ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 500, № 1, с. 47–52

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.311

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ЗЕМЛИ

© 2021 г. А. П. Трубицын[1,*], член-корреспондент РАН В. П. Трубицын[1]

Поступило 20.04.2021 г.
После доработки 25.05.2021 г.
Принято к публикации 25.05.2021 г.

Наблюдаемый поток тепла Земли создается в основном благодаря выделению тепла при радиоактивном распаде и высвобождению тепла при вековом остывании Земли, а также благодаря теплоте затвердевания растущего внутреннего ядра. От того, в какой пропорции мантия нагревается снизу потоком из ядра и изнутри внутренними источниками тепла, зависит структура конвективных течений и соответственно геодинамические проявления конвекции. Долгое время поток тепла из ядра оценивался из условия, что почти все оно выносится на поверхность плюмами в горячих точках. Однако это приводит к дисбалансу и дефициту полного тепла Земли. В настоящей работе анализируются источники тепла Земли и приводится баланс, согласующийся с имеющимся комплексом данных наблюдения. Рассчитывается распределение плотности теплового потока на границе с ядром и на поверхности и показывается, что даже в простейшей модели конвекции с постоянной вязкостью плюмы выносят на поверхность только часть тепла, поступающего из ядра.

Ключевые слова: перенос тепла в мантии, мантийная конвекция, плюмы

DOI: 10.31857/S268673972109019X

ВВЕДЕНИЕ. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА ЗЕМЛИ

По данным измерений [1], полный поверхностный тепловой поток Земли равен $Q_t = 47$ ТВт ± ± 2 ТВт. Соответственно средняя плотность поверхностного теплового потока составляет q_{aver} = = 92 мВт/м^2. Тепло, выходящее через континенты, составляет 15 ТВт (32%) при плотности теплового потока q_{cont} = 71 мВт/м^2. Тепло, выходящее через океаны, равно 32 ТВт (68%) с плотностью q_{ocean} = 105 мВт/м^2.

Основными источниками тепла Земли являются распад радиоактивных элементов, выделение тепла при вековом остывании ранее более горячих недр и теплота затвердевания растущего внутреннего ядра. В процессе эволюции и охлаждения Земли все эти источники изменяются. Радиогенный тепловой поток, генерируемый в континентальной коре, равен Q_{rc} = 7 ТВт [2]. Он составляет 15% от общего теплового потока Земли Q_t. Таким образом, тепловой поток, выходящий из мантии (за вычетом радиоактивного тепла коры), будет равен $Q_m = Q_t - Q_{rc}$ = 40 ТВт = = 0.85% Q_t со средней плотностью теплового потока 78 мВт/м^2. Этот поток создается потоком тепла из ядра Q_{cor}, теплом радиоактивного распада в мантии Q_{rm} и теплом, высвобождаемым веществом мантии при вековом остывании Земли Q_{coolm}.

Согласно [3], радиоактивные изотопы всей Земли создают тепловой поток 21 ± 4 TW или 45% Q_t. При этом вклад от радиоактивных изотопов ядра пренебрежимо мал [4]. Вычитая радиоактивное тепло земной коры, получим для мощности радиоактивного тепла мантии Q_{rm} = 14 ТВт или 30% Q_t. Разделив это значение на массу мантии M = = 4 × 10^{24} кг, получим для средней радиоактивной теплогенерации в мантии $Q_{rm}/M = 3.5 \times 10^{-12}$ Вт/кг. (Это значение для современной деплетированной мантии в сумме с радиоактивной генерацией континентальной коры соответствует теплогенерации для примитивной мантии).

Оценки скорости векового охлаждения мантии dT/dt имеют разброс в диапазоне от 50 К/млрд лет до 100 К/млрд лет [5]. При массе мантии Земли $M = 4 \times 10^{24}$ кг, теплоемкости c_p = = 1.25 × 10^3 Дж/(кг К) и dT/dt = 80 К/млрд лет для теплового потока, вызванного вековым охлаждением мантии, получим $Q_{coolm} = c_p M\, dT/dt$ = 13 ТВт. Благодаря неточности значения скорости векового остывания dT/dt, тепловой поток Q_{coolm} может иметь разброс от 7.9 ТВт до 16 ТВт.

[1] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: atrub@yandex.ru*

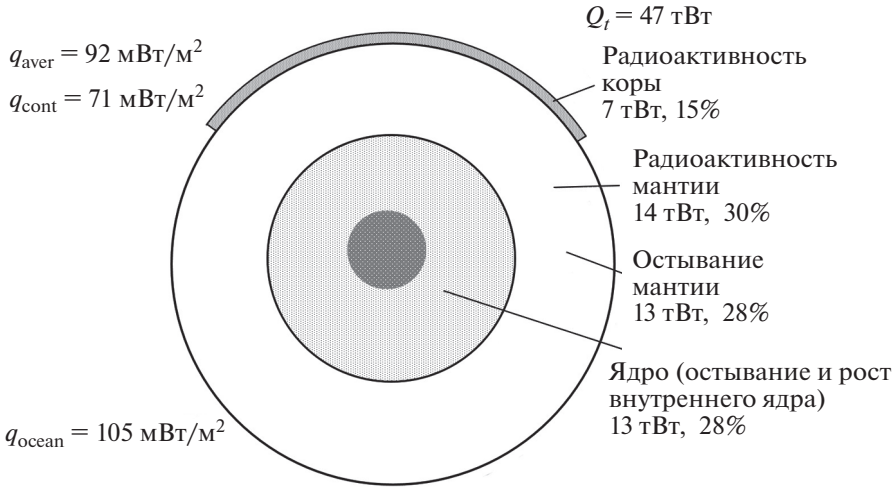

Рис. 1. Тепловой баланс мантии Земли.

Вычитая теплоту охлаждения и радиоактивное тепло мантии из теплового потока, выходящего из мантии, найдем тепловой поток из ядра равным $Q_{cor} = Q_m - Q_{coolm} - Q_{rm}$ = 13 ТВт. На рис. 1 приведены значения тепловых потоков и источников тепла Земли. Выделение энергии при приливах и поглощение энергии при землетрясениях не превышают несколько процентов от полного теплового потока. Поглощение тепла, уходящего на работу землетрясений, составляет 2–3%.

МАНТИЙНЫЕ ПЛЮМЫ

Мантийные плюмы были открыты почти 50 лет назад Морганом и Вильсоном. Они представляют собой долгоживущие (до ~100 млн лет) струи горячего вещества, поднимающегося со дна мантии и прожигающего в горячих точках движущиеся литосферные плиты и континенты, образуя большие магматические провинции.

В серии работ [6, 7] на численных моделях тепловой конвекции подробно исследовались режимы тепловой конвекции при разной степени нагрева и разных контрастах вязкости (см. видео http://rjes.wdcb.ru/v16/2016ES000569/plumes-hr.html). Показано, что с увеличением нагрева и контраста вязкости течения в виде ячеек сменяются на совокупность нисходящих и восходящих конвективных потоков в виде холодных высоковязких погружающихся плит и горячих плюмов.

Регулярные конвективные ячейки имеют место при Ra < 10^5. При Ra ~ 10^6 восходящие и нисходящие потоки становятся узкими, подобно струям. При Ra ~ 10^7 струи начинают пульсировать с периодом ~1 млн лет. Среднее время жизни отдельного плюма в виде пульсирующей струи около 100 млн лет. Во время подъема со дна мантии нового плюма он имеет форму гриба, после достижения поверхности ножка плюма становится пульсирующей струей. При дальнейшем росте числа Рэлея (соответствующем ранней Земле) тепловая конвекция переходит в режим упорядоченно поднимающихся термиков (частей разорванных плюмов). При еще большей интенсивности тепловая конвекция становится турбулентной, при которой термики зарождаются и поднимаются хаотично. На зарождение и пространственное расположение плюмов в мантии большое влияние оказывают находящиеся на дне мантии гигантские горячие скопления эклогита под Африкой и Тихим океаном [7].

В реальной Земле при высокой интенсивности тепловой конвекции только часть восходящих конвективных потоков находится в плюмовом режиме. Погружающиеся литосферные плиты благодаря вязкому сцеплению должны вовлекать в циркуляционное движение большую долю вещества мантии. В результате только часть восходящих конвективных потоков принимает форму плюмов, а другая часть остается в виде восходящих мантийных струй, доставляющих вещество в срединно-океанические хребты.

Поскольку плюмы зарождаются на границе ядро–мантия, то ранее [8] полагалось, что плюмы охлаждают ядро, а погружающиеся плиты охлаждают низы мантии. При этом предполагалось, что тепловой поток из ядра примерно равен потоку тепла, выносимого на поверхность плюмами. В работе [9] была оценена скорость роста массы топографических возвышенностей, порождаемых мантийными плюмами. Эта масса соответствует тепловому разуплотнению вещества в плюмах, по которому находится поток тепла, выносимый плюмами на поверхность. Такая оценка давала для полного потока тепла, выносимого мантийными плюмами, и соответственно для по-

тока из ядра значение 2.4–3.5 ТВт. Однако это значение теплового потока ядра почти в 5 раз ниже значения, следуемого из вышеприведенного полного теплового баланса Земли. В работе [1] значение тепла, выносимого в горячих точках, принимается еще меньшим, до 1 ТВт.

При таком малом значении потока из ядра для объяснения наблюдаемого полного потока тепла Земли приходилось даже принимать [10], что якобы обилие радиоактивных изотопов урана и тория в Земле значительно превышает обилие в хондритовых метеоритах. В работе [11] для объяснения недостающего тепла строилась модель эволюции конвекции с более медленным остыванием в прошлом благодаря более прочным сухим литосферным плитам, которые теплоэкранировали мантию в ранней Земле.

В работах [12, 13] процесс переноса тепла плюмами внутри мантии рассчитывался непосредственно на численных сферических моделях мантийной конвекции без жестких плит. При этом был сделан вывод, что плюмы могут выносить на поверхность лишь часть тепла, поступающего из ядра. Однако, что происходит с другой частью потока из ядра, оставалось неизвестным, и эта часть тепла ядра была названа невидимой. Предполагалось, например, что в мантии есть много мелких невидимых плюмов [14]. По сферической трехмерной модели мантийной конвекции без плит [15] плюмы забирают 60% тепла, идущего из ядра, но, поднимаясь, при адиабатическом расширении теряют много тепла и в результате выносят на поверхность только 1/4–1/5 часть тепла ядра.

Поскольку данная проблема согласования потоков возникала на основании оценки поверхностных проявлений плюмов [8, 9], то в настоящей работе количество тепла, выносимого плюмами, рассчитывается непосредственно по распределению теплового потока на границе ядро–мантия и на поверхности.

ЛАТЕРАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для качественного понимания, почему мантийные плюмы забирают только часть тепла ядра, а также, как тепло переходит из ядра и перераспределяется в мантии, в настоящей работе анализируются результаты для простейших моделей мантийной конвекции в прямоугольной области 3 : 1 при числе Рэлея 2×10^7 без учета адиабатической сжимаемости. Поскольку модель не включает плиты, то, как и во всех вышеуказанных работах по оценке тепла, выносимого плюмами, за плюмы принимаются все восходящие течения.

Как показано в [15], эффект сферичности мантии для процессов теплопереноса можно учесть простым добавлением в уравнения конвекции внутреннего постоянного отрицательного источника тепла. При этом для современной мантии величина этого дополнительного отрицательного источника тепла случайно оказывается примерно равной по модулю реальным источникам. Поэтому сферическая модель с учетом внутренних источников тепла дает распределения тепла и теплового потока примерно такие же, как декартова модель без внутренних источников тепла. Это объясняется тем, что в сферической модели трехкратное увеличение плотности потока тепла за счет внутренних источников компенсируется его трехкратным уменьшением к поверхности, площадь которой в три раза больше площади ядра. Использование декартовой модели упрощает анализ тепловых потоков, так как для нее в отсутствие внутренних источников полное тепло, выносимое на поверхность, и тепло, поступающее снизу из ядра, равны.

При численном решении уравнений конвекции устанавливаются квазистационарные течения. На рис. 2 цветом представлено рассчитанное поле температур $T(x, z)$ и скоростей $V(x, z)$ для одного из моментов времени. В этот момент возникают три нестационарные ячейки с узкими нисходящими и восходящими мантийными потоками в форме, подобной плюмам. В средней части области при $x = 0.8$ имеется холодная нисходящая струя и при $x = 1.3$ восходящий поток (соответствующий плюму). У вертикальных границ области также видны части мантийных потоков.

Сверху и снизу приведены рассчитанные распределения относительной плотности теплового потока q у верхней и нижней границы. В приближении Буссинеска при $\mathrm{Ra} \sim 10^7$ число Нуссельта имеет среднее значение около 40, однако учет адиабатической сжимаемости снижает его примерно в 2 раза. Если принять это во внимание и взять средний коэффициент теплопроводности в мантии равным 3.8 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$, то реальный средний тепловой поток у поверхности получится равным 90 мВт/м^2 при максимуме 170 мВт/м^2 в месте подхода плюма и минимуме 7 мВт/м^2 в зоне субдукции.

На нижней поверхности распределение существенно отлично. В местах зарождения плюма тепловой поток, идущий из ядра, не максимален, а наоборот, минимален. В то же время в месте холодной нисходящей струи тепловой поток максимален. Это понятно из того, что в погранслоях тепло переносится только кондуктивно и градиент температуры в данных местах обратно пропорционален толщине горячего погранслоя.

Поток тепла Q, проходящего через выделенную площадь поверхности S, равен произведению q и S. Под кривыми распределения плотности теплового потока q на верхней и нижней границах цветом

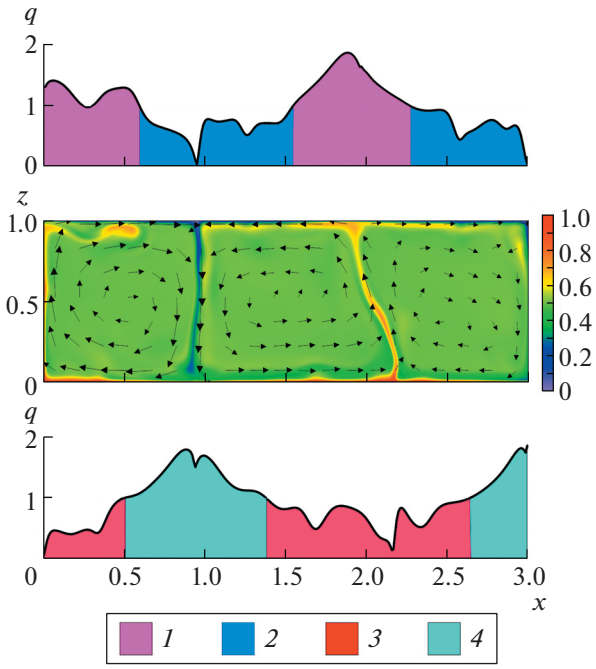

Рис. 2. В средней части рисунка поле температур в мантии (в цветовой шкале) и скорости течений (стрелки с максимальным значением 10 см/год). Вверху и внизу распределения относительной плотности теплового потока на поверхности и границе с ядром с маркированными областями: *1* – тепло, выносимое на поверхность плюмами; *2* – тепло, оставляемое охлаждающейся литосферой (условно плитами); *3* – тепло, забираемое из ядра плюмами; *4* – тепло, забираемое из ядра холодными потоками (остатками плит).

маркированы области поверхности, соответствующие плюмам и плитам. Поскольку пока нет адекватного определения размеров горячих точек [7], то границы плюма определяются по температуре в мантии [12, 13] как область с температурой, превышающей среднюю $T > T_{av} + a(T_{max} - T_{av})$, где для параметра a принимаются значения 0.1–0.3. Если положить $a = 0$, то в плюмы будут включены все восходящие потоки мантии.

Как видно на рис. 2, в рассматриваемой модели тепло, выносимое плюмами (лиловый цвет) наружу и тепло, оставляемое горизонтальными холодными течениями на поверхности (синий цвет), примерно равны. Аналогично на нижней границе ядро–мантия тепло в погранслое, забираемое плюмами (красный цвет) и тепло, идущее на нагрев остатков плит (голубой цвет), тоже примерно равны. Однако выше погранслоя это тепло при горизонтальной адвекции частично передается восходящим потокам. При отсутствии дополнительных внутренних источников все тепло, выносимое на поверхность плюмами и плитами, равно теплу, идущему из ядра.

Для модели с учетом адиабатической сжимаемости плюмы при поднятии и расширении охлаждаются примерно на 1200 K, что на 400 K больше по сравнению с понижением средней температуры мантии [16]. Этот эффект может понизить поток тепла, выносимый плюмами, почти в три раза [13].

Для модели с учетом вязкопластической реологии поток, выносимый плюмами на поверхность, должен быть еще меньше, поскольку погружающиеся холодные высоковязкие плиты оказывают большее влияние на конвективный кругооборот вещества мантии, чем горячие маловязкие плюмы. При этом погружающиеся жесткие плиты увлекают окружающее вещество мантии и, как бы выталкивая его, создают восходящие конвективные потоки, которые наряду с плюмами забирают тепло ядра и выносят его в область срединно-океанических хребтов [7].

Следует отметить, что полученные результаты все-таки остаются пока лишь качественными. Для более точного количественного сопоставления плюмов, выносящих тепло из ядра, и областей топографического поднятия рельефа, необходимо более адекватное определение самого плюма по размерам области поднимающегося горячего вещества мантии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ источников тепла и вклада плюмов в вынос тепла, поступающего из ядра, позволяет составить баланс тепла Земли, согласующийся с имеющимися данными наблюдений. Наблюдаемый тепловой поток Земли создается примерно на 15% радиоактивностью коры и 85% потоком из мантии. В свою очередь, поток из мантии создается на треть потоком из ядра и на две трети внутренними источниками (треть радиоактивностью мантии и треть ее вековым охлаждением). При этом поток из ядра почти в десять раз больше потока тепла, выносимого плюмами в горячих точках.

В моделях тепловой конвекции без жестких плит и без сжимаемости треть теплового потока из ядра входит в мантию в местах нисходящих мантийных течений и соответственно только треть в местах зарождения плюмов. Однако горизонтальные течения в мантии в нижнем погранслое переносят тепло к плюмам, увеличивая (в указанных моделях) поток, доставляемый на поверхность до половины от тепла ядра.

Если учитывать адиабатическую сжимаемость, то по мере подъема плюмы адиабатически расширяются и теряют более половины тепла (отдавая вмещающей мантии). В результате плюмы выносят на поверхность около четверти тепла ядра.

При учете влияния жестких плит на общую структуру тепловой конвекции значительная часть восходящих конвективных потоков не при-

нимает форму плюмов, а существует в форме струй конвективных ячеек, доставляющих тепло в срединно-океанические хребты. Поэтому доля тепла, выносимая плюмами, должна еще более уменьшиться и составить, возможно, лишь десятую долю потока из ядра. Это приведет к еще большей согласованности общего баланса тепла Земли.

Более точное решение проблемы будет возможно после построения количественной модели мантийной конвекции, одновременно включающей жесткие плиты и плюмы, с учетом данных томографии и привязкой к реальным структурам, в частности показывающей, с каких глубин поступает вещество в срединно-океанические хребты.

В последнее время удалось построить численные модели высоко интенсивной тепловой конвекции или с плюмами и учетом адиабатической сжимаемости, но без плит [12, 13], либо с плитами и плюмами, но без сжимаемости [18, 19]. В последних работах показано, как плиты и плюмы возникают одновременно в рамках тепловой конвекции. Однако в [18, 19] использовано приближение Буссинеска, и не учитывается, что плюмы при подъеме адиабатически расширяются и охлаждаются, а погружающиеся плиты, наоборот, нагреваются. Поэтому в верхней мантии преувеличено влияние плюмов, а в нижней мантии – погруженных плит.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам, замечания которых позволили внести уточнения в текст статьи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств бюджетного финансирования Института физики Земли РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Davies J.H., Davies D.R.* Earth's Surface Heat Flux // Solid Earth. 2010. V. 1. P. 5–24. www.solid-earth.net/1/5/2010/
2. *Arevalo R. Jr, McDonough W.F., Luong M.* The K/U Ratio of the Silicate Earth: Insights into Mantle Composition, Structure and Thermal Evolution // Earth and Plan Sci Lett. 2009. V. 278. P. 361–369.
3. *McDonough1 W.F., Arevalo Jr. R.* Uncertainties in the Composition of Earth, Its Core and Silicate Sphere // Journal of Physics: Conference Series. 2008. V. 136. 022006d, The XXIII Conference on Neutrino Physics and Astrophysics. https://doi.org/10.1088/1742-6596/136/2/022006
4. *Corgne A., Keshav S., Fei Y., McDonough W.F.* How Much Potassium is in the Earth's Core? New Insights from Partitioning Experiments // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. V. 256. P. 567–576.
5. *Berry A.J., Danyushevsky L.V., O'Neill H.C., Newville M., Sutton S.R.* Oxidation State of Iron in Komatiitic Melt Inclusions Indicates Hot Archaean Mantle // Nature. 2008. V. 455. P. 960–963.
6. *Трубицын В.П., Евсеев М.Н.* Плюмовый режим тепловой конвекции в мантии Земли // Физика Земли. 2018. № 6. С. 37–47. https://doi.org/10.1134/S0002333718060121
7. *Трубицын В.П.* Проблемы глобальной геодинамики // Физика Земли. 2019. № 1. С. 180–198. https://doi.org/10.31857/S0002-333720191180-198
8. *Davies G.F., Richards M.A.* Mantle Convection // J. Geol. 1992. V. 100 (2). P. 151–206.
9. *Davies G.F.* Ocean Bathymetry and Mantle Convection 1. Large Flow and Hotspots // J. Geophys Res. 1988. V. 93. P. 10467–10480.
10. *Schubert G., Turcotte D.L., Olson P.* Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge: University Press. 2004. 940 p.
11. *Korenaga J.* Energetics of Mantle Convection and the Fate of Fossil Heat // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 1437. https://doi.org/10.1029/2002GL016179
12. *Mittelstaedt E., Tackley P.J.* Plume Heat Flow is Much Lower than CMB Heat Flow // Earth Planet. Sci. Lett. 2006. V. 241. P. 202–210.
13. *Zhong S.* Constraints on Thermochemical Convection of the Mantle from Plume Heat Flux, Plume Excess Temperature, and Upper Mantle Temperature // J. Geophys. Res. 2006. V. 1. B04409. https://doi.org/10.1029/2005JB003972
14. *Malamud B.D., Turcotte D.L.* How Many Plumes are There? // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 174. № 1–2. P. 113–124.
15. *Трубицын А.П., Трубицын В.П.* Распределение температуры и теплового потока в Земле. Влияние сферичности мантии // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 2. С. 83–91.
16. *Трубицын А.П., Трубицын В.П.* Распределение температуры в мантии Земли // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 2. С. 1–5.
17. *Deschamps F., Yao C., Tackley P.J., Sanchez-Valle C.* High Rayleigh Number Thermal Convection in Volumetrically Heated Spherical Shells // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, E09006. https://doi.org/10.1029/2012JE004090
18. *Arnould M., Coltice N., Flament N., Mallard C.* Plate Tectonics and Mantle Controls on Plume Dynamics // Earth Planet. Sci. Lett. 2020. V. 547. Oct 1. 116439.
19. *Coltice N., Larrouturou G., Debayle E., Garnero E.J.* Interactions of Scales of Convection in the Earth's Mantle // Tectonophysics. 2018. V. 746. P. 669–677.

HEAT BALANCE IN THE EARTH

A. P. Trubitsyn[a,#] and Corresponding Member of the RAS V. P. Trubitsyn[a]

[a] *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: atrub@yandex.ru*

The observed heat flux of the Earth is created mainly due to the release of heat during radioactive decay and during the secular cooling of the Earth, as well as due to the heat of solidification of the growing inner core. The structure of convective flows and, accordingly, the geodynamic manifestations of convection depend on the proportion in which the mantle is heated from below by the flux from the core and from the inside by internal heat sources. For a long time, the heat flux from the core was estimated from the condition that almost all of it is carried to the surface by plumes in hot spots. However, this leads to an imbalance and a deficit in the total heat of the Earth. In this paper, the sources of the Earth's heat are analyzed and a balance is presented that is consistent with the available set of observational data. The distribution of the heat flux density at the boundary with the core and on the surface is calculated, and it is shown that, even in the simplest convection model with constant viscosity, plumes carry to the surface only a part of the heat coming from the core.

Keywords: heat transfer in the mantle, mantle convection, plumes