

ЛОКАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И ВАРИАЦИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

А.Г.Гаврилов, Г.Г.Куштанова, М.Н.Овчинников

КФУ, Институт физики г. Казань, agavrilov05@mail.ru

Аннотация.

Рассматриваются вопросы вариаций тепловых потоков, связанных с наличием в литосфере локальных геологических структур с теплофизическими свойствами, отличными от аналогичных параметров вмещающих пород. Приводятся модели, результаты расчетов температурных полей и тепловых потоков. Обсуждаются проблемы идентификации размеров неоднородностей по значениям вариаций тепловых потоков.

Введение.

Тепловые потоки играют значительную роль в генерации и миграции углеводородов, а их аномалии могут служить важным источником информации о процессах в недрах земли. Решение многих задач в этой области требует знания невозмущенного геотермического поля, соответственно необходимо иметь представление о факторах, вызывающих его вариации в пределах одного месторождения.

Об аномалиях тепловых полей над соляными куполами по экспериментальным данным известно давно. В 60-е годы 20 века были выполнены первые расчеты температурных полей для простейших геометрических тел в двумерном приближении (Джоунз, Оксбург, 1982; Череменин, 1972) [1, 2]. Последующее развитие вычислительной техники позволило перейти к решению трехмерных задач для структур любой геометрической формы. Подобные исследования позволяют ответить на вопрос: в какой степени возмущение теплового поля вызвано геометрическими факторами и есть ли необходимость привлекать другие механизмы для объяснения подобного распределения?

Рассмотрим следующую модель. В первом приближении будем считать, что приповерхностная толща земной коры имеет слоистую структуру. Распределение температуры в ней описывается стационарным уравнением теплопроводности с граничными условиями: на верхней границе – постоянная температура, соответствующая температуре нейтрального слоя, на нижней – постоянный тепловой поток и, чтобы исключить влияние других факторов, на боковой границе, – невозмущенное геотермическое распределение, соответствующее плоско-параллельному залеганию слоев. Получим систему:

$$\operatorname{div}(\lambda(x, y, z) \operatorname{grad} T) = 0, \quad 0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad 0 < z < L_z, \quad (1)$$

$$z = 0, \quad T = T_H = \text{const},$$

$$z = L_z, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = q_0,$$

$$x = 0, L_x; \quad y = 0, L_y, \quad T = T_\Gamma,$$

$$\text{на } S_i \quad [T] = 0, \quad [\lambda \operatorname{grad} T] = 0$$

где T_H – температура нейтрального слоя, T_Γ – невозмущенное геотермическое распределение температур, q_0 – постоянный тепловой поток, $\lambda(x, y, z)$ – коэффициент теплопроводности, S_i – поверхности раздела слоев, скобки $[]$ – скачок.

Результаты численных расчетов.

Рассмотрим расчет ряда модельных примеров [3]. Во всех примерах разрез имеет трехслойное строение с теплопроводностью среднего слоя в 3 раза (если не оговорено иное) выше теплопроводности окружающих слоев и равной 7,2 Вт/м К. Теплофизические свойства нижнего и верхнего слоев, не снижая общности, можно полагать равными 2,3 Вт/м К. Фоновый тепловой поток равен 0.046 Вт/м². Подобное строение можно трактовать как включение соляного пласта в породы с более низкой теплопроводностью, например, верхний пласт сложен терригенными породами, нижний – известняком, причем все структуры заданы так, чтобы на границе рассматриваемой области сохранялось плоско-параллельное залегание слоев. Каждому из

расчетных вариантов приписано условное название. В процессе моделирования изучалось распределение температур и тепловых потоков на срезах над соляной структурой и внутри нее. Параллельно отслеживалось наличие или отсутствие корреляции между средней величиной градиента температуры по высокотеплопроводной толще (солям) и ее толщиной. Приведем результаты, полученные для нескольких моделей.

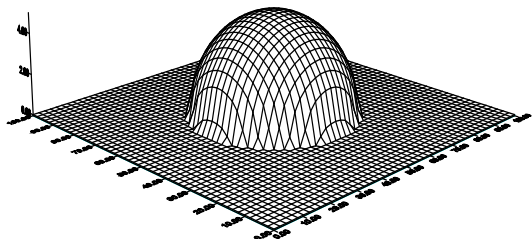


Рис.1. Модель «выпуклая линза».

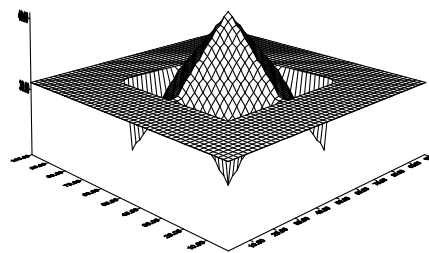


Рис.2. Модель «пирамида».

Первая модель - «выпуклая линза»: нижняя граница солей- плоскость, лежащая на глубине 800 м, верхняя – полусфера (рис.1), лежащая на плоскости, расположенной на глубине 600, так что верхняя точка соответствует 400 м глубины. Над этой структурой на глубине 440 м, точно над куполом структуры отмечается небольшое по площади повышение теплового потока в 1.5 раза, окруженное кольцевой областью с пониженным значением плотности теплового потока. Расчеты показали, что на глубине 640 м (горизонтальный срез, полностью лежащий под верхней границей солей) вариации теплового потока невелики, но занимают площадь несколько большую, чем сама полусфера. Максимум теплового потока приходится на внутреннюю границу полусферы, а к центру и к краям он понижается, причем за границей сферы он становится даже немного ниже фонового, примерно на 5%. Явление это естественно, так как тепловой баланс должен соблюдаться, что отмечалось и другими исследователями, например, в [1]. Структурный эффект может достигать 30-40% для локальных образований по данным [4] и 30% по расчетам [1]. Температура над куполом изменяется незначительно всего на 0.1 °С, над центром купола находится локальный минимум, окруженный кольцом с повышенной температурой. На срезе 640 температура практически линейно понижается от края структуры к центру от 19 до 16.5 °С.

Средний градиент температуры повышается от центра к краю полусферы от 0,85 °С/100 м при толщине 400 м до 0.93 °С/100 м при 260 м (рис.3). Таким образом, в куполах наблюдаются вариации геотермического градиента и теплового потока при постоянстве коэффициента теплопроводности. Зависимость геотермического градиента от толщины соленосного слоя, если исключить точки параллельного залегания слоев и использовать лишь точки склона, практически, прямая, коэффициент корреляции 0.96. Данный вид структуры представляет собой классический образец для изучения рассматриваемых закономерностей.

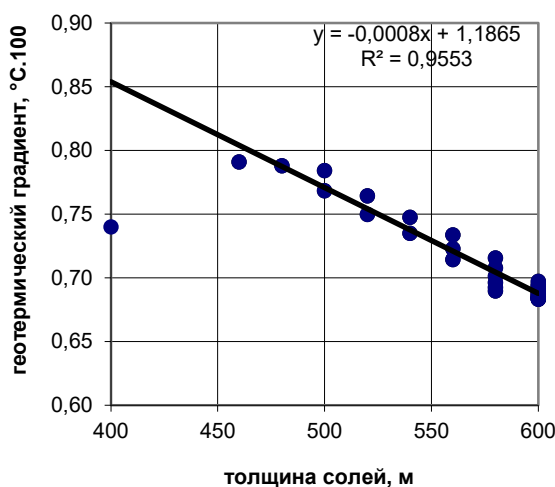


Рис. 3. Зависимость геотермического градиента от толщины солей для модели «выпуклая линза».

Вариант «пирамида». Для удобства представления данной структуры, кровля солей приведена на рис. 2, подошва структуры представляет собой плоскость. Распределение температуры на срезах зависит от того, проходит ли срез полностью по солям или сечет только

верхнюю часть пирамиды и верхний слой (назовем его условно терригенными отложениями). На срезе 460 м, проходящем под вершиной пирамиды, температура солей понижена – абсолютный минимум по площади соразмерный с сечением структуры на данной глубине, а рядом расположены четыре с меньшими значениями перепада температур в 0.2-0.3°C. Тепловой поток имеет максимум в форме квадрата, окруженный рамкой минимальных значений. Он варьируется по площади более чем в 2 раза. На срезе 640 м, расположенном под кровлей солей, центральный минимум температуры разрастается по площади, а по четырем сторонам пирамиды имеются четыре максимума, соответствующих местам заглупления кровли солей. Общий перепад температур достигает 2°C. Карта теплового потока представлена на рис.4а. Зонам повышенной температуры соответствуют минимумы теплового потока внутри областей с повышенными значениями. Корреляция не очень высокая ($R^2=0.75$), если использовать точки всего склона. Если отсечь часть точек с малой толщиной солей, т.е. взять точки ближе к центру пирамиды, то коэффициент возрастает до $R^2=0.93$. Данная модель наглядно иллюстрирует возможности получения разнообразных тепловых карт, вызванных только наличием включенной геометрической структуры с иной теплопроводностью при отсутствии любых других образующих факторов, влияющих на температуру.

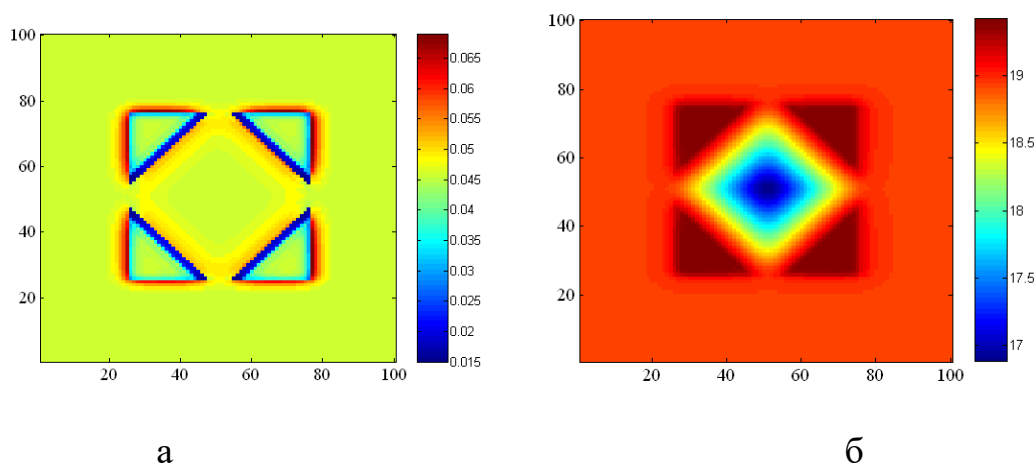


Рис. 4. Карта теплового потока (а) и температуры (б) на срезе 640 м (модель «пирамида»)

Структура «риф»: верхняя граница солей - плоскость, а нижнюю определяет известковый риф. В этом случае коэффициент корреляции не очень высок и растет с ростом крутизны склонов.

Обобщая модельные примеры можно сказать следующее. На срезах, секущих структуры повышенной теплопроводности, структуры оконтурены зонами повышенных плотностей теплового потока. В непосредственной близости к ним всегда наблюдаются зоны пониженных плотностей теплового потока, над структурой наблюдается небольшая зона повышенного теплового потока.

Зависимости среднего градиента температуры от толщины слоя для разных структур могут иметь коэффициент корреляции высокий, либо низкий, либо равный нулю, как в случае структуры «мембрана». Для каждой структуры зависимость эта индивидуальна и переносить ее на другие структуры не представляется возможным. Очевидно, необходим индивидуальный подход к рассмотрению имеющихся геометрических форм.

Рассмотрим Канчуринское подземное хранилище газа (ПХГ) [3]. Оно небольшое по размерам, примерно 3 x 2 км. Схематично геологическое строение этого ПХГ можно представить следующим образом:

- терригенные породы, примерно мощностью 300-400, имеющие почти плоские границы;
- соленосные отложения кунгурского горизонта;
- рифовый известняк.

Мощность соленосных отложений составляет 900-1300 м. Известковый риф в поперечном разрезе ПХГ представляет собой купол с довольно крутыми склонами. В продольном направлении присутствует еще один купол поменьше. Карта изогипс артинского яруса представлена на рис.5.

Карта толщин кунгурского яруса очень похожа на карту изогипс артинского яруса. Зависимость величины температурного градиента в соленосных отложениях от их мощности,

построенная на основании измерений в наблюдательных и длительно простаивающих скважинах, показана на рис. 6. Коэффициент корреляции равен 0.62.

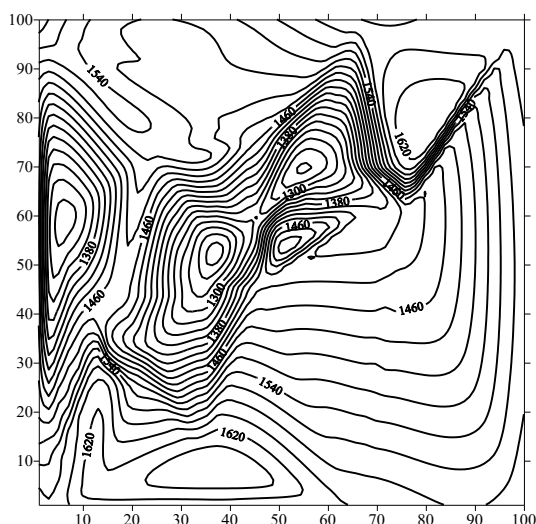


Рис.5. Карта изогипс артинского яруса.

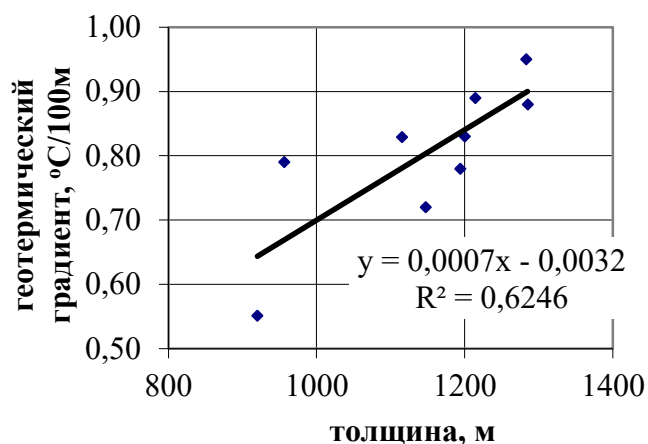


Рис.6. Зависимость градиента соленосных отложений от их толщины.

Для исследования влияния рифовой структуры ПХГ на температурное поле было смоделировано трехслойное строение геологического объекта (глина – соль – известняк) и в указанной области решена трехмерная стационарная задача теплопроводности. На нижней границе задавался постоянный тепловой поток. Теплопроводности слоев полагались равными 2.3, 5.7 и 2.88 Вт/м К сверху вниз, соответственно. Соотношение теплопроводностей специально подбиралось с целью сохранения величин средних градиентов отдельных слоев. Следующие расчетные карты температур и потоков демонстрируют результаты моделирования (рис.7 и 8). Срез 1600 м полностью расположен под соленосными отложениями в зоне максимальных глубин артинского яруса, т.е. под структурой. Карта температур на этом срезе наиболее интересна и, практически, повторяет карту толщин соленосных отложений, рис.5. Из-за небольших вариаций глубины расположения кровли соленосных отложений она немного отличается от карты изогипс кровли известняков. Максимальная температура соответствует минимальной толщине соленосных отложений.

Интересна карта теплового потока на срезах, секущих верхнюю часть структуры. Один из примеров - срез на глубине 1300 м приведен на рис.8. Зона повышенных значений теплового потока оконтуривает наиболее крутую часть рифа, демонстрируя, что тепловой поток не сохраняет своего вертикального направления, а его вектор поворачивает в сторону наиболее теплопроводной области. Во внешней части этого контура в сторону соленосных отложений происходит постепенное снижение от максимальных значений до фоновых. Во внутренней части контура наблюдается контур пониженных значений теплового потока.

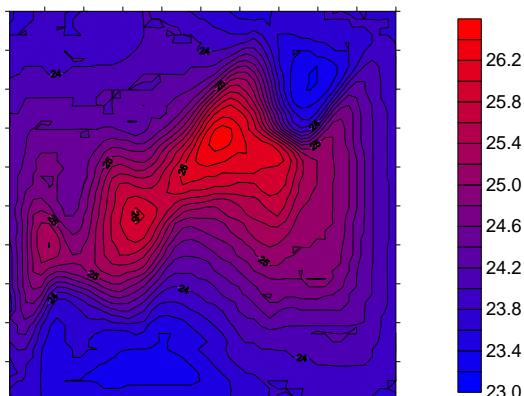


Рис.7 Расчетная карта температур (°C)

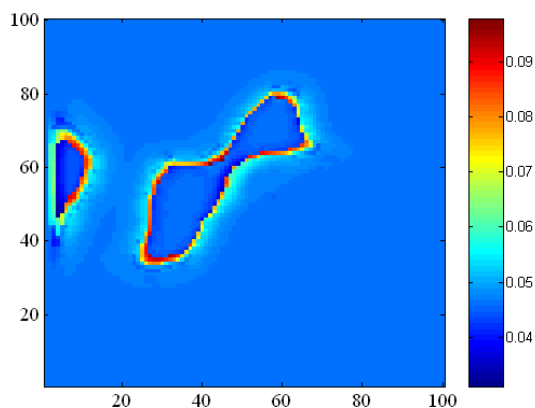


Рис.8 Расчетная карта тепловых потоков (Вт/м К)

Канчурина ПХГ на срезе 1600м.

Канчурина ПХГ на срезе 1300м.

Если рассматривать термоградиенты купольной и крыльевой скважин, то ясно видно, что на плоской границе слоев геотерма имеет резкий излом, градиент изменяется скачкообразно. В то же время на куполе структуры существует зона переходных значений термоградиента.

Таким образом наличие геологических структур приводит к изменению теплового потока, а его вариации могут свидетельствовать о наличии структур.

Литература

1. Джоунз Ф.У. Двумерные аномалии теплопроводности и вертикальные изменения теплового потока. Тепловое поле Европы/ Ф.У.Джоунз, Э.Р. Оксбург.- М.: Мир, 1982.-С. 117-127
2. Череминский Г.А. Прикладная геотермия/ Г.А. Череминский. - Л.: Недра, 1977.-224с.
3. Куштанова Г.Г. Температурный контроль разработки месторождений нефти и газа/ Г.Г. Куштанова. - Казань: Новое знание, 2003-178с
4. Гордиенко В.В. Тепловой поток континентов/ В.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя, Н.М. Якоби. - Киев: Наукова думка, 1982.- 184 с.