

ТЕПЛОВОЙ ПОТОК И РЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗУПЛОТНЕНИЕ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ В РИФТОГЕННЫХ И ПЛЮМОВЫХ СТРУКТУРАХ НА ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЕ АЗИИ

© 2023 А.М. Петрищевский

*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия, 697016;
e-mail: petris2010@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.09.2022 г.; после доработки 26.12.2022 г.; принята в печать 30.03.2023 г.

Рассмотрены результаты корреляционного анализа тепловых аномалий (Q) и распределений плотностной контрастности (μ_z -параметра) в рифтогенных и плюмовых структурах на восточной окраине Азии, которые доказывают селективную обратную корреляцию этих параметров в интервалах глубин, соответствующих положению подкорового вязкого слоя и астеносферы. Рифтогенные структуры характеризуются разрывами жестких слоев, отображаемых максимумами μ_z -параметра, а структуры центрального типа плюмовой природы — концентрически зональным распределением плотностной контрастности. Основной вклад в тепловые аномалии рифтов вносит подкоровый вязкий слой. Тепловой поток из астеносферы на кайнозойских границах литосферных плит экранирован субдуцирующими слэбами. Одинаковая корреляция Q и μ_z -параметра в удаленных друг от друга районах свидетельствует об одинаковом глубинном строении и универсальности тектонических обстановок на восточной окраине Азии, где в пространстве и времени сопряжены субдукционные, рифтогенные и плюмовые процессы.

Ключевые слова: тепловой поток, тектоносфера, плотностная контрастность, реология, Восточная Азия.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой поток (Q) является диагностическим средством степени разогрева земной коры и верхней мантии и по его измерениям в скважинах определяется температура среды в различных глубинных диапазонах геологического пространства (Викулин, 2004; Сорохтин, Ушаков, 2002; Туезов и др., 1995). Считается, что температура выше 1300°C достаточна для расплавления пород верхней мантии и по изотерме 1300°C , реже 1200°C , проводится поверхность вязкой, текучей или частично расплавленной астеносферы (Структура..., 1995), хотя иногда у подошвы земной коры зонам частичного плавления соответствует температура порядка 1000°C (Петрищевский, 2016а; Тектоносфера..., 1992;).

В переходной зоне кора-мантия существует еще один слой пониженной вязкости (Белявский и др., 2007; Ващилов и др., 2003; Каплун, 2005; Петрищевский, 2008), с увеличением мощности

которого тоже коррелируют тепловые аномалии. Этот слой повсеместно диагностируется по распределениям скорости сейсмических волн и удельных электрических сопротивлений (Белявский и др., 2007). В среднем и нижнем слоях земной коры разогрев приводит к понижению отражающей способности сейсмических волн (Klemperer, 1987). Еще одним индикатором подкорового вязкого слоя и астеносферы являются минимумы плотностной контрастности (μ_z -параметра) (Петрищевский, 2008, 2013а, 2013б, 2014, 2021; Петрищевский, Юшманов, 2011; Петрищевский и др., 2021). Существование двух слоев пониженной вязкости в верхней мантии является фундаментальным свойством тектоносферы на восточной окраине Азии.

При отсутствии дорогостоящих сейсмических и электромагнитных наблюдений единственным и недорогим индикатором обнаружения и средством пространственной параметризации вязких сред являются минимумы плотностной контрастности.

В настоящей статье анализируется корреляционная связь плотностной контрастности (μ_z -параметра) с аномалиями теплового потока и температуры на восточной окраине Азии с целью определения вероятной глубины залегания зон частичного плавления в верхней мантии. Там, где отсутствуют данные о распределении температуры, и в случае редкой сети скважин, такая связь, в благоприятных случаях, может быть использована для определения и пространственной параметризации глубинных источников тепловых аномалий.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Теоретической основой построения рассматриваемых гравитационных моделей являются два доказательства в теоремах единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала:

1 – для всякого тела с переменной плотностью существует эквивалентное тело с постоянной плотностью, а потенциалы системы (множества) источников и эквивалентного односвязного звездного источника равны, если их массы и расположение центров масс совпадают (Зидаров, 1986; Иванов, 1956; Цирульский и др., 1980; Шашкин, 1958).

2 – потенциалы объемного и сферического источников с общим центром тяжести равны, следствием чего является прием выметания объемных масс на поверхность эквивалентных сфер, впервые предложенный Анри Пуанкаре (Evans, 1933).

Метод, результаты реализации которого рассматриваются ниже, оперирует не с конечно-метрическими геологическими телами, а с эквивалентными областями, число и пространственное расположение элементарных плотностных неоднородностей внутри которых неизвестно (микститовая среда). Расчетные пересечения эквивалентных областей являются случайными, поэтому результаты расчетов рассматриваются как вероятностно-детерминистские.

В качестве основы модельных построений использованы мировой каталог гравиметрических данных (Land Gravity data (<http://bgi.obs-mip.fr/data-products/gravity-databases/land-gravity-data/>)), содержащий цифровой массив значений аномалий Буге по сети $0.42' \times 0.42'$ на территориях Японского моря, Юго-Восточного Китая и северо-запада Соединенных Штатов Америки. Государственная гравиметрическая карта Российской Федерации М 1 : 2 500 000 использована на территориях Северо-Востока России и Охотского моря. На широтных профилях, пересекающих гравиметрические карты через 0.5° , с шагом 5 км были построены

графики аномалий Буге, по которым рассчитаны глубины залегания источников квази-симметричных аномалий и плотностная контрастность (μ_z -параметр) на отрезках между центрами плотностных неоднородностей и поверхностями эквивалентных сфер, на которые выметались, по Пуанкаре (Evans, 1933), аномальные массы этих источников по алгоритму:

$$\mu_z = \frac{VzmZ_0}{4\pi K(Z_0 - Hc)^2}$$

Носителем информации о плотностной контрастности геологических сред между центрами эквивалентных квази-изометричных плотностных неоднородностей (Z_0) и поверхностями (Hc), на которые выметаются, по Пуанкаре, их аномальные массы, является μ_z -параметр (Петрищевский, 2013а, 2020), где: Z_0 — глубина залегания центра масс, однозначно определяемая в случайном пересечении поля источника гравитационной аномалии, Vzm — амплитуда локального симметричного гравитационного возмущения, Hc — глубина залегания поверхности, на которую выметаются массы источников, K — гравитационная постоянная. Точный физический смысл μ_z -параметра, характеризующего вещественные свойства геологического пространства, можно определить как поверхностную плотность сферы, эквивалентную объемному источнику, и нормированную по глубине залегания центра масс. Более простое геофизическое определение: «плотностная контрастность».

Исследуемое геологическое пространство разбивалось на 15 слоев (табл. 1) и источники каждого слоя выметались на поверхности эквивалентных сфер, касательных к поверхностям слоев. Выполнялось условие: $Hc < Z_0$, а пиковые значения μ_z -параметра сглаживались до значения $\mu_z = 60 \times 10^{-2}$ кг/м²/км. В результате вычислений формировалась цифровая 3D-модель $\mu_z(x, y, Hc)$, которая являлась исходным материалом для построения распределений плотностной контрастности в горизонтальных срезах и вертикальных разрезах тектоносферы.

Более подробно теоретические основы и технология построения 3D-моделей распределений плотностной контрастности изложены в предшествующих работах автора (Петрищевский, 2013а, 2020а). Идеологически и конструктивно метод близок к методам, использующим отношения производных гравитационного потенциала (Блох и др., 1993; Zhang et al., 2000), от которых он отличается переменным размером расчетного окна (Петрищевский, 2020а) и измерением локальных амплитуд гравитационных аномалий.

Методика моделирования распределений плотностной контрастности протестирована при изучении 12 районов Дальневосточного

Таблица 1. Разбиение тектоносферы на слои**Table 1.** Partitioning of the tectonosphere into layers

интервал $Z_1 - Z_{2\text{км}}$	11–20	16–25	21–30	27–40	32–45	37–50	42–60	52–70	62–80	72–90
Нс, км	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70
интервал $Z_1 - Z_{2\text{км}}$	82–100	92–120	105–130	125–150	155–250					
Нс, км	80	90	100	120	150					

региона России (Петрищевский, 2008, 2013, 2016а; Петрищевский, Юшманов, 2011, 2014, 2021), Западной Сибири (Петрищевский, Исаев, 2017), Восточного Китая (Петрищевский, 2020б, 2019); Австралии (Петрищевский, 2016б, 2019) и Северо-Запада Соединенных Штатов Америки (Петрищевский и др., 2020). Результаты тестирования показали, что μ_z -параметр является индикатором реологического состояния геологических сред. Высоким и повышенным значениям этого параметра соответствуют древние жесткие метаморфические блоки кратонов и террейны кратонного типа, низким и пониженным значениям — зоны дробления и трещиноватости, аккреционные призмы и турбидитовые террейны, а также зоны флюидно-гидротермальной проработки в разломах и апикальных частях структур центрального типа разного ранга. В разрезах земной коры максимальными значениями плотностной контрастности повсеместно соответствуют гранитно-метаморфический и нижнекоровый мафический слои земной коры, разделяемые тонким слоем пониженной вязкости. В верхней мантии высоким значениям μ_z -параметра соответствует нижний жесткий слой литосферы. В разрезах тектоносферы низкие значения μ_z -параметра повсеместно совпадают с зонами пониженных скоростей сейсмических волн и удельных электрических сопротивлений (Петрищевский, 2008, 2016б, 2013а, 2013б; Петрищевский, Юшманов, 2011).

Связь теплового потока с аномалиями плотностной контрастности в разных глубинных срезах объемной μ_z -модели определена с помощью корреляционного анализа в программной среде Excel. Такая связь исследована в трех рифтогенных и двух плюмовых структурах на Востоке Азии. В непрерывном пространственном диапазоне плотностной контрастности были вычислены коэффициенты корреляции Q и μ_z (Нс), а в пиковых значениях коэффициента корреляции: ковариации этих параметров, уравнения регрессии и достоверность аппроксимации.

Исходными данными корреляционного анализа являются опубликованные схемы распределений интенсивности теплового потока (ссылки приводятся в тексте и подрисуночных подписях) и схемы распределений плотностной

контрастности, составленные по описанной методике. В Охотоморской регионе, кроме того, использованы ранее составленные модели распределений температуры (Петрищевский, 2016а), дополняющие связь плотностных аномалий с тепловым режимом тектоносферы.

На территориях Верхояно-Колымской, Южно-Охотской зон растяжения и Эмейшаньского плюма вычисления коэффициента корреляции выполнены непосредственно в точках определений теплового потока, а в Япономорском и Катазиатском регионах — в общих точках регулярной сети.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ ПЛОТНОСТНОЙ КонтРАСТНОСТИ ТЕКТОСФЕРЫ С ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ В РИФТОГЕННЫХ И ПЛУМОВЫХ СТРУКТУРАХ ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Верхояно-Колымская зона растяжения-сдвига. Эта структура (рис. 1) расположена на границе Евразийской и Северо-Американской плит (Тектоника..., 2001) и она также известна под названиями зоны Адыча-Тенькинского, или Тенькинского (Петрищевский, Юшманов, 2021; Шахтыров, 2009; Юшманов, 2019), глубинного разлома шириной порядка 200 км и простиранием 1500 км. В меловое время в этой зоне произошло внедрение больших объемов гранитоидных магм, сформировавших Главный приразломный Колымский гранитоидный пояс (Геодинамика..., 2006; Тектоника..., 2001). В начальный период геологической истории этой структуры (юра-нижний мел) здесь происходили субдукционные процессы, сопровождавшиеся надвиганием Колымо-Омолонского супертеррейна на Северо-Азиатский кратон, затем сжатие сменилось растяжением (Момский рифт), а в неогене произошли сдвиговые деформации (Тектоника..., 2001; Шахтыров, 2009; Юшманов, 2019).

В гравитационных моделях, отражающих реологические свойства геологических сред, Верхояно-Колымская зона растяжения-сдвига проявлена минимумом плотностной контрастности в большинстве срезов μ_z -модели (Петрищевский, Юшманов, 2021). Корреляция минимумов

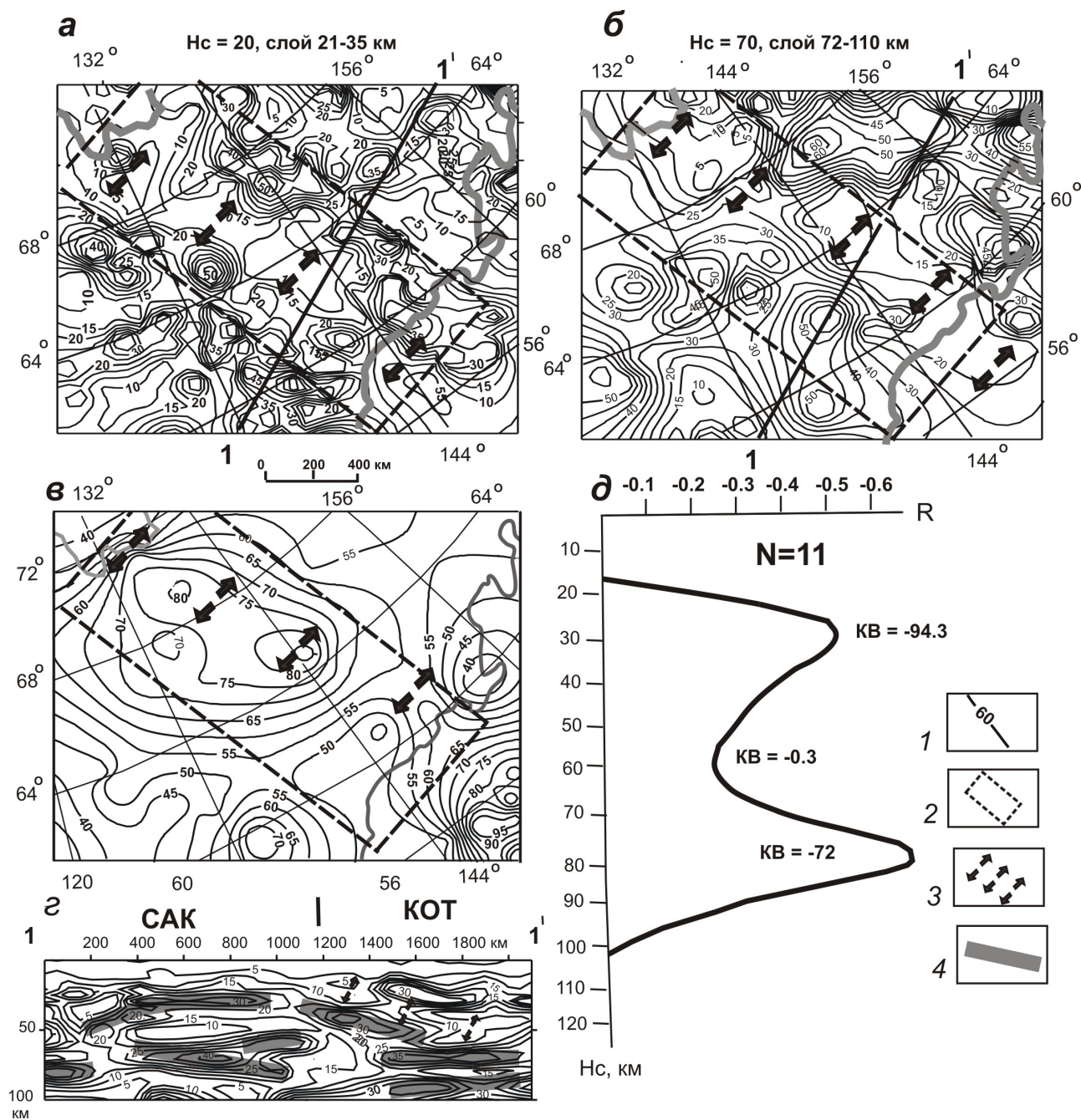


Рис. 1. Плотностная контрастность (*a*, *б*, *з*), интенсивность теплового потока (*в*) и коэффициент корреляции Q и μ_z в разных глубинных срезах $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели (*д*) Верхояно-Колымского региона: 1 — изолинии плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2} кг/м²/км) на схемах «*a*, *б*, *з*» и тепловый поток (мВт/м²) на схеме «*в*» (осреднение по данным (Горнов, 2015)); 2 — контур площади корреляционного анализа; 3 — Верхояно-Колымская (Адыча-Тенькинская) зона растяжения-сдвига; 4 — жесткие пластины в земной коре и верхней мантии. Обозначения структур над разрезом: САК — Северо-Азиатский кратон, КОТ — Колымо-Омолонский супертеррейн. H_c — глубина среза $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели. 1-1' — местоположение профиля, представленного на (*з*).

Fig. 1. Density contrast (*a*, *б*, *з*), heat flow (*в*) and correlation coefficient of Q and μ_z in different depth slices of $\mu_z(x, y, H_c)$ -model of the Verkhoyansk-Kolyma region: 1 — isolines of density contrast (1 unit = 10^{-2} kg/m²/km on schemes «*a*-*б*, *з*» and isolines of heat flow (mW/m²) on scheme «*в*» (averaged from data of (Gornov, 2015)); 2 — contour of area of correlation analysis; 3 — the Verkhoyansk-Kolyma (Adycha-Tenkinskaya) extension-slip zone; 4 — rigid plates in the crust and upper mantle. Notations of the structures above the section: САК — North Asian craton, КОТ — Kolyma-Omolon superterrane. H_c is the depth of the slice of $\mu_z(x, y, H_c)$ -model. 1-1' — the location of the profile presented in (*з*).

μ_z -параметра с тепловым потоком отображена на рис. 1д. Пиковые значения коэффициента корреляции этих параметров установлена на двух глубинных уровнях: 30 и 80 км. Первый уровень совпадает с подошвой земной коры, а второй — с подошвой литосферы. Соответствующие зоны реологического разуплотнения залегают в интервалах глубин 28–45 и 70–90 км. Гравитационные модели (рис. 1а, б, в) показывают, что подкоровый вязкий слой занимает наклонное положение и по нему Колымо-Омолонский супертеррейн, обычно относимый к Северо-Американской плите (Геодинамика..., 2006; Тектоника..., 2001), был надвинут на окраину Северо-Азиатского кратона. В результате на восточной границе последнего сформировалась Верхояно-Колымская складчато-надвиговая система.

По полученным данным (рис. 1д) установлено что, наибольший вклад в тепловые аномалии Верхояно-Колымской зоны растяжения-сдвига вносит астеносфера, кровля которой располагается здесь на глубине 65–80 км (Вашилов и др., 2003).

Южно-Охотский рифт. Южно-Охотский, или Южно-Курильский, рифт расположен в юго-восточной части Охотского моря (рис. 2). Структура характеризуется высоким тепловым потоком ($Q > 80$ мВт/м²) и сокращением мощности земной коры до 13 км (Пискарев и др., 2012). На глубинах 20, 70 и 100 км Южно-Охотский рифт отмечается линейным минимумом плотностной контрастности, а на глубине 50 км в его зоне концентрируются локальные минимумы плотностной контрастности, диагностирующие реологическое разуплотнение тектонических масс (Петрищевский, 2016а). Наилучшей корреляцией плотностной контрастности с тепловыми аномалиями характеризуется слой в интервале глубин 21–35 км (рис. 2д, $H_c = 20$ км), соответствующий подкоровому вязкому слою. Температура на глубине 20 км (рис. 2б, 2в) составляет здесь, в среднем, около 800°C, что в два раза выше средней на Земле температуры у подошвы земной коры — 400°C (Сорохтин, Ушаков, 2002).

Коэффициент корреляции интенсивности теплового потока и плотностной контрастности на этой глубине максимальный (рис. 2е). В разрезе 3D μ_z -модели (рис. 2в) Южно-Охотский рифт сопровождается минимумом плотностной контрастности (μ_z -параметра) до глубины 25–28 км, указывающим на раздробление и флюидно-магматическую проработку зоны рифта. Зона реологического разуплотнения ниже глубины 20 км залегают наклонно (рис. 2в) и способствует надвиганию тихоокеанской коры на Охотоморскую плиту. Два других максимума корреляции Q и μ_z на глубинах 50 и 100 км соответствуют положению вязких, или текучих магм, перемешанных

с кристаллическими фрагментами литосферы в зоне субдукции Тихоокеанской плиты под Охотоморскую (Геодинамика..., 2006). Наименьшая корреляция Q и μ_z на в интервале глубин 70–80 км соответствует положению океанического слэба, экранирующего астеносферу. На этой глубине концентрируется рой глубоководных землетрясений, очерчивающий контуры слэба в плане (Петрищевский, Злобин, 2004).

В Охотском море существует еще один источник тепла — Охотоморский плюм, центр которого приурочен к подводной возвышенности Института Океанологии (Петрищевский, 2013а, 2016а; Петрищевский, Злобин, 2004). Астеносферная часть Охотоморского плюма имеет грибовидную форму (рис. 3в), характерную для этого типа структур. Широкий минимум плотностной контрастности в срезе на глубине 100 км (рис. 3а) совпадает с максимумом теплового потока (рис. 3б), т.е. и в этой структуре наблюдается отчетливая обратная корреляция Q и μ_z . Южно-Охотский рифт, в свою очередь, сопровождается интенсивной линейной аномалией теплового потока (рис. 3б). Выполненные исследования показывают, что основной вклад в тепловые аномалии Южно-Охотского рифта вносит подкоровая зона реологического разуплотнения, а астеносфера экранируется субдуцирующей Тихоокеанской плитой.

Япономорский плюм. Рифтогенное происхождение Японского моря признается всеми исследователями (Геодинамика..., 2006), однако в последнее время многие из них склоняются к выводу, что при образовании Японского моря определенную роль сыграли плюмовые процессы (Емельянова и др., 2020; Леликов и др., 2018; Петрищевский и др., 2021). На существование структуры центрального типа плюмовой природы под Японским морем указывают: широкие минимумы плотностной контрастности в интервалах глубин 15–50 км (рис. 4а, 4б), аномалия теплового потока (рис. 4в), точно вписывающаяся в контуры береговых линий, и широкое присутствие мантийных адакитов в составе вулканических пород (Емельянова и др., 2020; Петрищевский и др., 2021). Астеносферная линза в голове Япономорского плюма имеет типичную для плюмов грибовидную форму и приближается к поверхности до глубины 80 км (рис. 4з),

Коррелируемость аномалий Q и μ_z наблюдается здесь в двух интервалах глубин: 40–60 км и, в меньшей степени — 110–130 км. Так же как в Охотском море (рис. 1), в интервале глубин 60–110 км астеносфера экранируется жесткой пластиной, природа которой остается неясной. С одной стороны, она может быть фрагментом континентальной литосферы, а с другой —

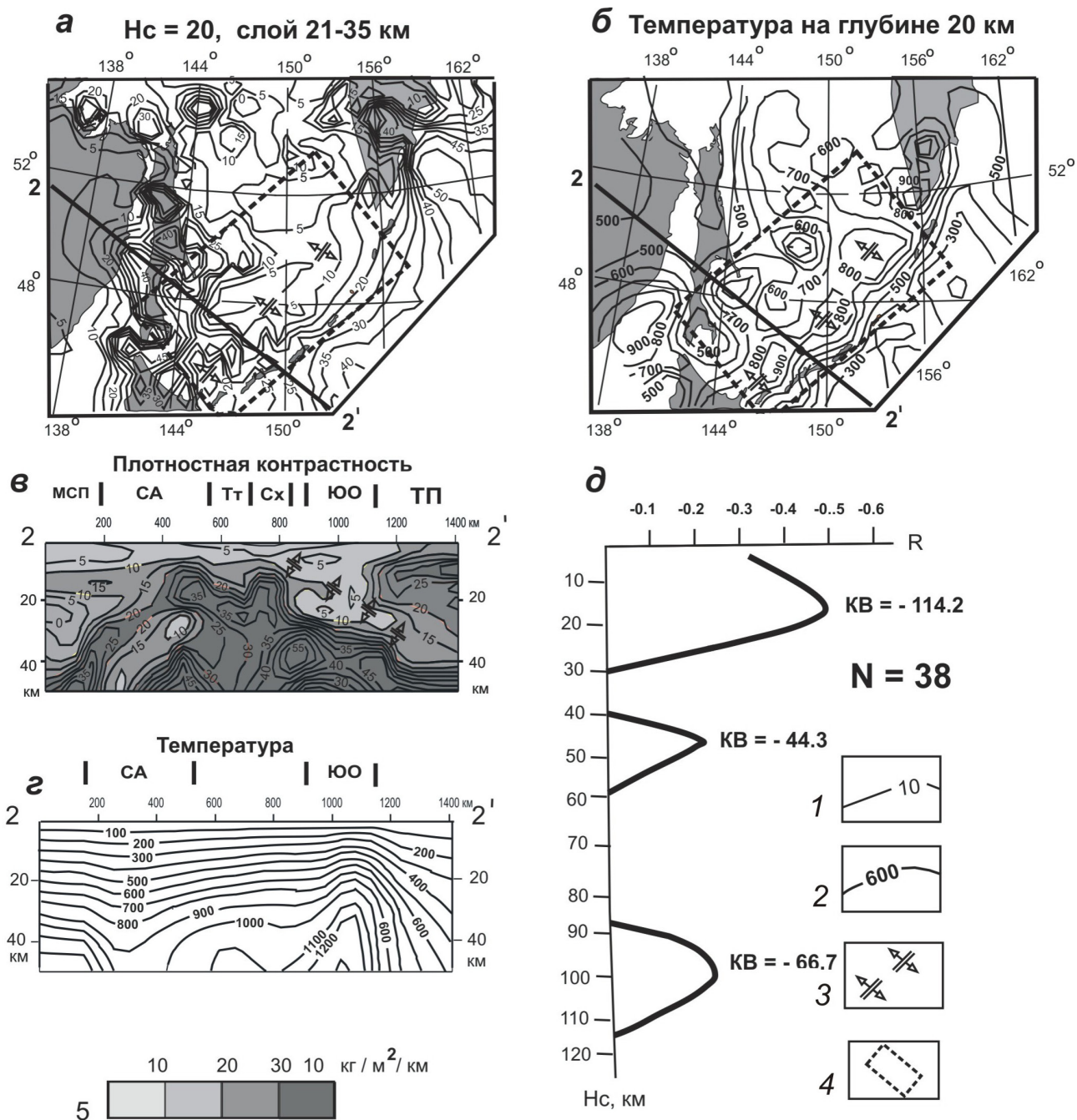


Рис. 2. Плотностная контрастность (а, в), температура (б, з) и коэффициент корреляции Q и μ_z в разных глубинных срезах μ_z (x, y, H_c)-модели (д) Южно-Охотского рифта: 1 — изолинии плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2} кг/м²/км); 2 — изотермы температуры, °С (Петрищевский, 2016б); 3 — Южно-Охотский рифт; 4 — контур площади корреляционного анализа. Обозначения структур над разрезом: МСП — Мая-Селемджинский плум (Петрищевский, Юшманов, 2011), СА — Сихотэ-Алинская аккреционно-складчатая система, ТТ — Татарский рифт, Сх — остров Сахалин, ЮО — Южно-Охотский рифт, ТП — Тихоокеанская плита. H_c — глубина среза μ_z (x, y, H_c)-модели. 2–2' — местоположение профиля, представленного на (з).

Fig. 2. Density contrast, heat flow (a, v), temperature (b, z) and the correlation coefficient Q and μ_z in different depth sections of μ_z (x, y, H_c)-model (d) of the South Okhotsk Sea rift: 1 — isolines of density contrast, 10^{-2} kg/m²/km; 2 — temperature isotherms, °C (Петрищевский, 2016б); 3 — South-Okhotsk rift; 4 — contour of correlation analysis area. Notations of the structures above the section: МСП — Maya-Selemdzha plume (Петрищевский, Юшманов, 2011), СА — Sikhote-Alin accretion-fold system, ТТ — Tatar Rift, Сх — Sakhalin Island, ЮО — South-Okhotsk rift, ТП — Pacific plate. H_c — depth of horizontal section of μ_z (x, y, H_c)-model. 2–2' — the location of the profile presented on (z).

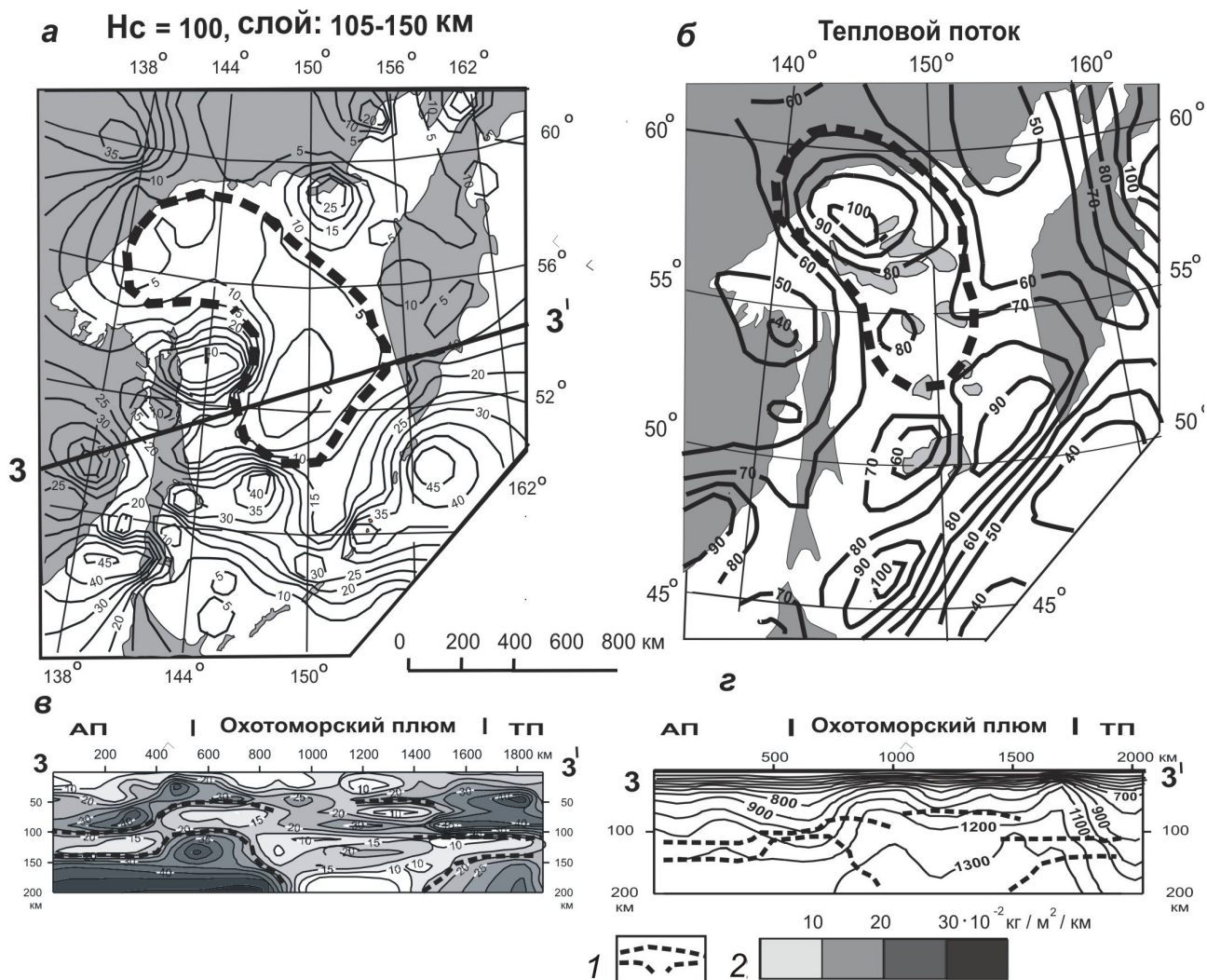


Рис. 3. Плотностная контрастность (а, в), интенсивность теплового потока (б) и температурный разрез (Петрищевский, 2016б) (з) тектоносферы Охотоморского региона: 1 — контуры Охотоморского плюма; 2 — шкала раскраски разреза «в». АП — Амурская плита. Другие обозначения см. на рис. 2. 3–3' — местоположение профиля, представленного на (з).

Fig. 3. Density contrast (a, v), heat flow (б) and the temperature section (Петрищевский, 2016б) (з) of the Okhotsk Sea Region tectonosphere. 1 — contours of the Okhotsk Sea plume; 2 — coloring scale of the section «в». АП — Amur plate. For other notations, see Fig. 2. 3–3' — the location of the profile presented in (з).

фрагментом Тихоокеанской, поскольку в разрезе μ_z -модели прослеживается позднемеловая субдукция океанического слэба в западном районе Японского моря (рис. 4з). На границе Тихоокеанской плиты с Японской островной дугой плита расщеплена и зона расщепления заполнена астеносферой (рис. 4з).

График корреляции Q и μ_z (рис. 4д) точно соответствует картам-срезам распределений плотностной контрастности. По полученным данным (рис. 4) основным источником тепловых аномалий в Япономорском регионе является подкорový вязкий слой. Меньший вклад вносит астеносфера, экранированная в интервале глубин 60–110 км тихоокеанским субдуцирующим слэбом.

Катазиатская структура растяжения-сдвига.

Катазиатский рифт расположен на границе Катазиатского блока со складчатым поясом Яньнань (рис. 5а) (Chen, Xie, 2017; He et al., 2013; Xia et al., 2018). Иногда (Wanget et al., 2010) этот пояс относят к восточному флангу плиты Янцзы. На большинстве тектонических схем границей этих структур является разлом Ченьжоу-Линву (рис. 5а). По геологическим данным на этой границе установлены признаки растяжения (Ren et al., 2002) и вязкого сдвига (Faure et al., 2017; Wang et al., 2011; Yao et al., 2016).

Структурное положение и геофизические аномалии в зоне растяжения идентичны Верхояно-Колымской зоне растяжения-сдвига. Мощность земной коры в Катазиатском блоке

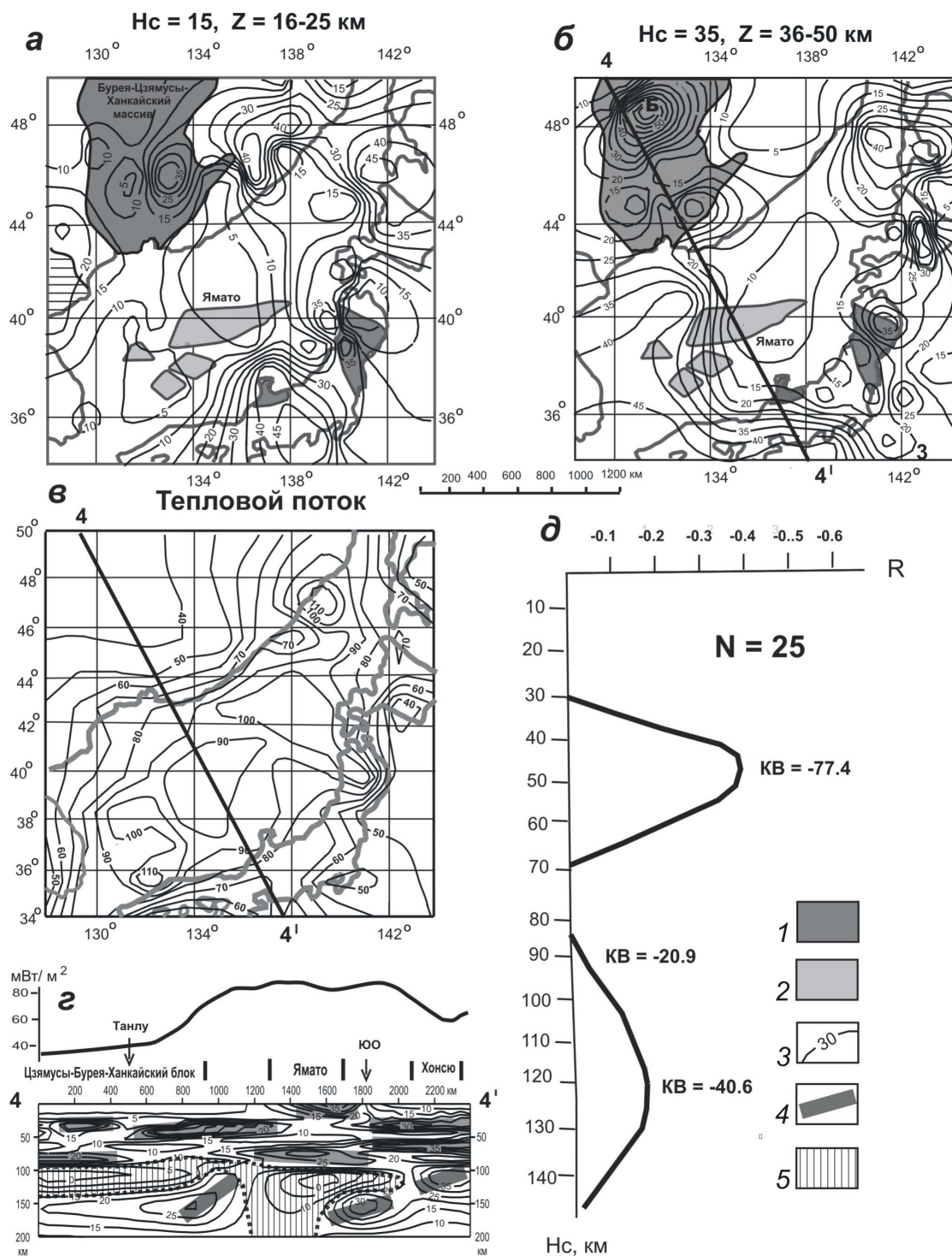


Рис. 4. Плотностная контрастность (а, б, г), интенсивность теплового потока, осредненного по данным (Веселов, 2005) (в) и коэффициент корреляции Q и μ_z в разных глубинных срезах $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели (д) Япономорского региона: 1 — допалеозойские комплексы; 2 — подводные возвышенности в Японском море (Изосов и др., 2000); 3 — изолинии плотностной контрастности (1 ед. = $10^{-2} \text{ кг/м}^2/\text{км}$) на схемах «а-б» и в разрезе «г», и теплового потока (мВт/м^2) на схеме «в»; 4 — жесткие пластины в земной коре и верхней мантии; 5 — астеносфера в разрезе («г»). Обозначения структур над разрезом: ЮО — Южно-Охотский рифт. H_c — глубина среза $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели. 4-4' — местоположение профиля, представленного на (г)

Fig. 4. Density contrast (a-b, g), heat flow, averaged from data (Veselov, 2005) (v) and correlation coefficient of Q and μ_z in different depth sections of $\mu_z(x, y, H_c)$ -model (d) of the Japan Sea Region 1 — pre-Paleozoic strata; 2 — underwater rises in the Japan Sea (Izosov et al., 2000); 3 — isolines of density contrast (1 unit = $10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{km}$) on schemes «a-b» and in the section «g», and heat flow (mW/m^2) on scheme «v»; 4 — rigid plates in the crust and upper mantle; 5 — asthenosphere in the section («g»). Designations of the structures above the section: ЮО — South-Okhotsk Rift. H_c — depth of section of the $\mu_z(x, y, H_c)$ -model. 4-4' — the location of the profile represented in (g).

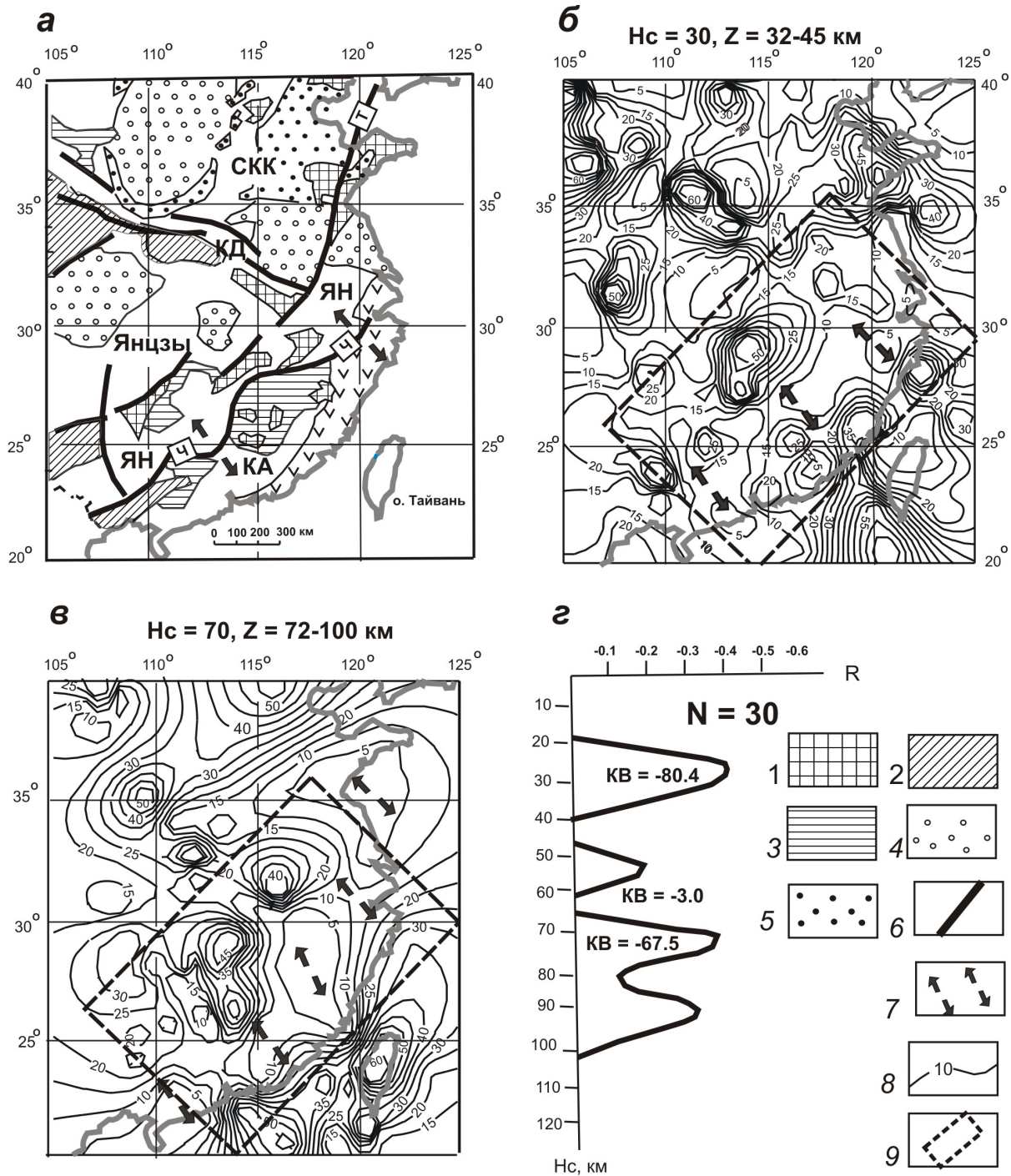


Рис. 5. Тектоническая схема (а) (Wang et al., 2010; Zhai, Zhou, 2015), плотностная контрастность (б, в), и коэффициент корреляции Q и μ_z в разных глубинных срезах $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели (г) тектоносферы Юго-Восточного Китая: 1 — допалеозойский фундамент; 2–3 — чехол и складчатые комплексы: неопротерозойские и раннепалеозойские (2), палеозойские (3); 4–5 — осадочные бассейны: мезозойские (4) и кайнозойские (5); 6 — разломы: Т — Танлу, Ч — Ченьжоу-Линву; 7 — Катазиатская (Ченьжоу-Линву) зона растяжения-сдвига (Ren et al., 2002); 8 — изолинии плотностной контрастности; 9 — контур площади корреляционного анализа. Обозначения структур: СКК — Северо-Китайский кратон, складчатые пояса: КД — Кунлинь Даби, ЯН — Яннань, КА — Катазиатский блок. H_c — глубина среза $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели.

Fig. 5. Tectonic scheme (а) (Wang et al., 2010; Zhai and Zhou, 2015), density contrast (б–в), and correlation coefficient of Q and μ_z in different depth sections of $\mu_z(x, y, H_c)$ -model (г) of the Southeast China tectosphere. 1 — pre-Paleozoic basement; 2–3 — cover and folded complexes: Neoproterozoic and Early Paleozoic (2), Paleozoic (3); 4–5 — sedimentary basins: Mesozoic (4) and Cenozoic (5); 6 — faults: Т — Tanlu, Ч — Chenzhou-Linwu; 7 — Katasian (Chenzhou-Linwu) transensional zone (Ren et al., 2002); 8 — isolines of density contrast; 9 — contour of the correlation analysis area. Notations of the structures: СКК — North China Craton, folded belts: КД — Qinling Dabie, ЯН — Jiangnan; КА — Katasian Block. H_c — depth of section of section of the $\mu_z(x, y, H_c)$ -model.

сокращена до 25–30 км (Li, 2010; Zhou et al., 2012), а интенсивность теплового потока составляет, в среднем, более 70 мВт/м² (Лысак, 2009; Тао, Shen, 2008). Скорость сейсмических волн под Катазиатским блоком в среднем слое земной коры понижена до 5.8–6.2 км/с (Li, 2010; Zhang, Wang, 2007), а в подкоревой мантии — до 8.05 км/с (Zhou et al., 2012) что свидетельствует о значительной переработке этого блока глубинными флюидно-магматическими процессами. По данным сейсмической томографии верхняя мантия Катазиатского блока тоже разуплотнена, что соответствует резкому понижению скорости поперечных сейсмических волн до 4.3 км/с в интервале глубин 70–130 км (Zhou et al., 2012) и приближению астеносферы до глубины 60–70 км (Wang, 2007; Zhang, 2000; Zhu et al., 2006).

В Катазиатском блоке петрологический анализ изверженных пород (Cai et al., 2019; Wang et al., 2010), определил существование двух тектонических обстановок. В период 160–195 млн лет назад

здесь проявились субдукционные процессы. По мнению большинства исследователей, последующие мезозойские и кайнозойские рифтогенные процессы на территории Юго-Восточного Китая (Катазиатский блок и прилегающие фланги плиты Янцзы) протекали длительное время в интервале 175–80 млн лет (Li, 2010).

Катазиатская (Ченьжоу-Линву) зона растяжения-сдвига проявлена минимумами в срезах на глубине 30 км (рис. 5б) и 70 км (рис. 5в), а в разрезах — в интервале глубин 60–150 км (рис. 6б). Зона растяжения сопровождается разрывом жестких тектонических пластин — типичным признаком рифтов (Петрищевский, 2013а, 2019; Петрищевский и др., 2021).

Сдвиговая составляющая в зоне растяжения выражена изгибом глубинного разлома Ченьжоу-Линву (рис. 5а) и дугообразной форме оси рифта (рис. 5в, 6а). По геологическим данным (Jia et al., 2020; Wang et al., 2011) в зоне растяжения Ченьжоу-Линву обнаружены признаки косой

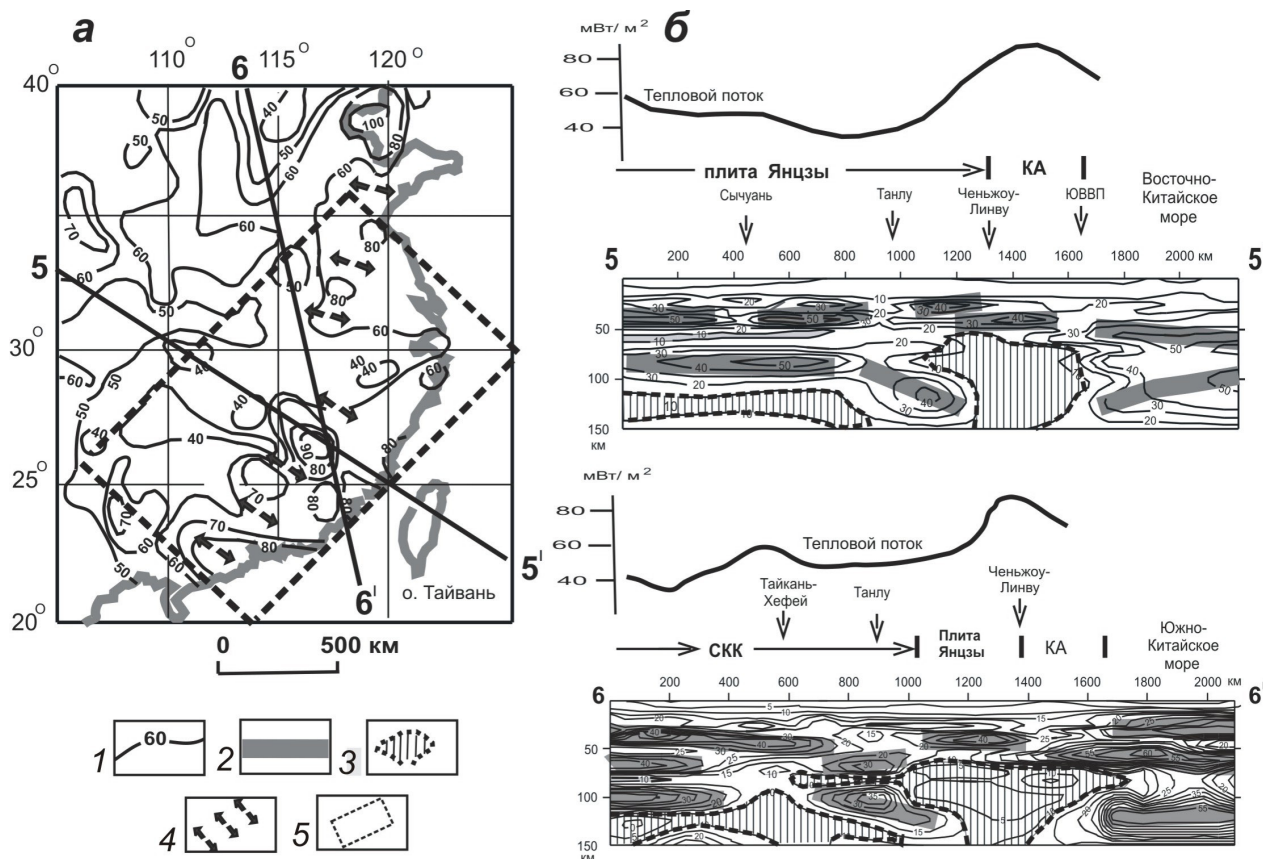


Рис. 6. Интенсивность теплового потока (а) и разрезы $\mu_z(x, y, N_c)$ -модели (б) в Юго-Восточном Китае 1 — изолинии теплового потока, (мВт/м²) (Лысак, 2009); 2 — жесткие пластины в разрезах; 3 — астеносфера; 4 — зона растяжения; 5 — контур площади корреляционного анализа. Обозначения структур над разрезами: КА — Катазиатский блок, ЮВВП — Юго-Восточный вулканический пояс, СКК — Северо-Китайский кратон. N_c — глубина среза $\mu_z(x, y, N_c)$ -модели. 5–5' и 6–6' — местоположение профилей, представленных на (б).

Fig. 6. Heat flow (a) and $\mu_z(x, y, N_c)$ -model sections (б) in Southeast China. 1 — heat flow isolines, mW/m² (Lysak, 2009); 2 — rigid plates in the sections; 3 — asthenosphere; 4 — extension zone; 5 — contour of the correlation analysis area. Notations of the structures above the sections: КА — Catasian Block, ЮВВП — Southeast Volcanic Belt, СКК — North China craton. N_c — locations of the profiles presented in (б).

субдукции, т.е. субдукция и последующее растяжение сопровождались (или завершались) трансформным сдвигом, параллельным границе континента.

Зона растяжения Ченжоу-Линву отмечается цепью локальных аномалий теплового потока интенсивность 70–80 мВт/м² (рис. 6а). Так же как и минимумы плотностной контрастности (рис. 5в), юго-западная и северо-восточная части зоны растяжения на схеме теплового потока (рис. 6а) смещены относительно друг друга вследствие трансформного сдвига.

Корреляционный анализ Q и μ_z в точках регулярной сети обнаружил три максимума отрицательного коэффициента корреляции этих параметров на глубинах 30, 70 и 90 км (рис. 5з). Первый соответствует подошве земной коры, второй и третий — астеносфере, разделяемой океаническим слэбом, субдуцированным под Катазиатскую литосферу со стороны Южно-Китайского моря. График коэффициента корреляции (рис. 5з) очень похож на график связи Q и μ_z -параметра в Охотоморском регионе (рис. 1д), где так же на границе Тихоокеанской плиты с Охотоморской совмещены следы субдукционных и рифтогенных процессов.

Эмейшаньский плюм. В зоне влияния Эмейшаньского плюма на границе Тибета и плиты Янцзы установлен (Jiang et al., 2018) повышенный тепловой поток в его внутренней зоне и нормальный поток в промежуточной зоне (рис. 7в). Центральная (внутренняя) зона плюма приурочена к пересечению двух зон растяжения (рис. 7б, 7г). В срезах μ_z -модели на глубинах 40 и 70 км (рис. 7а, 7б) центр плюма сопровождается минимумом плотностной контрастности. Горизонтальное смещение контура внутренней зоны плюма относительно подкорового μ_z -минимума (рис. 7а) может быть обусловлено сдвигом по разлому Аджань-Сяоджинь (Agjiang–Xiaojine) на границе Тибета с плитой Янцзы. Такие сдвиги сопровождают большинство зон растяжения на востоке Азии: Адыча-Тенькинскую на северо-востоке континента (Юшманов, 2019), Танлу в Северо-Восточном Китае (Ren et al., 2002), Центральную и Ямато в Японском море (Петрищевский и др., 2021), Ченьжоу-Линву в Юго-Восточном Китае (Jia et al., 2020). Обратная корреляция теплового потока с реологическим разуплотнением (μ_z -минимумами) в верхней мантии Эмейшаньского плюма установлена в интервалах глубин 35–45 и 75–90 км (рис. 7д), которые соответствуют глубинам залегания подкорового вязкого слоя и астеносферы.

Общие закономерности. Результаты корреляционного анализа связи интенсивности теплового потока с плотностной контрастностью переходного слоя «кора-мантия» и астеносферы

в точках максимального коэффициента корреляции сведены в таблице 2. Графические образы корреляции интенсивности теплового потока с плотностной контрастностью в области экстремумов коэффициента корреляции представлены на рисунке 8.

Как следует из приводимых данных (табл. 2; рис. 8), в трех регионах (Верхояно-Колымском, Южно-Охотском и Эмейшаньском) значимость коэффициентов корреляции по шкале Чеддока соответствует средним, или близким к ним, значениям. Эти оценки примерно совпадают с оценками в таблице 2.

В двух регионах (Япономорском и Катазиатском) коэффициенты корреляции Q и μ_z понижены до 0.38–0.40, однако их распределения по глубинам среза 3D-моделей плотностной контрастности характеризуется такой же дискретностью (рис. 4д, 5з), которая наблюдается в других регионах (рис. 1д, 2д, 7в), где интенсивность теплового потока определена в точках непосредственного вычисления в скаважинах. Очевидно, что корреляционный анализ Q и μ_z в точках регулярной сети менее репрезентативен по сравнению с вычислениями Q в точках его непосредственного определения.

Повышенным значениям коэффициента корреляции (R) соответствуют повышенные значения ковариации Q и μ_z (табл. 2; рис. 1, 2, 4, 5, 7), что служит подтверждением зависимости сравниваемых параметров при корреляционном анализе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты корреляционного анализа связи тепловых аномалий с распределениями плотностной контрастности (μ_z -параметра) в трех рифтогенных и двух плюмовых структурах Восточной Азии доказывают селективную обратную корреляцию μ_z -минимумов высокой интенсивностью теплового потока в сопоставимых интервалах глубин (табл. 2).

В рифтогенных структурах корреляция наблюдается в интервалах глубин: 20–40 и 70–95 км. Аномальными свойствами характеризуется Южно-Охотский рифт, мощность земной коры в котором составляет 13 км (Пискарев и др., 2012), а астеносферы, судя по распределениям температуры (рис. 2з) 45–50 км. В этой структуре основной вклад в тепловой поток вносит подкоровый вязкий слой.

В надплюмовом пространстве (Япономорский и Эмейшаньский плюмы) корреляция проявлена в интервалах глубин 33–60 и 80–130 км. Из этого следует, что, с одной стороны, минимумы плотностной контрастности отображают участки горячей, вероятно частично или полностью

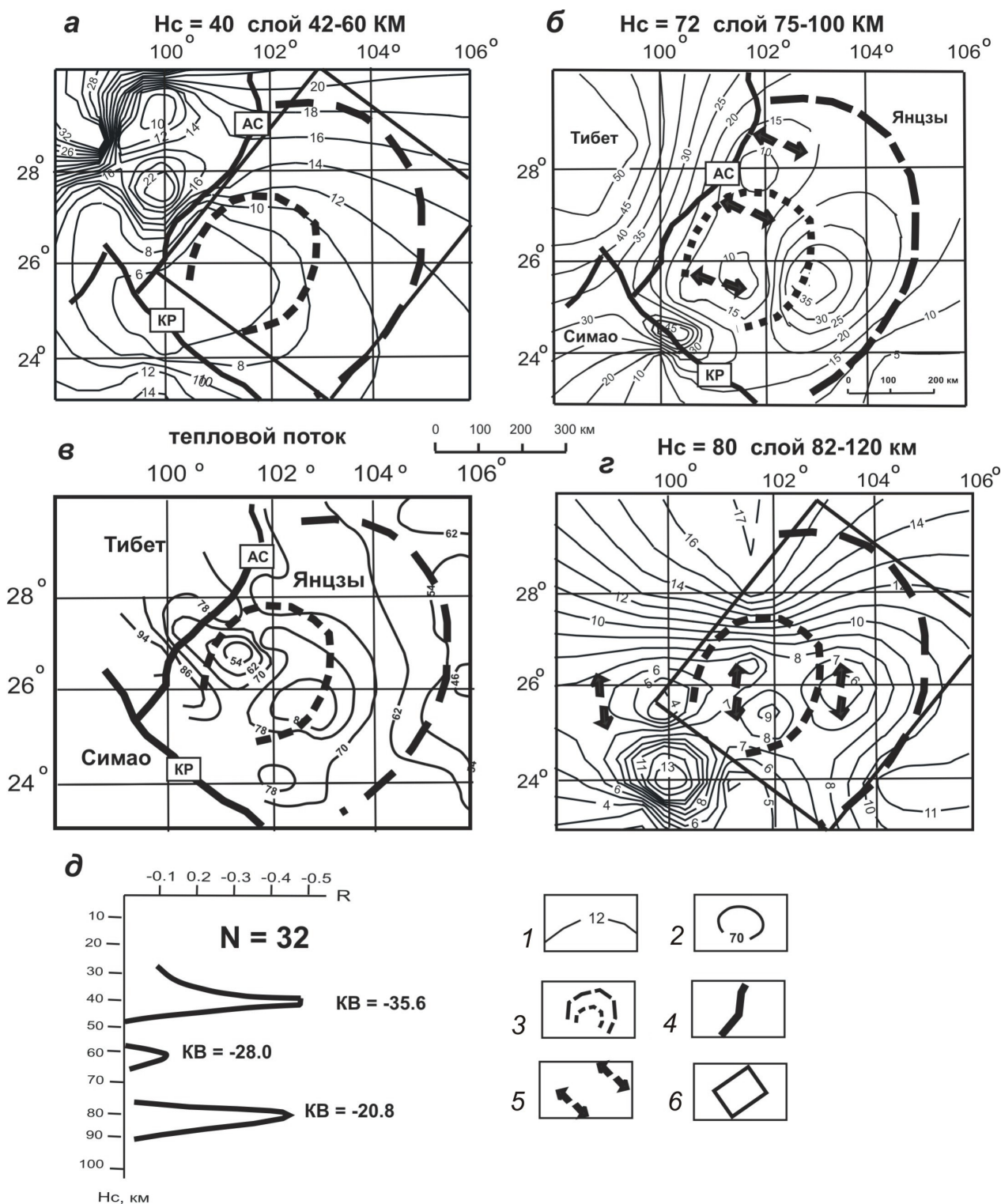


Рис. 7. Плотностная контрастность (а, б, з), интенсивность теплового потока (в) (Jiang et al., 2018) и коэффициент корреляции Q и μ_z в разных глубинных срезах $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели тектоносферы (д) в зоне влияния Эмейшаньского плюма: 1–2 — изолинии плотностной контрастности (1), 10^{-2} кг/м²/км, и теплового потока (2), мВт/м²; 3 — контуры внутренней и промежуточной зон Эмейшаньского плюма (He, Santosh, 2017; Jiang et al., 2018); 4 — разломы: АС — Аджань-Сяоджинь (Agjiang–Xiaojinhe), КР — Красной реки (He, Santosh, 2017); 5 — зоны растяжения; б — контур площади корреляционного анализа.

Fig. 7. Density contrast (a, b, z), heat flow (v) (Jiang et al., 2018) and correlation coefficient of Q and μ_z for different depth sections of $\mu_z(x, y, H_c)$ -model (d) in the zone under influence of the Emeishan plume (d) 1–2 — density contrast isolines, 10^{-2} kg/m²/km (1), and heat flow, mW/m² (2); 3 — contours of the inner and intermediate zones of the Emeishan plume (He, Santosh, 2017; Jiang et al., 2018); 4 — faults: АС — Agjiang-Xiaojinhe, Red River (He, Santosh, 2017); 5 — extension zones; б — contour of the correlation analysis area.

ТЕПЛОВОЙ ПОТОК И РЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗУПЛОТНЕНИЕ КОРЫ

Таблица 2. Результаты статистического анализа дискретной связи интенсивности теплового потока с плотностной контрастностью тектоносферы

Table 2. Results of statistical analysis of the discrete relationship between heat flow and density contrast in tectonosphere

Районы исследований	Нс, км	Коэффициент корреляции	Ковариация	Уравнения регрессии	Достоверность аппроксимации, %
ВК-зона растяжения	30	-0,52	-94.3	$\mu_z = -0.70 Q + 61.9$	62
ВК-зона растяжения	80	-0.70	-72	$\mu_z = -0.27 Q + 35.2$	50
Южно-Охотский рифт	20	-0.51	-114.2	$\mu_z = -0.22 Q + 30.2$	43
Япономорский плюм	50	-0.40	-77.4	$\mu_z = -0.14 Q + 24.1$	15
Катазиатский рифт	25	-0.42	-80.4	$\mu_z = -0.31 Q + 34.9$	33
Катазиатский рифт	70	-0.38	-67.5	$\mu_z = -0.20 Q + 30.5$	23
Эмейшаньский плюм	40	-0.53	\-35.6	$\mu_z = -0.09 Q + 15.3$	29
Эмейшаньский плюм	80	-0.46	-20.8	$\mu_z = -0.08 Q + 14.0$	48

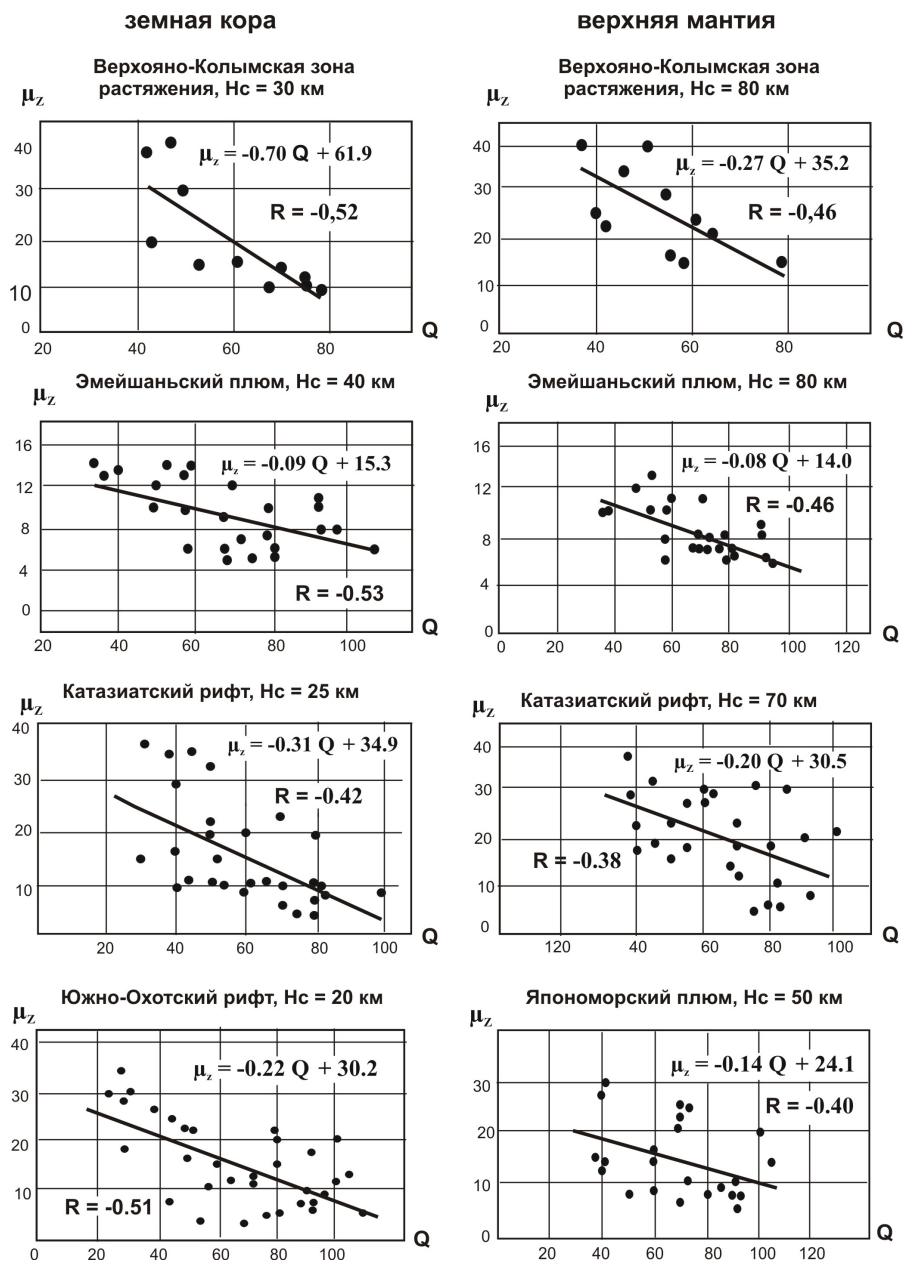


Рис. 8. Диаграммы связи интенсивности теплового потока (Q) и плотностной контрастности μ_z в подкоровом вязком слое и астеносфере.

Fig. 8. Correlation diagrams of heat flow Q and density contrast μ_z in the subcrustal viscous layer and asthenosphere.

расплавленной, мантии, а с другой — они залегают в двух основных интервалах глубин: в подкоревой мантии (30–50 км) и астеносфере (70–120 км). Такое распределение соответствует двухъярусному строению литосферы (Лобковский, 1988; Петрищевский, 2013б).

В большинстве районов Восточной Азии (Южно-Охотский, Япономорский, Катазиатский, Эмейшаньским) существенный вклад в тепловой поток вносит подкоревой вязкий слой, а в Верхояно-Колымском — астеносферный вклад преобладает над подкоревым (табл. 2; рис. 1з). Одинаковый вклад подкорового слоя и астеносферы в тепловые аномалии установлен в районах Катазиатской структуры растяжения (рис. 5з) и Эмейшаньского плюма (рис. 7д). Различия обусловлены взаимоотношениями линейных (рифты) и плюмовых структур на границах литосферных плит. Все рифтогенные структуры характеризуются разрывами жестких слоев, отображаемых максимумами μ_z -параметра, а структуры центрального типа плюмовой природы — концентрически зональным распределением плотностной контрастности (Петрищевский, 2013а; Петрищевский, Юшманов, 2011, 2014, 2021).

Близкий тип корреляционных связей интенсивности теплового потока (Q) и μ_z -параметра в удаленных друг от друга районах (табл. 2) свидетельствует об одинаковом глубинном строении и универсальности тектонических обстановок на восточной окраине Азии, где сочетаются субдукционные, рифтогенные и плюмовые процессы на границах литосферных плит. Корреляция теплового потока с минимумами плотностной контрастности с коэффициентами $R > 0.5$ может найти применение при определении глубины залегания источников тепловых аномалий с осторожностью там, где для этого отсутствуют распределения температуры. Более надежным для этого является использование измерений теплового потока непосредственно в точках их определения.

Выполненное исследование подтвердило очевидную закономерность в том, что литосфера не является однородным геологическим телом, а состоит из двух главных жестких слоев: земной коры и нижней литосферы, разделяемых слоем пониженной вязкости. Это определяет разнообразные формы коллизии литосферных сегментов на границах тектонических плит (Лобковский, 1988; Петрищевский, 2013б).

Работа выполнена в соответствии с темой научных исследований, утвержденной государственным заданием Министерства науки и высшего образования: «Изучение геологического строения, моделирование глубинных структур земной коры и верхней мантии Восточной Азии и оценка современного состояния и динамики геосистем (2021–2023)» (№ гос. Регистрации 0234–2021–0006).

- Белявский В.В., Егоркин А.Н., Золотов Е.Е. и др.* Сейсмoeлектрические параметры тектоносферы Евразийского складчатого пояса // Фундаментальные проблемы тектоники. Материалы XL Тектонического совещания. Т. I. М.: Геос, 2007. С. 79–81 [*Belyavskiy V.V., Egorkin A.N., Zolotov E.E. et al.* Seismic-electric parameters of the Euro-Asian Folded Belt // Data of XL tectonic conference. Basic problems of a tectonics. V. 1. Moscow: GEOS, 2007. P. 79–81 (in Russian)].
- Блох Ю.И., Каплун Д.В., Коняев О.Н.* Возможности интерпретации потенциальных полей методами особых точек в интегрированной системе «СИНГУЛЯР». Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1993. № 6. С. 123–127 [*Blokh Yu.I., Kaplun D.V., Konyaev O.N.* Probabilities of the gravity interpreting of potential fields by methods of singular points within «SINGULAR» system. Izvestiya vizshikh uchebnikh zavedeniy. Geologiya I Razvedka. 1993. № 6. P. 123–127 (in Russian)].
- Вашилов Ю.Я., Гайдай Н.К., Максимов А.Е. и др.* Полиастеносфера Северо-Востока России — методы изучения, структура, кинематика, динамика // Астеносфера и литосфера Северо-Востока России (структура, геокинематика, эволюция). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. С. 135–142 [*Vachshilov Yu.Ya., Gaidai N.K., Maksimov A.E. et al.* Poly astenosphere of the Russian Far East — study methods, structure, kinematics, dynamics // Astenosfera i litosfera Severo-Vostoka Rossii (struktura, geokinematika, evolyutsiya). Magadan: SVKNII DVO RAN, 2003. P. 135–142 (in Russian)].
- Веселов О.В.* Геотермия тектосферы Японо-Охотоморского региона. Дисс. канд. геол.-мин. наук. 2005. Хабаровск: ИТИГДВОРАН. 24 с. [*Veselov O.V.* Geothermics of the Japan-Okhotsk Sea region. Diss. of the geol.-min. sciences. 2005. Khabarovsk: ITIG DVO RAN. 24 p. (in Russian)].
- Викунин А.В.* Введение в Физику Земли. Учебное пособие для геофизических специальностей. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2004. 239 с. [*Vikulin A.V.* Introduction to the Earth Physics. Manuel for geophysical professions. Petropavlovsk-Kamchatskiy: IVIS DVO RAN, 2004. 239 p. (in Russian)].
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 981 с. [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian Far East. Ed. A.I. Hanchuk. Vladivostok: Dalnauka, 2006. V. 1. 981 p. (in Russian)].
- Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / Ред. А.Н. Диденко, В.Б. Каплун, Ю.Ф. Малышев. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с. [Deep structure and metallogeny of the East Asia / Ed. Didenko A.N., Kaplun V.B., Malishev Yu.F. Vladivostok: Dalnauka, 2010. 332 p. (in Russian)].
- Горнов П.Ю.* Сейсмичность, границы и тепловое поле литосферных плит Северо-Востока Евразии // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. Южно-Сахалинск, 2015. С. 55–59 [*Gornov P.Yu.* Seismicity, boundaries,

- and the heat flow field of lithospheric plates of the North East Asia // *Geodynamic processes and nature disasters. Neftegorsk experience. Yuzhno-Sakhalinsk*. 2015. P. 55–59 (in Russian)].
- Емельянова Т.А., Петрищевский А.М., Изосов Л.А. и др.* Позднемезозойско-кайнозойские этапы вулканизма и геодинамика Японского и Охотского морей // *Петрология*. 2020. Т. 28. № 5. С. 468–481 [Emelyanova T.A., Petrishchevsky A.M., Izosov L.A. et al. Late Mesozoic stages of volcanism and geodynamics of the Sea of Japan and Sea of Okhotsk // *Petrology*. 2020. V. 28. № 5. P. 418–430]. <https://doi.org/10.31857/S0869590320050027>
- Зидаров Д.* О решении некоторых обратных задач потенциальных полей и его применении к вопросам геофизики. София: Издательство Болгарской академии наук, 1986. 143 с. [Zidarov D. About decision of some inverse problems of the potential fields and their application to geophysical questions. Sofia, Izdatel'stvo Bolgarskoj Akademii Nauk, 1986. 143 c. (in Russian)].
- Иванов В.К.* О распределении особенностей потенциала // *УМН*. 1956. Т. 11. Вып. 5 (71). С. 67–70 [Ivanov V.K. About distribution of the potential features. UMN. 1956. Issue 5 (71). P. 67–70. (in Russian)].
- Изосов Л.А., Коновалов Ю.И., Емельянова Т.А.* Проблемы геологии и алмазности зоны перехода континент — океан (Япономорский и Желтоморский регионы). Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2000. 326 с. [Izosov L.A., Kononov Yu.P., Emelyanova T.A. Problems of geology and diamond bearing of the transition zone continent-ocean (Sea of Japan and Yellow Sea regions). Vladivostok: Dalnauka, 2000. 326 p. (in Russian)].
- Каплун В.Б.* Электропроводность и структура литосферы Приамурья. Автореф. канд. дисс. Хабаровск: Институт тектоники и геофизики, 2005. 24 с. [Kaplun V.B. Electric-conductivity and the lithosphere structure of the Priamurie. Diss. of the geol.-min. sciences. 2005. Khabarovsk: ITIG DVO RAN, 24 p. (in Russian)].
- Леликов Е.П., Емельянова Т.А., Пугачев А.А.* Вулканизм и тектоника Центральной глубоководной котловины Японского моря // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 1. С. 129–144 [Lelikov E.P., Emelyanova T.A., Pugachev A.A. Volcanism and tectonics of the central deep basin, Sea of Japan // *Oceanology*. 2018. V. 58. № 1. P. 116–132. <https://doi.org/10.7868/S0030157418010124>].
- Лобковский Л.И.* Геодинамика спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 256 с. [Lobkovsky L.I. Geodynamics of spreading, subduction and two-level tectonics of plates. Moscow: Nauka, 1988. 256 p. (in Russian)].
- Лысак С.В.* Термальная эволюция, геодинамика и современная геотермальная активность литосферы Китая // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 8. С. 1058–1071 [Lysak S.V. Thermal history, geodynamics, and current thermal activity of lithosphere in China // *Russian Geology and geophysics* 2009. V. 50. №. 9. P. 815–825].
- Петрищевский А.М.* Вязкий слой на границе коры-мантии на Дальнем Востоке // *Геотектоника*. 2008. № 5. С. 37–48 [Petrishchevsky A.M. A viscous layer at the crust-mantle boundary in the Far East of Russia // *Geotectonics*. 2008. V. 42. №. 5. P. 357–367. <https://doi.org/10.1134/S0016852108050026>].
- Петрищевский А.М.* Гравитационный метод оценки реологических свойств земной коры и верхней мантии (в конвергентных и плюмовых структурах Северо-Восточной Азии). М.: Наука, 2013а. С. 192 [Petrishchevsky A.M. Gravity method for evaluation of rheological properties of the crust and upper mantle (in convergent and plume structures of the North East Asia. Moscow: Nauka, 2013a. 192 p. (in Russian)].
- Петрищевский А.М.* Гравитационные модели двухъярусной коллизии литосферных плит на Северо-Востоке Азии // *Геотектоника*. 2013б. № 6. С. 60–83 [Petrishchevsky A.M. Gravity models of two-level collision of lithospheric plates in Northeast Asia // *Geotectonics*. 2013b. V. 47. № 6. P. 424–443. <https://doi.org/10.7868/S0016853X13060052>].
- Петрищевский А.М.* Реологическая и геотермическая характеристики Охотоморского плюма // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016., Т. 327. № 2. С. 65–76 [Petrishchevsky A.M. Rheological and geothermic characteristics of the Sea of Okhotsk Plume // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2016b. V. 327. №. 2. P. 65–76 (in Russian)].
- Петрищевский А.М.* Общие черты глубинного строения тектоносферы западно-тихоокеанских окраин (Северо-Восточная Азия и Австралия). *Геотектоника*. 2016б. № 6. С. 87–104 [Petrishchevsky A.M. Common Features of the Tectonosphere Deep Structure in the Western Pacific Margins (Northeast Asia Region and Australia) // *Geotectonics*. 2016a. V. 50. № 6. P. 608–623. <https://doi.org/10.7868/S0016853X16060059>].
- Петрищевский А.М.* Рифтогенные структуры и нефтегазоносность в реологических гравитационных моделях земной коры // *Геофизика*. 2019. № 4. С. 42–51 [Petrishchevsky A.M. The rift structures and oil-gas bearing in rheological gravity models of the crust // *Geophysics*. 2019. № 4. С. 42–51 (in Russian)].
- Петрищевский А.М.* Одно практическое следствие теорем единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала // *Геофизика*. 2020а. № 4. С. 98–111 [Petrishchevsky A.M. One practice consequence from theorems of uniqueness and non-uniqueness of inverse gravity problem // *Geophysics*. 2020a. №. 4. С. 98–111 (in Russian)].
- Петрищевский А.М.* Новые данные о строении земной коры и верхней мантии Юго-Восточного Китая, полученные в результате статистической интерпретации гравитационных аномалий // *Тихоокеанская геология*. 2020б. Т. 39. № 2. С. 29–45 [Petrishchevsky A.M. New data on the crust and upper mantle structure of the Southeast China obtained from statistical processing results of gravity anomalies // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2020b. V. 14. № 2. P. 119–134]. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2020-39-2-29-45>
- Петрищевский А.М., Злобин Т.К.* Плотностная неоднородность тектоносферы Охотоморского региона / *Ученые записки Сахалинского государственного университета: Сборник научных статей*. Вып.4. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2004. С. 10–20

- [*Petrishchevsky A.M., Zlobin T.K.* Density inhomogeneity of the Sea of Okhotsk region tectonosphere // *Uchenie Zapiski Sakhalinskogo Universiteta: Sbornik nauchnikh statei. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhGU, 2004. №. 4. P. 10–22 (in Russian).*]
- Петрищевский А.М., Изосов Л.А., Емельянова Т.А.* Реология и геометрия плюмов в литосферно-астеносферном диапазоне: результаты новых экспериментов. Фундаментальные проблемы тектоники. Материалы ЛII Тектонического совещания. Т. 2. М.: Геос, 2020. С. 144–148 [*Petrishchevsky A.M., Izosov L.F., Emelyanova T.A.* Rheology and geometry of plumes in lithospheric-asthenospheric range: results of new experiences // *Basic problems of a tectonics. Data of LII tectonic conference. V. 2. Moscow: GEOS. 2020. P. 144–148 (in Russian).*]
- Петрищевский А.М., Изосов Л.А., Емельянова Т.А. и др.* Структура, реология, петрология и геодинамика тектоносферы Японского моря // *Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 116–131 [Petrishchevsky A.M., Izosov L.A., Emelyanova T.A. et al.* Structure, rheology, petrology and geodynamics of the tectonosphere of the Sea of Japan // *Oceanology. 2021. V. 61. № 1. P. 104–118. https://doi.org/10.31857/S00301574210101609.*]
- Петрищевский А.М., Исаев В.И.* Глубинные источники теплогенерации и региональный прогноз нефтегазоносности Томской области. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 97–113 [*Petrishchevsky A.M., Isaev V.I.* Deep sources of heat generation and regional forecast on the oil-gas prospects in the Tomsk Region // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2017. V. 328. № 5. С. 97–113 (in Russian).*]
- Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П.* Реология и металлогения Мая-Селемджинского плюма // *ДАН. 2011. Т. 440. № 2. С. 207–212 [Petrishchevsky A.M., Yushmanov Yu.P.* Rheology and metallogeny of the Maya-Selemdzha plume // *Doklady Earth Sciences. 2011. V. 440. № 2. P. 207–212.*]
- Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П.* Геофизические, магматические и металлогенические признаки мантийного плюма в верховьях рек Алдан и Амур // *Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 4. С. 568–593 [Petrishchevsky A.M., Yushmanov Yu.P.* Geophysical, magmatic, and metallogenic manifestation of a mantle plume in the upper reaches of the Aldan and Amur Rivers // *Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55. № 4. P. 443–462. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2014.03.003*]
- Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П.* Плотностная контрастность, глубинное строение, реология и металлогения земной коры и верхней мантии Верхояно-Колымского региона // *Литосфера. 2021. Т. 21. № 4. С. 491–516 [Petrishchevsky A.M., Yushmanov Yu.P.* Density contrast, deep structure and metallogeny of the crust and upper mantle of the Verkhoyano-Kolimckiy Region // *Lithosphere. 2021. V. 21. № 4. P. 491–516 (in Russian).* <http://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-4-491-516>
- Пискарев А.Л., Буценко В.В., Поселов В.А., Савин В.А.* Глубинное строение земной коры Охотского моря по данным 3D-сейсмоплотностного моделирования // *Океанология. 2012. Т. 52. № 3. С. 437–448 [Piskarev A.L., Butsenko V.V., Poselov V.A., Savin V.A.* Deep structure of the crust beneath Sea of Okhotsk inferred from 3D seismic density modeling // *Oceanology. 2012, V. 52. № 3. P. 411–421. http://doi.org/10.1134/S0001437012030095.*]
- Приленко А.И.* Об единственности определения плотности и формы тела в обратных задачах теории потенциала. *ДАН. 1970. Т.193. № 2. С. 288–291 [Prilepko A.I.* About of unequivocal definition for the body density and shape in inversion problems in the potential theory // *Doklady Academy Sciences of USSR. 1970. V. 193. №. 2. P. 288–291 (in Russian).*]
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Развитие Земли. М: Изд-во МГУ, 2002. 506 с. [*Sorokhtin O.G., Ushakov S.A.* Evolution of the Earth. Moscow: MGY, 2002. 506 p. (in Russian)].
- Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона. Результаты исследований по международным геофизическим проектам / ред. Родников А.Г. М.: РАН. Национальный геофизический комитет, 1996. 337 с. [Structure and dynamics of the lithosphere and asthenosphere of the Okhotsk Sea Region / Results of researches on international geophysical projects. Moscow: National geophysical committee, 1996. 337 p. (in Russian)].*
- Тектоника и геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука / Интерпериодика», 2001. 571 с. [Tectonics and geodynamics of the Sakha republic territory. Moscow: Nauka / Interperiodika, 2001. 571 p. (in Russian)].*
- Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии / под ред. В.В. Гордиенко. Владивосток: ДВО РАН, 1992. 238 с. [Tectonosphere of the Pacific-Asian Margin. Vladivostok: DVO RAN, 1992. 238 p. (in Russian)].*
- Туззов И.К., Епанешников В.Д., Хаякава М.* Геотермия. Региональные проблемы. Моделирование. Практические приложения. М.: Недра, 1995. 303 с. [*Tuevov I.K., Epaneshnikov V.I., Khayakawa M.* Geothermics. Regional problems. Modelling. Practics. Appendixes. Moscow: Nedra, 1995. 303 p. (in Russian)].
- Цирульский А.В., Никонова Ф.И., Федорова Н.В.* Метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. 135 с. [*Tsirulckiy A. V., Nikonova F.I., Fedorova N.V.* Interpreting method for gravity and magnetic anomalies with a construction of the family decision // *Sverdlovsk: Ural Center of the RUS. 1980, 135 p. (in Russian).*]
- Шахтыров В.Г.* Верхне-Колымский золотоносный район в свете сдвиговой тектоники // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2009. Вып. 35. С. 89–98 [Shakhtirov V.G.* The Upper Kolimskiy ore bearing region in the slight of shear tectonics // *Bulletin of the Siberian branch. Section of the Earth sciences. 2009. №. 35. P. 89–98 (in Russian).*]
- Шашкин Ю.А.* К вопросу об обратной задаче теории потенциала // *Докл. АН СССР. 1958. Т. 118. № 1. С. 45–56 [Shashkin Yu.A.* To the question of inverse problem in the potential theory // *Doklady of the Academy Science USSR. 1958. Vol. 118. №. 1. P. 45–56 (in Russian).*]

- Юшманов Ю.П.* Золотоносные вихревые структуры вдвиговых дуплексах Дальнего Востока: Центральная Колыма и Нижнее Приамурье // Отечественная геология. 2019. № 3. С. 55–62 [*Yushmanov Yu.P.* Ore bearing vortex structures in shear duplexes of the Russian Far East: Central Kolima and lower Amur regions // *Native Geology*. 2019. № 3. P. 55–62 (in Russian)].
- Cai G., Wan Zh., Yao Y. et al.* Mesozoic Northward subduction along the SE Asian. Continental margin inferred from magmatic records in the South China Sea // *Minerals*. 2019. V. 9. 598. P. 2–25. <https://doi.org/10.3390/min9100598>
- Chen Y., Xie J.* Resolution, uncertainty and data predictability of tomographic Lg attenuation models application to Southeastern China // *Geophys. J. Int.* 2017. V. 210. P. 166–183. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx147>
- Evans G.C.* Application of Poincare's sweeping-out process. *Mathematic*. 1933. V. 19. P. 457–461.
- Faure M., Chen Y., Feng Z. et al.* Tectonics and Geodynamics of South China: an introductory note // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017. V. 141. P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.11.031>
- He C., Dong S., Santosh M., Chen X.* Seismic Evidence for a Geosuture between the Yangtze and Cathaysia Blocks, South China // *Scientific Reports*. 2013. SREP-12-04023.3d. 3/7/13. (<https://www.researchgate.net/publication/24964854>)
- He G., Santosh M.* Mantle roots of the Emeishan plume: an evaluation based on teleseismic P-wave tomography // *Solid Earth*. 2017. V. 8. P. 1141–115.
- Jia L., Mao J., Liu P., Miao Yu M.* Crust-mantle interaction during subduction zone processes: Insight from late Mesozoic I-type granites in eastern Guangdong, SE China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. V. 192. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104284>
- Jiang Q., Qiu N., Zhu C.* Heat flow study of the Emeishan large igneous province region: Implications for the geodynamics of the Emeishan mantle plume // *Tectonophysics*. 2018. V. 724–725. P. 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.12.027>
- Klemperer S.I.* A relation between continental heat flow and the seismic reflectivity of the lower crust // *Geophysics*. 1987. V. 63. P. 1–11.
- Land Gravity Data.bgi.omp.obs-mip.fr / модель: GM08_CBA_global_2190_2.5m.
- Li T.* The principal characteristics of the lithosphere of China // *Geoscience Frontiers*. 2010. V. 1. P. 45–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2010.08.005>
- Lin J., Xu T., Cai H. et al.* Crustal velocity structure of Cathaysia Block from an active-source seismic profile between Wanzai and Hui'an in SE China // *Tectonophysics*. 2021. V. 811. №. 1. P. 228–274. DOI:10.1016/j.tecto.2021.228874
- Ren J., Tamaki S. Li., Zhan J.* Late Mesozoic and Cretaceous rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas // *Tectonophysics*. 2002. V. 344. P. 175–205
- Tao W., Shen Z.* Heat flow distribution in Chinese continent and its adjacent areas // *Natural Science*. 2008. V. 18. P. 843–849. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.01.018>
- Wang Y., Zhang F., Fan W. et al.* Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology // *Tectonic*. 2010. V. 29. TC6020 P. 1–16. <https://doi.org/10.1029/2010TC002750>
- Wang F.Y., Ling M.X., Ding X. et al.* Mesozoic large magmatic events and mineralization in SE China: oblique subduction of the Pacific plate // *International Geology Review*. 2011. V. 53. № 5–6. P. 704–726.
- Xia Y., Xu X., Niu Y., Liu L.* Neoproterozoic amalgamation between Yangtze and Cathaysia blocks: the magmatism in various tectonic settings and continent-arc-continent collision // *Precambrian Research*. 2018. V. 309. P. 56–87 <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.02.020>
- Yao, J.L., Cawood, P.A., Shu, L.S. et al.* An early Neoproterozoic accretionary prism ophiolitic Mélange from the Western Jiangnan Orogenic Belt, South China // *Journal of Geol.* 2016. V. 124. № 5. P. 587–601. <https://doi.org/10.1086/687754>
- Zhai M., Zhou Ya.* General Precambrian Geology in China. In: *Precambrian Geology of China*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015. P. 3–58. <http://www.springer.com/series/10172>
- Zhang C., Mushayandebvu F.M., Reid A.B. et al.* Euler deconvolution of gravity tensor data. *Geophysics*. 2000. V. 65. № 2. P. 512–520. <https://doi.org/10.1190/1.1444745>
- Zhang Z., Wang Y.* Crustal structure and contact relationship revealed from deep seismic sounding data in South China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2007. V. 165. № 1–2. P.114. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2007.08.005>
- Zhou L., Xie J., Shen W. et al.* The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography // *Geophysics Journal International*. 2012. Vol 189. No. 3. P. 1565–1583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05423.x>
- Zhu J.S., Cai X.L., Cao J.M., Yan Z.Q.* Lithosphere structure and geodynamics in China and its adjacent areas // *Geology in China*. 2006. V. 33. No. 4. P. 793–803.

ПЕТРИЩЕВСКИЙ
**HEAT FLOW AND RHEOLOGICAL DECOMPACTION
OF THE CRUST AND UPPER MANTLE IN RIFT AND PLUME STRUCTURES
ON THE EASTERN MARGIN OF ASIA**

A.M. Petrishchevsky

*Institute of Complex Analysis of Regional Problems, Birobidzhan, Russia, 697016;
e-mail: petris2010@mail.ru*

Received Septembr 27, 2022; revised December 26, 2022; accepted March 30, 2023

Results of the correlation analysis of heat flow anomalies (Q) with distributions of density contrast (μ_z -parameter) in rifting and plume structures on eastern margin of Asia are considered, which prove selective inverse correlation of these parameters in depth intervals corresponding to the position of the subcrustal viscous layer and asthenosphere. Rifting structures are characterized by ruptures in rigid layers displayed by maxima of the μ_z -параметра, while plume-type central structures are characterized by concentrically zonal distribution of density contrast. The main contribution to the thermal anomalies in rifts is made by the subcrustal viscous layer. Thermal flow from the asthenosphere at the Ceinozoic boundaries of lithospheric plates is screened by subducting slabs. The identical correlation of Q and μ_z -parameter in distant regions testifies to the same deep structure and universality of tectonic regimes on the eastern margin of Asia, where subduction, rifting and plume processes are coupled in space and time.

Keywords: heat flow, tectonosphere, density contrast, rheology, East Asia.