



<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0080>

## THE VELOCITY STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE AND REGIONAL DEEP THERMODYNAMICS OF THE BAIKAL RIFT ZONE

A. V. Pospeev

*CJSC Eastern Geophysical Trust, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The article is aimed at discussion of geological and geophysical aspects of the 'asthenospheric' interpretation of the 'anomalous' mantle layer that is revealed in the Baikal rift zone by deep seismic sounding (DSS) methods. Based on the analysis of the geoelectrical model, estimations of rheological properties, regional geothermal and deep petrological data, it is concluded that the 'anomalous' mantle phenomenon should be interpreted within the framework of solid-phase models. It is shown that the actual minimum depth to the top of the asthenosphere is about 60–70 km in the region under study, and temperatures at the surface of the Earth's mantle varies from 600 to 900 °C. It is most probable that velocities are reduced in the 'anomalous' mantle layer due to the presence of high-temperature spinel-pyroxene facies of the mantle rocks.

*Key words:* 'anomalous' mantle, geoelectric model, deep geothermal curves, facies of the mantle rocks.

**Recommended by** K.Zh. Seminsky 3 December 2012

**Citation:** Pospeev A.V., 2012. The velocity structure of the upper mantle and regional deep thermodynamics of the Baikal rift zone. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (4), 377–383. doi:10.5800/GT-2012-3-4-0080.

## СКОРОСТНАЯ СТРУКТУРА ВЕРХНЕЙ МАНТИИ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЛУБИННАЯ ТЕРМОДИНАМИКА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

A. B. Поспеев

*ЗАО «Восточный геофизический трест», Иркутск, Россия*

**Аннотация:** Рассмотрены геолого-геофизические аспекты «астеносферного» варианта интерпретации слоя «аномальной» мантии, выделяемого в Байкальской рифтовой зоне глубинными сейсмическими зондированиями. Анализ геоэлектрической модели, реологические оценки, данные региональной геотермии и глубинной петрологии показывают, что интерпретация феномена «аномальной» мантии должна проводиться в рамках твердофазовых моделей. Показано, что реальная глубина кровли астеносферы в этом регионе составляет минимум 60–70 км, а температура на кровле мантии – 600–900 °C. Вероятнее всего, снижение скорости в слое «аномальной» мантии связано с наличием высокотемпературной шпинель-пироксеновой фации мантии.

*Ключевые слова:* «аномальная» мантия, геоэлектрическая модель, глубинные геотермы, фации мантийных пород.

### 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ

Глубинные термодинамические модели Байкальской рифтовой зоны, как правило, в той или иной мере связаны с физико-геологической интерпретацией тако-

го феномена ее глубинного строения, как «аномальная» мантия. Информация об аномальных скоростных свойствах мантии Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) была получена в результате первых работ методом глубинного сейсмического зондирования в регионе

[Krylov et al., 1981]. Согласно этим данным, на обширной территории, охватывающей практически всю область кайнозойской активизации, граничная скорость на поверхности мантии составляет 7.7–7.9 км/с, в то время как на территории прилегающих тектонических элементов – 8.1–8.3 км/с. Ниже кровли мантии фиксируется вторая граница –  $M_1$ , характеризующаяся «нормальной» граничной скоростью. Слой с пониженной скоростью имеет мощность до 20–30 км, выклиниваясь на периферии БРЗ и имея максимальную мощность непосредственно под Байкалом. На снижение скоростей сейсмических волн верхней мантии БРЗ указывают и телесеismicкие данные [Krylov et al., 1981; Rogozhina, Kozhevnikov, 1979], согласно которым выделяется обширная область «аномальной» мантии. Контуры ее проекции практически совпадают с проекцией зоны пониженной скорости на поверхности мантии по данным ГСЗ.

Следует отметить, что Байкальская рифтовая зона не единственный регион, кровля мантии которого характеризуется аномально низкой скоростью. Такая ситуация типична для многих регионов, характеризующихся высокими значениями регионального теплового потока, например для Средней Азии [Gordienko, Tal'-Virsky, 1990], Центральной Европы [EUGEMI Working Group, 1990], Дальнего Востока [Beresnev et al., 1970]. Достаточно часто ниже границы Мохо также отмечается вторая граница, скорость на которой имеет нормальные значения.

Поскольку величина граничной скорости в пределах слоя «аномальной» мантии является промежуточной между скоростью в ультрабазитах и основных породах, первоначальным вариантом интерпретации наблюдаемой скоростной структуры было наличие между корой и мантией гипотетического слоя «коро-мантийной» смеси. Подобная гипотеза, высказанная впервые К.Л. Куком [Cook, 1962], позднее использовалась в целом ряде работ [Belyaevsky, 1970; and others].

Однако рассмотрение С.В. Крыловым [Krylov et al., 1981] многопараметровых геолого-геофизических моделей позволило ему сделать вывод, что гипотеза «коро-мантийной» смеси в наименьшей степени отвечает региональным геофизическим полям Байкальского региона. Вследствие того, что соотношение прироста скорости к приросту плотности при изменении основности горных пород подчиняется так называемому «закону Берча» [Ringwood, 1975], наличие ~20-километрового слоя «аномальной» мантии в БРЗ должно вызывать аномалии гравитационного поля амплитудой около 100 мГал, в то время как реально на долю этого объекта можно отнести 30–50 мГал.

В качестве иных вариантов С.В. Крыловым было рассмотрено влияние разогрева, эклогитизации низов коры и плавления, из которых наиболее согласованным с физическими параметрами среды был выбран вариант частичного плавления мантийного вещества.

В случае, если природа слоя «аномальной» мантии

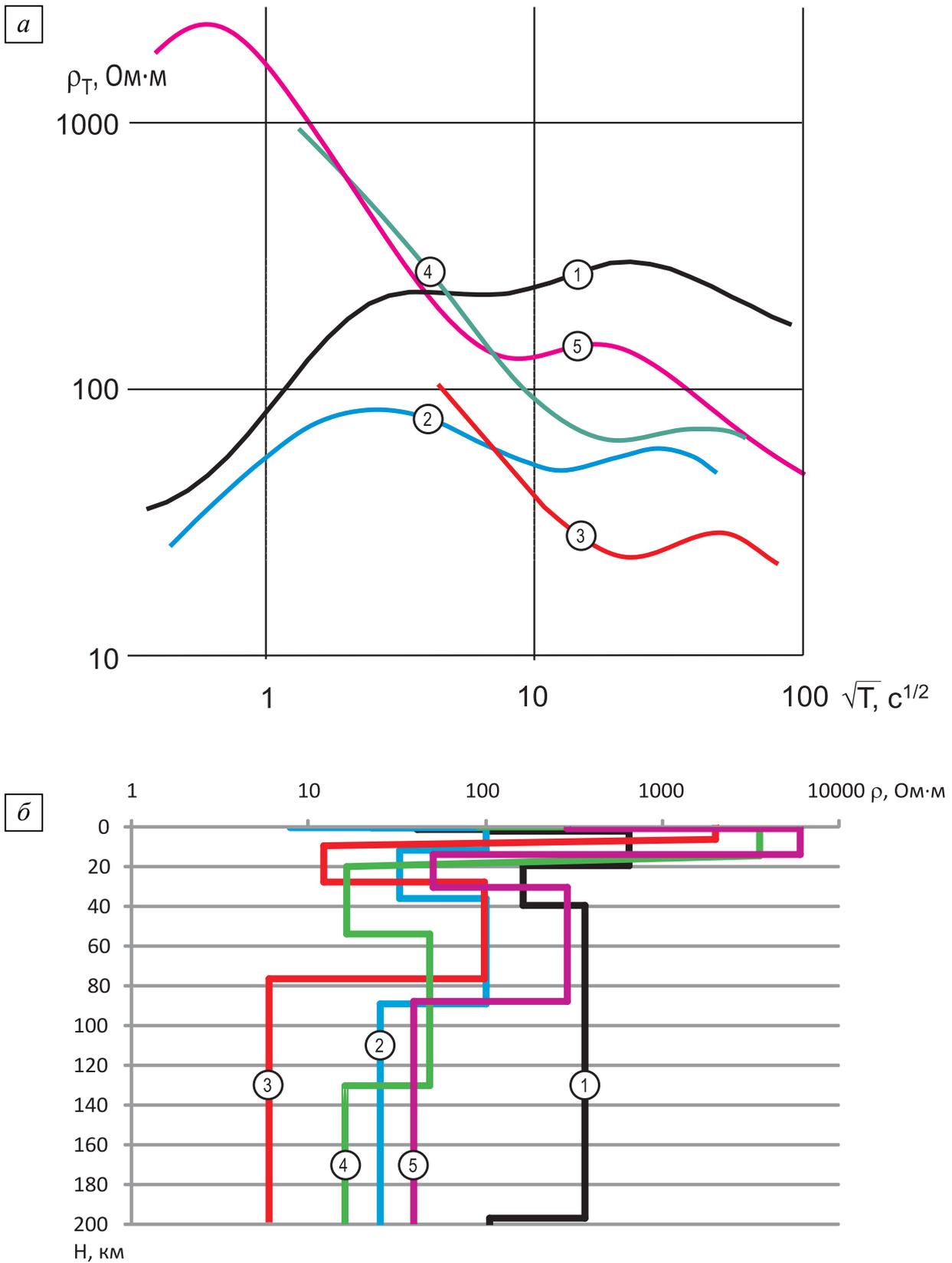
связана с частичным плавлением, в БРЗ непосредственно под подошвой коры существует обширный – площадью около 1000000 км<sup>2</sup> – «астеносферный аппендикс», имеющий толщину значительно меньше его латеральных размеров. Поскольку при стационарном геотермическом режиме наблюдаемый региональный тепловой поток должен составлять не менее 100–120 мВт/м<sup>2</sup>, а наблюдаемый в среднем не превышает 70 мВт/м<sup>2</sup> [Lysak, 1988; Golubev, 2007], единственным следствием этого должно быть признание факта значительной нестационарности теплового потока рифта. Так, Ю.А. Зориным и И.И. Осокиной [Zorin, Osokina, 1984] рассчитана динамическая тепловая модель исходя из предположения о мгновенном перемещении границы литосфера/астеносфера с глубины 180 км (аналогично глубине астеносферы на Сибирской платформе) непосредственно под подошву коры примерно 3 млн лет назад. В этом случае региональный поверхностный тепловой поток оказывается далек от установившегося режима и повысится с 40–50 до 70 мВт/м<sup>2</sup>.

Идея о близком положении астеносферного слоя в БРЗ легла в основу большого количества глубинных геодинамических моделей региона. Их можно разделить на две основные группы – модели с тонким астеносферным слоем, соответствующим мантийному волноводу, который отделен от основной астеносферы слоем «нормальной» мантии [Krylov et al., 1981], и модели «астеносферного диапира», в которых кровля астеносферы совпадает с кровлей мантии, а подошва – с подошвой «нормальной» астеносферы [Зорин, 1971]. В последнем случае граница  $M_1$  считается внутриастеносферной и связанной с изменениями основности или фациального состояния мантийных пород.

Между тем модели «астеносферного диапира» и «астеносферного аппендикса», объясняя скоростную структуру верхней мантии Байкальского рифта, плохо согласуются со многими другими геолого-геофизическими данными. И если отличие среднего регионального поверхностного теплового потока от расчетного при положении кровли астеносферы на границе  $M$  в этих моделях объясняется существенной геотермической нестационарностью, то многие другие несоответствия просто не находят физического и геологического объяснения.

## 2. АНАЛИЗ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Геоэлектрическая модель земной коры и верхней мантии региона получена в результате исследований методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ). На рис. 1 приведены средние квазипродольные кривые МТЗ и соответствующие им геоэлектрические разрезы, полученные в северо-восточной, центральной частях рифта, его восточном замыкании, а также в одном из районов Забайкалья и Восточной Сибири. На всех кри-



**Рис. 1.** Средние квазипродольные кривые МТЗ (а) и соответствующие им геоэлектрические разрезы (б). 1 – Ангаро-Ленская ступень Сибирской платформы; 2 – Селенгинская депрессия; 3 – центральная часть Байкальской рифтовой зоны; 4 – восточный фланг Байкальской рифтовой зоны; 5 – Ундино-Газимурское поднятие (с использованием данных Ю.В. Кузьминых [Kuzminykh, 1991]).

**Fig. 1.** Average quasi-longitudinal MTS curves (a) and corresponding geoelectric profiles (б). 1 – the Angara-Lena bench of the Siberian platform; 2 – Selenga depression; 3 – the central segment of the Baikal rift zone; 4 – the eastern flank of the Baikal rift zone; 5 – Undino-Gazimurskoe uplift (data published by Yu.V. Kuzminykh [1991] are used).

вых достаточно хорошо выражены два глубинных проводящих горизонта – внутрилитосферный и астеносферный. Кровля первого из них отмечается в пределах осевой части Байкальской рифтовой зоны на глубинах от 10–13 до 18–20 км. В целом не отмечается существенной разницы в поведении этого слоя под рифтовыми впадинами и их горным обрамлением. Кроме того, отмечается заметное погружение внутрилитосферного проводящего слоя в сторону Сибирской платформы и складчатых областей Забайкалья. Если считать, что природа этого проводящего слоя связана с наличием надкритических водных флюидов [Hyndman et al., 1993], то P–T-условия в его пределах отвечают зеленосланцевой и амфиболитовой фациям метаморфизма. В этом случае кровля внутрилитосферного проводящего слоя примерно соответствует поведению геоизотермы 350 °С.

Информации о положении астеносферного проводящего слоя значительно меньше, так как количество необходимых для его надежного определения длиннопериодных кривых на северо-западном фланге Байкальской рифтовой зоны измеряется единицами. Автором ранее [Pospeev, 1988] получены оценки глубины кровли астеносферы для района Верхнеангарской и Муяканской впадин в 80 км, Алданского щита – 150 км. Даже с учетом погрешности оценок, которая может достигать 20 %, эти глубины практически более чем в два раза превышают глубину залегания кровли мантии. Теоретические кривые МТЗ, рассчитанные с включением в разрез проводящего слоя на глубинах 40–60 км, даже при максимально возможном для частично расплавленного слоя сопротивлении, значительно расходятся с наблюдаемыми. Тем более невозможно согласовать с наблюдаемыми теоретические кривые, рассчитанные для модели «астеносферного диапира», когда непроводящий интервал между подошвой слоя «аномальной» мантии и кровлей «нормальной» астеносферы отсутствует [Popov et al., 1991].

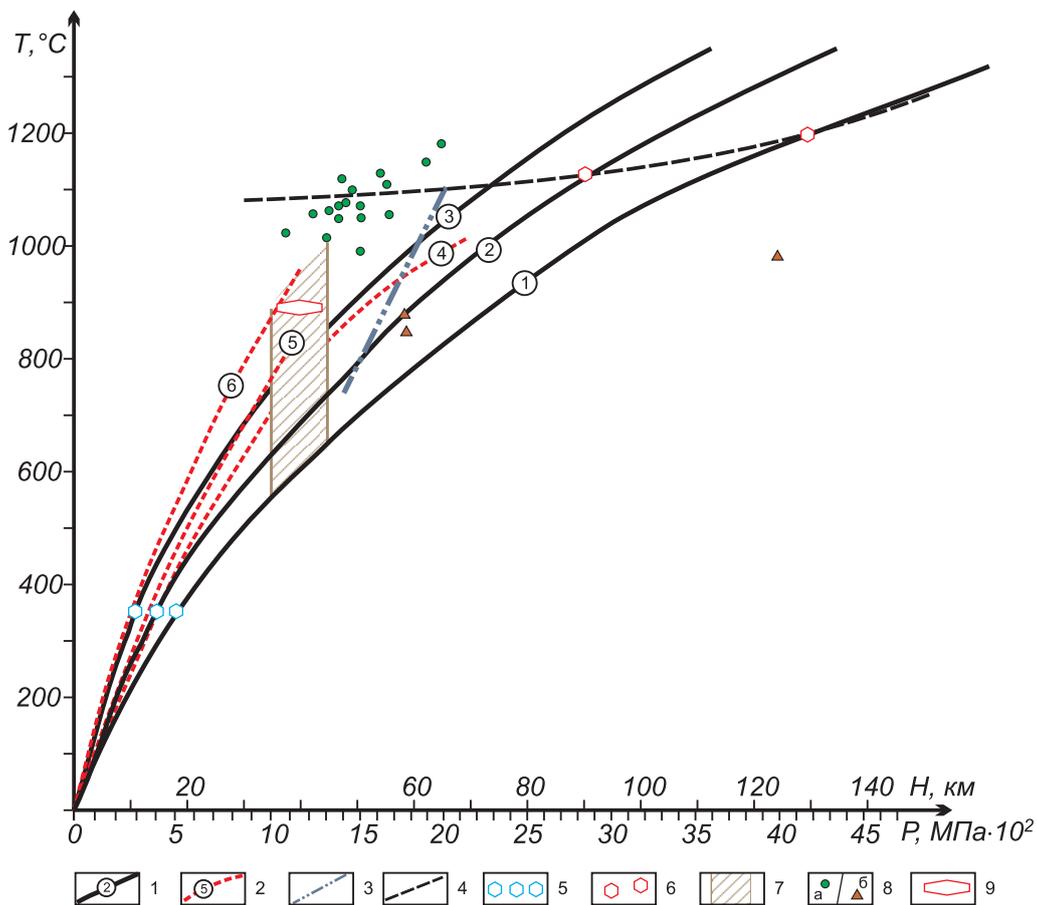
Таким образом, данные электромагнитных зондирований противоречат гипотезе о наличии зоны частичного плавления на поверхности мантии в БРЗ. Это дает основание рассматривать природу слоя «аномальной» мантии, залегающего непосредственно под корой Байкальской рифтовой зоны, в рамках твердофазовых моделей [Pospeev, 1988; Vanyan, 1981].

Еще один аспект проблемы связан с физической возможностью реализации механизма образования тонкого астеносферного слоя под подошвой коры. Прежде всего, следует отметить, что астеносферный слой в нормальных условиях является относительно амагматичным. Это связано с тем, что степень плавления в нем по геофизическим данным и геотермическим оценкам составляет максимум 5–7 %, в то время как сегрегация расплава начинается при доле плавления 15–20 % [Dobretsov, 1981]. По всей видимости, такая большая степень перегрева астеносферы в ре-

гиональном масштабе достигается только в зонах срединно-океанических хребтов. В остальных случаях для формирования магмопроизводящих структур недостаточно существования астеносферного слоя с нормальными региональными параметрами. Магматические очаги в этом случае, вероятнее всего, образуются в результате поступления дополнительных порций термической энергии из подастеносферных зон в пределах так называемых «горячих точек» [Rasskazov, 1993].

Оценки времени формирования астеносферного варианта слоя «аномальной» мантии вещества с «нормальной» степенью перегрева могут быть сделаны с использованием величины скорости мантийной конвекции, разумной оценкой которой можно считать ~1 см/год [Zonenshain, Kovalev, 1974]. Если предположить, что вещество «аномальной» мантии первоначально просто всплывает в осевой части БРЗ, то для достижения глубины около 40 км при ее начальном значении около 180 км потребуется примерно 15 млн лет. В дальнейшем, испытывая горизонтальную силу растекания за счет разницы давлений между кровлей и подошвой диапира, вещество «аномальной» мантии гипотетически должно вклиниваться вдоль границы Мохо [Krylov et al., 1981]. С учетом того, что ширина области проекции слоя «аномальной» мантии составляет многие сотни километров, на это должно уйти еще ~50 млн лет. Таким образом, простое всплывание вещества астеносферы за счет ее меньшей по сравнению с литосферой плотностью оказывается настолько медленным процессом, что на это требуется время, в течение которого региональный тепловой поток в Байкальской рифтовой зоне станет весьма близок к стационарному режиму. Что касается кондуктивного механизма, то продвижение теплового поля и в этом случае оказывается медленным, на что указывают расчеты, проведенные Ю.А. Зориным и С.В. Осокиной [Zorin, Osokina, 1984].

Отсюда следует, что относительно быстрый (в геологическом масштабе времени) вариант формирования «астеносферного аппендикса» возможен лишь при перегреве астеносферы до степени плавления более 15 %, сегрегации расплава, образовании магматического очага и других сопутствующих этому явлениях. Однако в таком случае под подошвой коры гипотетически должен скапливаться базальтовый расплав. Это тем более невероятно, поскольку базальтовая магма легче вышележащих пород нижней коры; кроме того, данный вариант не отвечает многопараметровой модели С.В. Крылова. Если предположить, что огромное количество базальтового расплава скопилось под подошвой коры, то объяснить отсутствие такого же по масштабам вулканизма практически невозможно. Известные магматические очаги, как на юго-западе, так и на востоке Байкальской рифтовой зоны, имеют относительно небольшие размеры, хотя все они оказались способны вывести определенную часть магматитов на дневную поверхность.



**Рис. 2.** Геолого-геофизическая характеристика земной коры и верхней мантии Байкальской рифтовой зоны. 1 – геотермы, построенные исходя из положения кровли внутрилитосферного и астеносферного проводников по данным МТЗ; шифр кривых: 1 – восточное замыкание БРЗ, 2 – северо-восток БРЗ, 3 – район северного берега Байкала; 2 – геотермы из работы [Golubev, 2007]; 4 – рассчитанные при наличии сквозьлитосферного теплопереноса, 5, 6 – под впадинами и хребтами БРЗ, учитывающие влияние теплопереноса подземными водами; 3 – линия фазового перехода между шпинель-пироксеновой и графит-пироповой фациями мантии [Dobretsov, 1981]; 4 – линия солидуса частично водонасыщенных мантийных пород [Pollack, Chapman, 1977]; 5 – глубины кровли внутрилитосферного проводящего слоя для регионов 1–3 (усл. обозначение 1); 6 – глубины кровли астеносферы по данным МТЗ для регионов 1, 2 (усл. обозначение 1); 7 – диапазон глубин кровли мантии в БРЗ (с учетом оцененных в работе температур) [Krylov et al., 1981]; 8 – данные геотермо- и геобарометрии мантийных ксенолитов, кристаллизованных в шпинель-пироксеновой (а) и графит-пироповой (б) фациях [Perchuk, Vaganov, 1978]; 9 – средняя температура низкотемпературной моды мантийных ксенолитов [Dobretsov, Ashchepkov, 1991].

**Fig. 2.** Geological and geophysical characteristics of the crust and upper mantle of the Baikal rift zone (BRZ). 1 – geothermal curves constructed with regards to the top of intra-lithospheric and asthenospheric conductors according to MTS data; curve codes: 1 – the eastern termination of the Baikal rift zone, 2 – the north-eastern segment of BRZ, 3 – area of the north shore of Lake Baikal; 2 – geothermal curves from [Golubev, 2007]; 4 – calculated with account of the presence of heat and mass transfer trough the lithosphere, 5 and 6 – under the basins and ridges of BRZ, taking into account the effect of heat transfer by groundwater; 3 – the phase transition line between the spinel-pyroxene and graphite-pyrope facies of the mantle [Dobretsov, 1981]; 4 – the solidus line of partially water-saturated mantle rocks [Pollack, Chapman, 1977]; 5 – depth of the top of the intra-lithospheric conductive layer for regions 1–3 (symbol 1); 6 – the depth of the top of the asthenosphere according to MTZ data for regions 1 and 2 (symbol 1); 7 – the depth range of the mantle tops in the BRZ (including estimated temperatures) [Krylov et al., 1981]; 8 – geothermal and geobarometric data on the mantle xenoliths that are crystallized in the spinel-pyroxene (a) and graphite-pyrope (b) facies [Perchuk, Vaganov, 1978]; 9 – an average temperature of the low-temperature modes of the mantle xenoliths [Dobretsov, Ashchepkov, 1991].

### 3. АНАЛИЗ ПЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ГЛУБИННАЯ ГЕОТЕРМИЯ

Определенным аргументом в пользу отсутствия частичного плавления непосредственно под корой БРЗ является довольно значительная – 70–120 км – глубина очагов магмообразования, определенная по минеральным ассоциациям выплавленных базальтов. Отметим также, что ксенолиты, глубинное положение которых

по данным геотермо- и барометрии соответствует интервалу глубин «аномальной» мантии, содержат следы плавления лишь на границах образцов без заметных следов частичного плавления в массе в целом [Rasskazov, 1993].

Статистика, приведенная Н.Л. Добрецовым и И.А. Ащепковым [Dobretsov, Ashchepkov, 1991] по термическим параметрам захвата мантийных ксенолитов в пределах Витимского плоскогорья и Джидинско-

го района, показывает, что распределение двупироксеновых температур перидотитовых ксенолитов имеет тримодальный характер. Наиболее высокотемпературная мода соответствует апикальной части мантийного магматического очага, средняя мода – глубинам вскипания магматических расплавов, низкотемпературная – промежуточной зоне движения расплавов вблизи границы Мохо. По немногочисленным образцам средняя температура пород, залегающих вблизи границы кора–мантия, составляет  $890 \pm 10$  °С.

При сведении вышеупомянутых температурных оценок в единую Р–Т-диаграмму (рис. 2) четко видно, что для осевой части северо-востока БРЗ кровля астеносферы располагается на глубине 90 км по данным МТЗ, кровля внутрилитосферного проводящего слоя – на глубине около 14 км. Для восточного фланга БРЗ кровля проводников располагается на глубинах 17 и 150 км. Если принять температуру на этих границах соответственно 350 и 1100 °С, то на кровле мантии (глубина около 40 км) температура составит для северо-востока и востока БРЗ соответственно около 700 и 600 °С. Наиболее близкое положение внутрилитосферного проводящего слоя отмечается в районе северной оконечности Байкала – около 10 км.

Совмещение полученных геотерм для осевой части рифта и района Ангаро-Витимского батолита показывает, что они практически совпадают с геотермами, рассчитанными В.А. Голубевым для рифтовых впадин и их горного обрамления с учетом тепломассопереноса и перераспределения глубинного тепла потоками метеогенных вод [Golubev, 2007]. При этом термические оценки, сделанные на основании интерпретации магнитотеллурических данных, примерно на 100 °С ниже, чем по расчетам В.А. Голубева, что можно связать с наличием определенных погрешностей оценок.

Анализ термодинамической модели, представлен-

ной на рис. 2, дает основание для важного вывода. Геотермы, построенные по данным наземных измерений с учетом тепломассопереноса, а также по глубинным геотермическим реперам – кровле проводящих горизонтов, пересекают линию фазового перехода между шпинель-пироксеновой и графит-пироповой фациями мантии именно в том диапазоне глубин, в пределах которого фиксируется подошва слоя «аномальной» мантии. Это позволяет достаточно непротиворечиво объяснить ее геологическую природу. Породы, кристаллизованные в более высокотемпературной фации, обладают пониженными упругими свойствами. Поскольку средняя атомная масса вещества при фазовых переходах не меняется, соотношение скорость/плотность уже не отвечает закону Берча. В этом случае понижение скорости оказывается существенно больше понижения плотности, что согласует данную геологическую модель с многопараметровой физической моделью С.В. Крылова [Mats et al., 2001]. Существование пород верхней мантии, кристаллизованных в высокотемпературной шпинель-пироксеновой фации, подтверждается и петрологическими данными [Perchuk, Vaganov, 1978].

#### 4. ВЫВОДЫ

Региональный глубинный тепловой поток Байкальской рифтовой зоны в целом приблизительно стационарен. Термодинамические условия на кровле мантии в этом регионе соответствуют твердофазовому состоянию мантийного вещества. Понижение граничной скорости на поверхности М, вероятнее всего, связано с наличием слоя шпинель-пироксеновой фации мантийных пород. Наиболее близкое положение астеносферы в пределах БРЗ следует ожидать на глубинах 60–70 км.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА

- Belyaevsky N.A. (Ed.), 1970. Rift System of the Earth. Mir, Moscow, 279 p. (in Russian) [Система рифтов Земли / Под ред. Н.А. Беляевского. М.: Мир, 1970. 279 с.].
- Beresnev A.F., Gainanov A.G., Kovylin V.M., Stroev P.A., 1970. The structure of the Earth's crust and the upper mantle of the Sea of Japan and the Pacific zone adjacent to Japan. In: Problems of the Earth's crust and upper mantle structure. Issue 7. Nauka, Moscow, p. 50–61 (in Russian) [Береснев А.Ф., Гайнанов А.Г., Ковылин В.М., Строев П.А. Структура земной коры и верхней мантии Японского моря и прилегающей к Японии зоны Тихого океана // Проблемы строения земной коры и верхней мантии. № 7. М.: Наука, 1970. С. 50–61].
- Cook K.L., 1962. The problem of mantle-crust mix: lateral inhomogeneity in the uppermost part of the Earth's mantle. In: H.E. Landsberg, J. Van Mieghem (Eds.), Advances in geophysics, V. 9, p. 295–360. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60532-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60532-4).
- Dobretsov N.L., 1981. Global Petrological Processes. Nedra, Moscow, 223 p. (in Russian) [Добрецов Н.Л. Глобальные петрологические процессы. М.: Недра, 1981. 223 с.].
- Dobretsov N.L., Ashchepkov I.V., 1991. Composition and evolution of the upper mantle in rift zones (as exemplified by the Baikal rift zone). *Geologiya i geofizika* 1, 5–13 (in Russian) [Добрецов Н.Л., Ащепков И.В. Состав и эволюция верхней мантии в рифтовых зонах (на примере Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика. 1991. № 1. С. 5–13].
- EUGEMI Working Group, 1990. The European geotraverse seismic refraction experiment of 1986 from Genova, Italy, to Kiel, Germany. *Tectonophysics* 176 (1–2), 43–57. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90258-A](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(90)90258-A).
- Golubev V.A., 2007. Conductive and Convective Heat Loss in the Baikal Rift Zone. *Geo*, Novosibirsk, 218 p. (in Russian) [Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академи-

- ческое изд-во «Гео», 2007. 218 с.].
- Gordienko V.V., Tal'-Virsky B.B. (Eds.), 1990. Tectonosphere of Central Asia and Southern Kazakhstan. Nuakova Dumka, Kiev, 232 p. (in Russian) [*Тектоносфера Средней Азии и Южного Казахстана* / Отв. ред. В.В. Гордиенко, Б.Б. Таль-Вирский. Киев: Наукова Думка, 1990. 232 с.].
- Hyndman R.D., Vanyan L.L., Marquis G., Law L.K., 1993. The origin of electrically conductive lower continental crust: saline water or graphite? *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 81 (1–4), 325–345. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(93\)90139-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(93)90139-Z).
- Krylov S.V., Mandel'baum M.M., Mishen'kin B.P., Mishen'kina Z.R., Petrik G.V., Seleznev B.S., 1981. The Baikal Interior (from Seismic Data). Nauka, Novosibirsk, 105 p. (in Russian) [*Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Селезнев В.С.* Недра Байкала (по сейсмическим данным). Новосибирск: Наука, 1981. 105 с.].
- Kuzminykh Yu.V., 1991. Geoelectric structure of Transbaikalia according to the magnetotelluric sounding data. In: Abstracts of IV All-Union Congress on geomagnetism. Vladimir-Suzdal, p. 138–139 (in Russian) [Кузьминых Ю.В. Геоэлектрическое строение Забайкалья по данным магнитотеллурических зондирований (МТЗ) // IV Всесоюзный съезд по геомагнетизму: Тезисы докладов. Владимир-Суздаль, 1991. С. 138–139].
- Lysak S.V., 1988. Heat flow of continental rift zones. Nauka, Novosibirsk, 200 p. (in Russian) [Тепловой поток континентальных рифтовых зон. Новосибирск: Наука, 1988. 200 с.].
- Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandel'baum M.M., Alakshin A.M., Pospiev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M., 2001. The Baikal Rift Basin in the Cenozoic. The Structure and Geological History. Publishing House of SB RAS, GEO Branch, Novosibirsk, 252 p. (in Russian) [Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал «Гео», 2001. 252 с.].
- Perchuk L.L., Vaganov V.I., 1978. The nature of kimberlites in Yakutia. In: Problems of petrology of the Earth's crust and upper mantle. Nauka, Novosibirsk, p. 27–28 (in Russian) [Перчук Л.Л., Ваганов В.И. Природа кимберлитов Якутии // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1978. С. 27–28].
- Pollack H.N., Chapman D.S., 1977. On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness. *Tectonophysics* 38 (3–4), 279–296. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90215-3](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(77)90215-3).
- Popov A.M., Kiselev A.I., Lepina S.V., 1991. Magnetotelluric studies in the Pribaikalie, the deep structure and mechanism of rifting. *Geologiya i geofizika* 4, 106–116 (in Russian) [Попов А.М., Киселев А.И., Лепина С.В. Магнитотеллурические исследования в Прибайкалье, глубинное строение и механизм рифтогенеза // Геология и геофизика. 1991. № 4. С. 106–116].
- Pospiev A.V., 1988. Electrical conductivity of the Earth's crust and mantle of the western part of the Baikal-Amur region. In: The Asthenosphere Revealed by Geophysical Methods. Nuakova Dumka, Kiev, p. 34–44 (in Russian) [Поспеев А.В. Электропроводность земной коры и мантии западной части Байкало-Амурского региона // Астеносфера по комплексу геофизических методов. Киев: Наукова Думка, 1988. С. 34–44].
- Rasskazov S.V., 1993. Magmatism of the Baikal Rift System. Nauka, Novosibirsk, 288 p. (in Russian) [Рассказов С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Наука, 1993. 288 с.].
- Ringwood A.E., 1975. Composition and Petrology of the Earth's Mantle. McGraw-Hill Inc., New York, 672 p.
- Rogozhina V.A., Kozhevnikov V.M. 1979. The Area of the Anomalous Mantle under the Baikal Rift. Nauka, Novosibirsk, 104 p. (in Russian) [Рогожина В.А., Кожевников В.М. Область аномальной мантии под Байкальским рифтом. Новосибирск: Наука, 1979. 104 с.].
- Vanyan L.L., 1981. On models of deep electric conductivity (review). *Izvestiya AN SSSR, ser. Fizika Zemli* 5, 57–66 (in Russian) [Ваньян Л.Л. О моделях глубинной электропроводности (обзор) // Известия АН СССР, серия Физика Земли. 1981. № 5. С. 57–66].
- Zonenshain L.P., Kovalev A.A. (Eds.), 1974. New Global Tectonics. Mir, Moscow, 471 p. (in Russian) [Новая глобальная тектоника / Под ред. Л.П. Зоненшайна, А.А. Ковалева. М.: Мир, 1974. 471 с.].
- Zorin Yu.A., 1971. The Newest Structure and Isostasy of the Baikal Rift Zone and Adjacent Areas. Nauka, Moscow, 168 p. (in Russian) [Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. М.: Наука, 1971. 168 с.].
- Zorin Yu.A., Osokina S.V., 1984. Model of the transient temperature field of the Baikal rift lithosphere. *Tectonophysics* 103 (1–4), 193–204. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(84\)90083-0](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(84)90083-0).



**Поспеев Александр Валентинович**, докт. геол.-мин. наук  
 ЗАО «Восточный геофизический трест»  
 664009, Иркутск, ул. Красноярская, 31/1, 1-й подъезд, оф. 501.  
 e-mail: [avp@ierp.ru](mailto:avp@ierp.ru)

**Pospiev, Alexander V.**, Doctor of Geology and Mineralogy  
 CJSC Eastern Geophysical Trust  
 Office 501, Block 1, 31/1 Krasnoyarskaya street, Irkutsk 664009, Russia  
 e-mail: [avp@ierp.ru](mailto:avp@ierp.ru)