

ИСКАЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ПРИ РОСТЕ СОЛЯНЫХ КУПОЛОВ

М.Д.Хуторской¹, Б.Г.Поляк²

¹Экологический факультет, Российский университет дружбы народов,
Подольское шоссе, 8/5, 113093, Москва, Россия

²Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, 109017, Москва, Россия

При росте соляных куполов (галокинезе) происходит пертурбация глубинного теплового потока из-за сосуществования сложных структурных форм и контраста теплопроводности между толщей соли и вмещающими породами. Рассмотрены качественные и количественные характеристики причин и величин искажений. Исследована природа источников геотермических аномалий в нижней части земной коры. Аналитически рассчитана температура на «нейтральном слое», которая может быть принята в качестве верхнего граничного условия при термическом моделировании.

Особенностью строения осадочного чехла Прикаспийской впадины является присутствие в разрезе мощной толщи эвапоритов кунгурского яруса перми, имеющей форму куполов и штоков вследствие тектонической и гравитационной неустойчивости. Толща сложена в основном каменной солью с редкими включениями сульфатов и прослоями разной мощности сульфатно-терригенных пород, представленных аргиллитами, песчаниками и ангидритами. Углы падения этих пород изменяются в широких пределах — от нескольких градусов до 75° , что связано с пластическим перемещением соли из межкупольных зон в ядра соляных массивов. Купола интродуцированы в верхнепермские отложения, или прорывают их полностью. В первом случае из-за прекращения роста куполов вышележащие мезозойские породы остаются в горизонтальном залегании, во втором — рост продолжается, и образуется наклон надсолевых слоев, зависящий от времени и скорости подъема соли. В плане купола имеют округлую, эллиптическую, удлинённую или звездообразную форму. Округлая форма характерна для центральной части Прикаспийской впадины, а удлинённая — для ее бортовых зон [1].

Теплопроводность каменной соли очень высока — 5,5-6,5 Вт/м·К, что в 4-5 раз превышает теплопроводность вмещающих терригенных пород, которая составляет 1,6-2,0 Вт/м·К (рис. 1). Такой резкий контраст теплопроводности, а также крутые углы наклона границ раздела сред обуславливают перераспределение глубинного теплового потока. Он распространяется по пути наименьшего сопротивления, т.е. концентрируется в теле соляных куполов и рассеивается в межкупольных зонах. Непосредственными измерениями температуры в глубоких буровых скважинах установлено, что в наибольшей степени изотермы искривлены на боковых границах соляных куполов, а если учесть еще и фактор контраста теплопроводности на границе куполов и осадочных пород, то оказывается, что именно к боковым частям куполов приурочено максимальное искажение теплового потока. Для определения величины таких аномалий глубинного теплотока нами были рассчитаны номограммы зависимости его искажений от величины контраста теплопроводности каменной соли и вмещающих терригенных пород, а также от угла наклона борта куполов [2]. Из анализа номограмм видно, что:

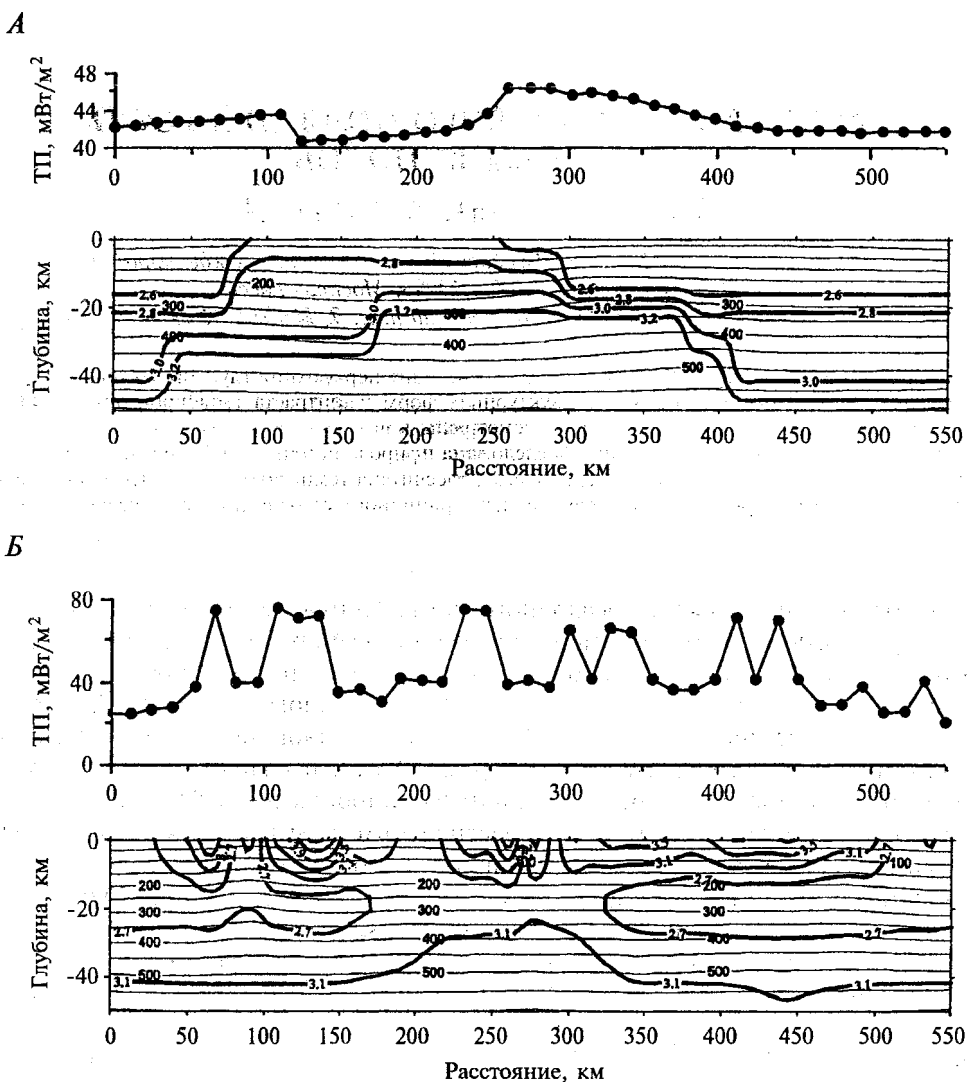


Рис. 1. Распределение температур в литосфере и теплового потока по профилю Джамбай-Кенкияк до образования соляных куполов (для времени 260 Ма) (А) и в настоящий момент (Б).

Утолщенные линии — распределение теплопроводности, Вт/м·К

- искажения возникают как в температурном поле, так и в поле теплового потока;
- максимальные искажения возникают на краях купола;
- амплитуда «краевого эффекта» между минимумом в межкупольной зоне и максимумом в бортовой зоне купола максимальна при угле наклона борта $\alpha = 90^\circ$.

Анализируя эмпирические данные, можно видеть, что положительные аномалии теплового потока над соляными куполами создаются, в основном, за счет структурно-геологических неоднородностей и присутствия «теплопроводов» — толщ каменной соли. Следует, однако, оценить и другие возможные причины появления аномалий: генерацию тепла за счет радиоактивного рас-

пада и экзотермических реакций, выделение тепла при трении и за счет тепломассопереноса при галокинезе.

Против первой причины — неравномерной радиотеплогенерации — говорит тот факт, что расчетное количество тепла, выделяющееся на разных глубинах, на всем протяжении профиля практически одинаково. Кроме того, поскольку в терригенных породах содержание долгоживущих изотопов больше по сравнению с каменной солью, то в межкупольных зонах тепловой поток был бы выше, что не подтверждается фактическими данными. Трудно представить и экзотермические реакции в данном разрезе; скорее наоборот, должны превалировать эндотермические процессы, в частности, растворение.

Вторую возможную причину аномалий (фрикционное тепло) можно оценить на основании решения задачи об остывании горизонтального кругового цилиндра, имеющего размер поперечного сечения и теплофизические свойства такие же, как у соляного купола. Даже если допустить, что соль в процессе интенсивного подъема из-за трения разогрелась до температуры плавления (800°C), то весь избыточный тепловой поток выделится уже через 1 млн. лет (так как кровля соляных куполов в восточной части Прикаспийской впадины располагается на глубинах всего 0,5-2 км, а подошва — на 4-6 км), и соль будет иметь сегодняшнюю температуру. Как известно, наиболее интенсивный рост соляных куполов в Прикаспийской впадине закончился на рубеже палеозоя и мезозоя (вообще-то этот процесс продолжается непрерывно, но с гораздо меньшей скоростью). При учете эффекта тепломассопереноса (третья возможная причина аномалий) стационарное распределение температур после подъема кровли соли на 3 км установится через 3 млн. лет, а величина дополнительного теплопотока составит $0,04 \text{ мВт/м}^2$, т.е. на три порядка ниже фоновой величины.

Таким образом, в областях солянокупольной тектоники вариации наблюдаемых значений теплового потока связаны со структурно-теплофизическими неоднородностями. Это хорошо иллюстрируется широтным профилем теплового потока через восточную часть Прикаспийской впадины (см. рис. 1). Модельный расчет глубинных температур и теплового потока до образования солянокупольных структур (для времени 260 Ма) показывает отсутствие локальных «высокочастотных» искажений теплового поля.

Профили были получены путем нестационарного численного моделирования процесса кондуктивной теплопроводности в условиях структурно-теплофизических неоднородностей, установленных по геолого-тектоническим и геотермическим данным. Фрагмент регионального профиля ГСЗ «Челкар-Волгоград», который использовался для моделирования, простирается от соляного купола Дзамбай до соляного купола Кенкияк и достаточно хорошо обеспечен фактическими геотермическими данными (рис. 2). Он включает Центрально-Прикаспийскую депрессию на западе и Актюбинско-Северокаспийскую зону поднятий на востоке (Ю.А. Волош, устное сообщение, 1997).

Раздел между этими зонами контролировался пологим глубинным разломом в фундаменте, установленным по данным МОВ. Восточная часть профиля характеризуется сокращением терригенно-эвапоритового комплекса и подъемом скоростной границы $6,2 \text{ км/с}$ до глубины 9-12 км, в то время как в западной части профиля эта граница располагается на глубинах 18-22 км. Кроме того, отличительной особенностью Центрально-Прикаспийской депрессии является наличие в низах коры линзы высокоскоростных пород ($7,9\text{-}8,1 \text{ км/с}$) мощностью до 10 км; по геофизическим признакам эту линзу можно ассоциировать с эклогитами. В соответствии с сейсмическим разрезом были приняты

значения теплофизических свойств пород, которые использовались для расчета на компьютере значений глубинных температур и теплового потока (таблица).

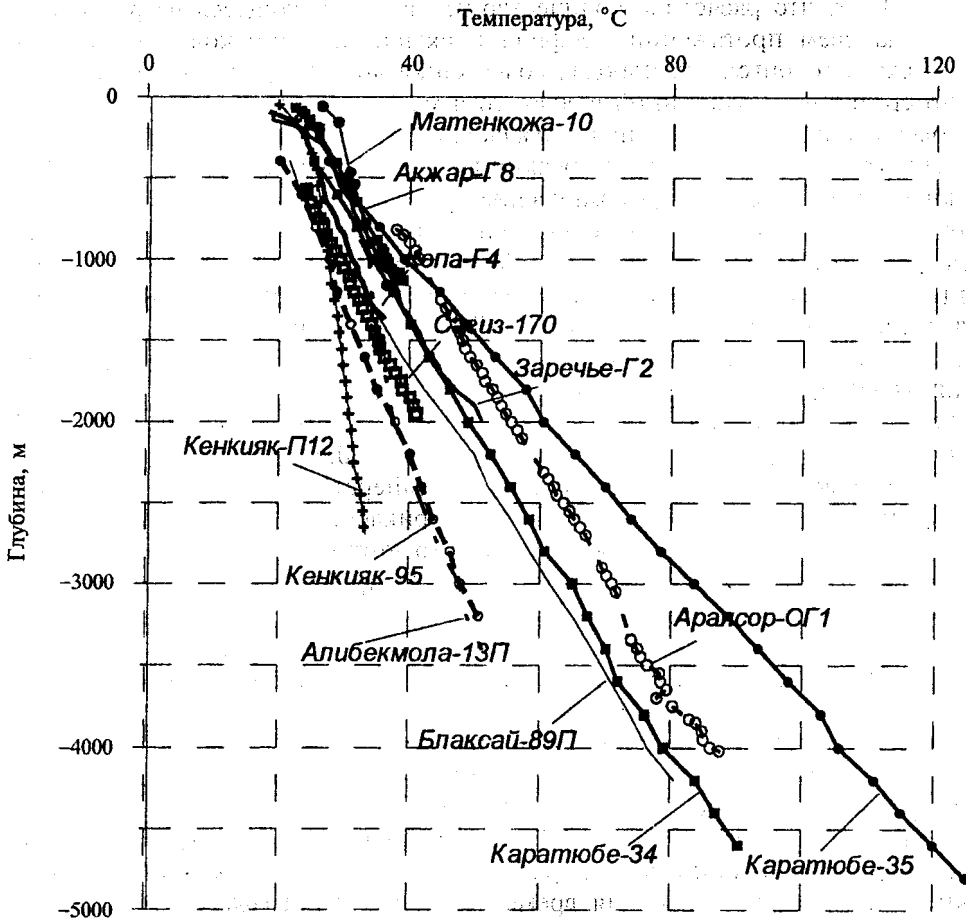


Рис. 2. Термограммы скважин вдоль профиля Джамбай-Кенкияк

Таблица

Теплофизические параметры, принятые для моделирования геотермического поля

Структурно-формационный комплекс	Температуропроводность	Теплопроводность, Вт/м·К
	$\kappa \cdot 10^{-7}; \text{ м}^2/\text{с}$	
Надсолевой комплекс терригенных пород	5,0	2,3
Каменная соль	12,0	6,9
Подсолевой комплекс терригенных пород	7,0	2,7
Метаморфический комплекс ($v_{\text{гр.}} = 6,6 \text{ км/с}$)	8,0	2,8
Геофизический гранитный слой	6,0	2,5
Геофизический базальтовый слой	8,0	2,9
Эклогиты	10,0	3,3

Как видно из таблицы, основными контрастными комплексами в разрезе являются соль и эклогиты. При моделировании на нижней границе разреза принимались граничные условия второго рода, т.е. задавался постоянный

тепловой поток, значение которого было адекватно измеренному фоновому значению в глубоких скважинах этого региона за пределами соляных куполов. Этот тепловой поток — 44 мВт/м^2 — был рассчитан из анализа зависимости забойных температур от глубины скважин, лежащих в полосе шириной 200 км вдоль исследованного профиля (рис. 3). Линейный фитинг данных позволил вывести формулу регрессии, связывающую температуру и глубину забоя: $T = (274,86 + Z)/45,80$. Отсюда было рассчитано значение среднего геотермического градиента ($21,8 \text{ мК/м}$) и, соответственно (с учетом теплопроводности подсолевого комплекса), тепловой поток, который и был задан в модели. На верхней границе разреза задавалась постоянная температура, которая также была рассчитана по указанной формуле; если принять $Z = 0$, то $T = 6^\circ\text{C}$. Примерно такая температура была нами при термозондировании реально зафиксирована на «нейтральном слое» (в скважинах на глубине 20-30 м). На боковых границах соблюдалось условие отсутствия латерального оттока тепла, т.е. $\partial T/\partial x = 0$.

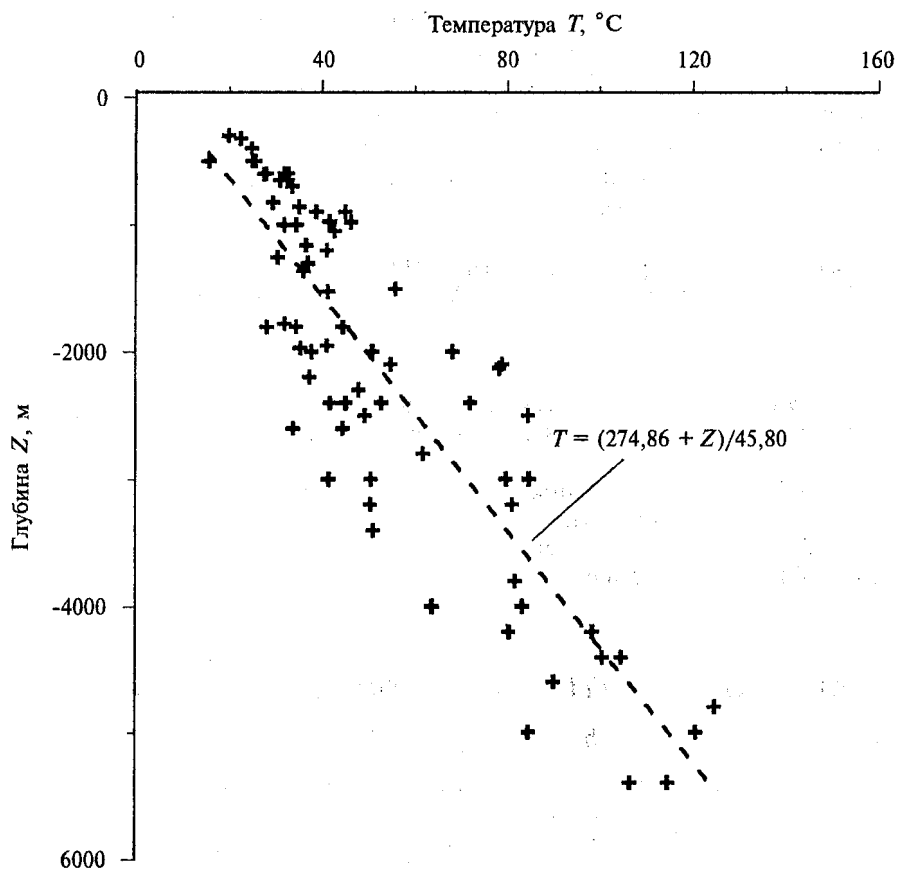


Рис. 3. Зависимость призабойной температуры от глубины забоя скважин восточной части Прикаспийской впадины

Как видно из рис. 3, во всех скважинах глубиной 1-1,5 км, пробуренных в надсолевом комплексе или в межкупольных зонах, градиент температуры повышен, что обусловлено низкой теплопроводностью терригенных пород. В скважинах более глубокого заложения, углубившихся в толщу эвапоритов, средний градиент заметно меньше.

Наличие проницаемых зон вдоль глубинных разломов, установленных по сейсмическим данным (в интервале 90-100, 200-210, 350-360 км по длине профиля, см. рис. 1) аппроксимировалось введением дополнительных тепловых источников, имеющих конвективную природу. Мощность этих источников составляла $0,05 \text{ мВт/м}^3$, что обуславливалось движением флюидов со скоростью $5 \cdot 10^{-7} \text{ см/с}$.

Основным фактором, деформирующим тепловое поле, является присутствие высокотеплопроводных соляных куполов, искажающих фоновый тепловой поток на 70-80%. Влияние линзы эклогитов проявляется присутствием латеральной градиентной температурной зоны в низах коры (интервал 250-400 км на рис. 1). Такая конфигурация геотемпературного поля свидетельствует о локальном охлаждении нижней части коры и, по-видимому, верхней мантии.

Этот вывод весьма важен для обсуждения причин появления эклогитов в наиболее погруженной части Прикаспийской впадины. С одной стороны, эклогиты — это продукт высокобарического метаморфизма; следовательно, их генерация связана с эндотермическими химическими реакциями, приводящими к понижению температур в окружающей их среде за счет отбора отсюда латентного тепла. С другой стороны, если эклогиты «вдвинуты» в эту часть впадины со стороны смежного Уральского складчатого пояса (в результате позднепалеозойской субдукции и «выдавливания» их из-под подошвы аллохтонного блока), то локальное охлаждение недр также объяснимо, т.к. при субдукции возникают шарьяжи большой мощности, экранирующие пространство глубинного тепла [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №97-05-64111).

Авторы благодарят за ценные консультации Ю.А. Волоша и Е.А. Долгинова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлев В.С. Сравнительная тектоника Печорской, Прикаспийской и Североморской экзогенальных впадин Европейской платформы. — М.: Наука, 1972. — 397 с.
2. Хуторской М.Д. Тепловой поток в областях структурно-геологических неоднородностей. — М.: Наука, 1982. — 77 с.
3. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. — М.: Изд-во РУДН, 1996. — 258 с.

A THERMAL FIELD PERTURBATION DUE TO SALT DOMES RISE

M.D.Khutorskoy¹, B.G.Polyak²

¹*Ecological Faculty, Peoples' Friendship Russian University,
Podolskoye shosse, 8/5, 113093, Moscow, Russia*

²*Geological Institute, Russian Academy of Science,
Pyzevskiy pereulok, 7, 109017, Moscow, Russia*

At the salt domes rising (halocynesis) there is a terrestrial heat flow perturbation because complex structural forms and thermal conductivity contrast salt and background layers coexistence. The qualitative and quantitative characteristics of the reasons and perturbation volume are considered. The nature of thermal anomalies in the bottom of the earth crust is investigated. Temperature on «a neutral layer» is analytically designed and can be accepted as the top boundary condition during a thermal modeling.