тепловых полей, планового изменения интенсивности холодных локальных зон, особенности формирования глубинных структур, характеристика блоково-разрывной тектоники (с ранжированием оперяющих разломов на геодинамические активные зоны флюидоперетоков и флюидонакопления).

В качестве термодинамических критериев выделения перспективных зон служат: расположение объектов вблизи восходящих линейных тепловых потоков, но вне геотермических холмов, где сохранность покрышек маловероятна; наличие асимметричных «козырьков» на моделях теплового поля в интервалах потенциально нефтегазоносных глубин; ситуация встречного направления отрицательных и положительных векторов теплового потока; резкие латеральные отклонения тепловых потоков от вертикального направления, связанные с геологическими объектами; расположение объектов вне геотермических ям и отрицательных линейных потоков; относительно более высокое гипсометрическое положение прогнозируемого объекта.

Наиболее интересный геологический результат состо-

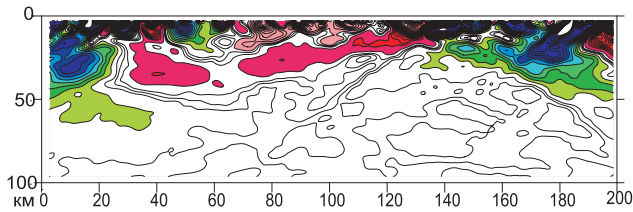


Рис. 3. Модель изменения потока теплового излучения литосферы Токмовского свода.

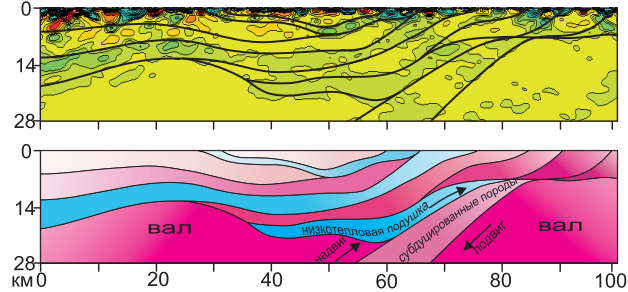


Рис. 4. Модель изменения потока теплового излучения земной коры Жигулевско-Пугачевского свода.

ит в выделении относительно низкотемпературных аномалий и их градиентных зон осадочного чехла (Рис. 7, 8). На рисунках физическая среда представляется в виде моделей с конфигурацией контрастного изменения скорости потока теплового излучения. Поэтому о крупных и разнотипных структурах можно косвенно судить по очень высокой и/или низкой скорости изменения поля. Однородные по морфологии блоки окрашены равномерно, с незначительным увеличением или уменьшением цвета. Некоторое различие поля внутри объекта в виде локальных тел указывает на сильную расслоенность, т.е. изменчивость внутренней конструкции среды.

Характеристика блоково-разрывной тектоники. Она позволяет установить линейно ориентированные (гряды, разломы) и кольцевые структуры осадочного чехла, глубинные валообразные формы геоблоков. В линейных зонах, обусловленных разломами и трещиноватостью среды как субвертикального простирания, так и субгоризонтального расслоения, несомненно, ведущая роль принадлежит конвективным потокам. Увеличение объема открытой трещиноватости будет происходить не по всей толще, а по горизонтам, имеющим наименьшие прочностные характеристики. По глубинным зонам разломов тепло распространяется наклонно вверх в виде флюидногазовых эманий. Исходя из схемы дешифрирования, блоково-разрывная тектоника контролирует расположение благоприятных участков. В разломах, которые распространяются с больших глубин и состоят из повсеместно иерархически соподчиненных систем с затуханием до нефтеперспективных стратиграфических горизонтов чехла, формируются благоприятные условия для скопления УВ (Рис. 7). В этом случае, возникают геологические ситуации, при которых опережающие разломы либо сходятся в пространстве, обуславливая систему сжатия геоблоков, либо расходятся, создавая зону растяжения (разуплотнения блоков пород). А в разломах, имеющих региональный характер распространения и пронизывающих толщи фундамента и осадочного чехла, формирование ловушек УВ маловероятно из-за нарушения целостности среды.

Формирование локальных тепловых полей. На картах теплового поля с помощью цветовой раскраски выделя-

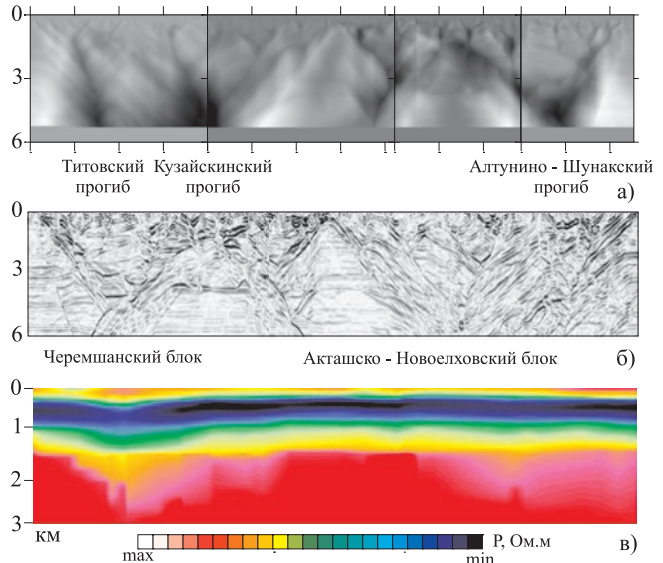


Рис. 5. Результат сопоставления блоково-разломных структур в тепловом отображении (а,б) и электропроводности МТЗ по разрезу Южно-Татарского свода (в).

ются различные по интенсивности горячие и холодные зоны, которые в ряде случаев можно дешифрировать как структурные формы поднятий и опусканий (Рис. 8). В местах интенсивных положительных тепловых аномалий, разделенных между собой холодной зоной, происходит образования зоны растяжения с уступообразными участками и слабым градиентом поля. Плановое изменение поля и графики наглядно обрисовывают эти явления. В местах расположения интенсивных холодных участков условия нефтенакопления отсутствуют в силу активной циркуляции флюидов. Относительно приподнятые блоки (благоприятные для накопления УВ) непосредственно прилегают к зонам флюидоперетоков. На основе применения данного подхода наиболее перспективные участки могут быть околтурены для дальнейшего опоискования сейсморазведкой.

Изменение интенсивности холодных локальных зон. Из рассмотрения карт-срезов в интервале заданных глубин следует обращать внимание на форму в плане и интенсивность аномальных холодных участков. Они встречаются по форме двух видов – изометричной и линейно-вытянутой. Устанавлива-

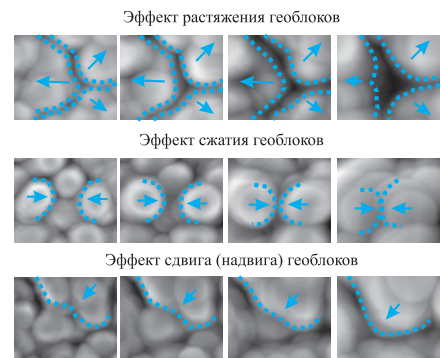


Рис. 6. Структурные схемы отображения блоков и граничных разрывов осадочного чехла и фундамента в тепловом поле.

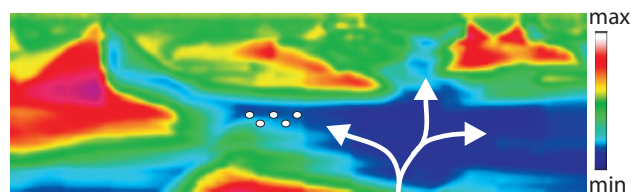


Рис. 7. Формирование блоково-разрывной тектоники в благоприятных условиях флюидонакопления (шкала – интенсивность изменения плотности пород).

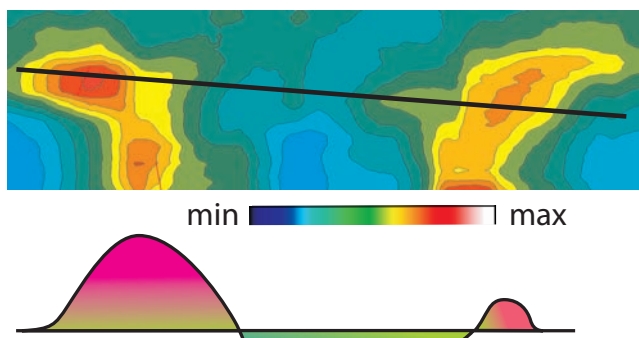


Рис. 8. Изменение локального теплового поля осадочного чехла при ранжировании объектов по относительной перспективности на залежи углеводородов (в единицах $Вт/(м^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})$).

ется некоторая закономерность в формировании перспективных объектов и линейно-вытянутых структур пониженного теплового поля, отражающая водонефтяной контакт. По мере убывания интенсивности поля происходит сужение зоны, на склоне которой появляются перспективные участки на УВ при наличии прочих благоприятных условий.

Районирование участка с благоприятной обстановкой для нефтенакопления. В соответствии с характером изменения теплового поля можно проводить ранжирование объектов на четыре типа: высоко перспективные; перспективные; перспективы неясны; бесперспективные. Структурные зоны первой и второй категорий пространственно совпадают с геотермическими седловинами (участками с неопределенным направлением и малым градиентом векторов теплового излучения в местах сочленения положительных и отрицательных линейных тепловых потоков) и возможно в пределах геотермических террас. Они отвечают всем признакам формирования условий для флю-

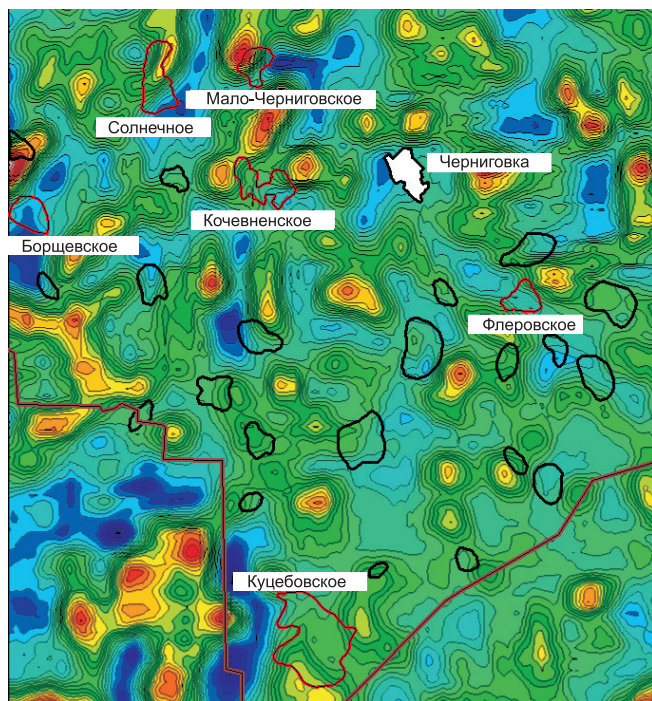


Рис. 9. Карта-срез локального теплового поля на глубине 2 км по данным «Landsat-7». Контурсы нефтеперспективных структур для проведения поискового бурения (черным цветом) и разрабатываемые месторождения (красным цветом).

идонакопления. Структуры третьей категории (условно можно отнести к малоперспективным участкам) находятся в зонах высокого градиента теплового поля и не отвечают двум и более признакам формирования УВ. Структурные зоны четвертой категории совпадают с геотермическим штоком (однородным, не дифференцированным участком относительно теплового потока) или с геотермической ямой (участком, в котором сходятся отрицательные тепловые векторы, «отрицательная» часть геотермических структур).

На рисунке 9 приведен пример регионального районирования осадочного чехла при поисках нефти на южном погружении Бузулукской впадины (Самарская область). Динамика тепловой картины локального поля в совокупности с ранее установленными нефтегазоносными месторождениями и структурами, подготовленными к бурению, наглядно подтверждает выше описанную методику интерпретации. В частности, все перспективные объекты располагаются в переходных зонах теплового поля, которые связаны с разломной тектоникой, способствующей эффективной миграции флюидов.

Литература

Мухамедяров Р.Д. Метод видеотепловизионной генерализации и его аэрокосмическое аппаратное освещение. *Интервал*. № 9 (44). 2002. 59-62.

Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. М.: Техносфера. 2005.

Каримов К.М., Мухамедяров Р.Д., Онегов В.Л., Кокутин С.Н. Дистанционное видеотепловизионное зондирование при нефтепоисковых работах на Токмовском и Жигулевско-Пугачевском сводах. Тезисы в кн. «Актуальные проблемы поздней стадии освоения нефтегазодобывающих регионов». Казань. ФЭН. 2008. 226-230.

K.M.Karimov, V.L.Onegov, S.N.Kokutin, V.N.Sokolov, V.F.Vasev. **Remote thermal image sensing of the earth in geological exploration.**

This paper reviews the technology of thermal image sensing of the Earth based on aerospace data and using a new technique of image processing and interpretation of thermal geoinformation anomalies.

Key words: thermal image sensing, thermal flux, geological environment, image, anomaly, model.

Камиль Мидхатович Каримов

директор по науке. Доктор геолого-минералогических наук, академик РАЕН. Область научных интересов – геофизика, геотектоника.

Вадим Леонидович Онегов

ведущий научный сотрудник. Область научных интересов – математическое моделирование геофизических полей.

Сергей Николаевич Кокутин

ведущий научный сотрудник. Область научных интересов – приборы и методы дистанционного зондирования Земли.

Валерий Федорович Васев

директор. Область научных интересов – разработка авиационных технологий контроля окружающей среды.

Владимир Николаевич Соколов

генеральный директор. Область научных интересов – разработка авиационных технологий контроля окружающей среды.

ООО «ТРАНС-СЕРВИС»

187110, Ленинградская обл., г. Кириши, ул. Волховская набережная, 18. Тел.(факс): (843) 567-53-63.