

Высокая теплопроводность ядра Земли и геодинамо

М. Ю. Решетняк

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6336>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
20.07.2023;

получена
после доработки
13.09.2023;

принята к публикации
20.09.2023

Ключевые слова:
эволюция Земли,
тепловая и
композиционная
конвекция,
геомагнитное поле,
ядро Земли,
граница ядро – мантия

Для цитирования

Реферат

Геомагнитное поле генерируется механизмом динамо в ядре Земли, поддерживаемым в процессе остывания планеты и роста твердого ядра. Магнитное поле существовало задолго до появления твердого ядра, но по имеющимся оценкам и расчетам, этого не могло быть. Согласно некоторым моделям остывания ядра Земли теплопроводность в нем выше общепринятых значений в три раза; величина конвективного теплового потока уменьшается, генерация магнитного поля прекращается. В этих моделях величина теплового потока на границе ядро – мантия за все время существования Земли линейно уменьшилась лишь на 15–20 %, что является грубым предположением. Значительные изменения теплового потока предсказывают модели остывания мантии, в которых рост конвективного теплового потока в древности происходит за счет уменьшения вязкости мантии при увеличении температуры вещества. При рассмотрении модели остывания Земли с трехкратным значением теплопроводности ядра показано, что использование комбинированной модели остывания ядра и мантии позволяет значительно увеличить в древности тепловой поток на границе ядро – мантия. Для замедления роста твердого ядра в модель включен субадиабатический слой; в результате размер твердого ядра удовлетворяет сейсмологическим наблюдениям. Модель позволяет получить достаточное количество энергии для генерации геомагнитного поля с момента появления жидкого ядра и по настоящее время. Появление твердого ядра 2,4 млрд лет назад, не приводящее в модели к резким изменениям теплового потока, согласуется с палеомагнитными наблюдениями, не фиксирующими изменений в поведении магнитного поля. Модель не исключает существование мультипольного магнитного поля на начальном этапе.

Решетняк М. Ю. Высокая теплопроводность ядра Земли и геодинамо. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-61-66>.

High thermal conductivity of the Earth's core and geodynamo

Maxim Yu. Reshetnyak

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6336>

Article info

Received
20.07.2023;

received
in revised
13.09.2023;

accepted
20.09.2023

Key words:
Earth evolution,
thermal and
compositional
convections,
geomagnetic field,
Earth's core,
core – mantle boundary

Abstract

The geomagnetic field is generated by dynamo processes in the Earth's core. This process is supported by the cooling of the planet and the growth of the solid core. It is known that the magnetic field existed long before the appearance of the solid core, although according to available estimates and calculations, this could not have happened. Moreover, according to some models, thermal conductivity in the Earth's core may be three times higher than generally accepted values. In this case, the magnitude of the convective heat flow decreases and the generation of the magnetic field stops. In the above-mentioned models it was assumed that the magnitude of the heat flow at the core – mantle boundary over the entire existence of the Earth linearly decreased by only 15–20 %. The latter is a rough guess. Significantly large changes in heat flow are predicted by models of mantle cooling, in which the growth of convective heat flow in ancient times occurs due to a decrease in the viscosity of the mantle with an increase in the temperature of the substance. Below we consider a model of the cooling of the Earth with a threefold value of the thermal conductivity of the core. It is shown that the use of a combined model of core and mantle cooling makes it possible to significantly increase the heat flow at the core – mantle boundary in ancient times. To slow down the growth of the solid core, a subadiabatic layer is included in the model. As a result, the size of the solid core in the model satisfies seismological observations. The model allows us to obtain a sufficient amount of energy to generate a geomagnetic field, starting from the moment the liquid core appeared and to the present. The appearance of a solid core 2.4 billion years ago, which does not lead to sharp changes in heat flow in the model, is consistent with paleomagnetic observations that do not record changes in the behavior of the magnetic field. The model does not exclude the existence of a multipole magnetic field at the initial stage.

For citation

Reshetnyak, M. Yu. 2024. High thermal conductivity of the Earth's core and geodynamo. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 61–66. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-61-66>.

Введение

Геомагнитное поле существует 4,2 млрд лет (*Tarduno et al., 2020*), что сравнимо с возрастом Земли (4,5 млрд лет). Магнитное поле Земли генерируется в проводящем жидком ядре механизмом динамо (*Wicht et al., 2019*). Конвекция, приводящая в действие динамо, поддерживается посредством охлаждения ядра и дифференциации вещества, связанной с ростом твердого ядра. При моделировании геомагнитных процессов удастся получить реалистичные оценки современного радиуса твердого ядра, тепловых потоков, а также энергии, необходимой для генерации магнитного поля (*Aubert et al., 2009*). Для объяснения существования геомагнитного поля до появления твердого ядра анализируются модели совместного остывания ядра и мантии, предсказывающие появление повышенных тепловых потоков на границе ядро – мантия на ранних стадиях эволюции Земли (*Reshetnyak, 2022*) вследствие низких значений вязкости вещества мантии при высоких температурах.

Скорость остывания ядра зависит от величины теплопроводности жидкого металла k . Традиционно в моделях использовались небольшие значения $k \approx 45$ Вт/(м·К). Согласно данным, полученным в работах (*Gubbins et al., 2015; de Koker et al., 2012*), k может быть в три раза больше, достигая значений $k \approx 150$ Вт/(м·К). В этом случае для поддержания конвекции в ядре Земли требуется большой поток тепла на границе ядро – мантия, соответственно, генерация магнитного поля может быть затруднена или полностью отсутствовать. В то же время изменение теплового режима в ядре Земли в силу его небольшого размера и малости теплового потока на границе ядро – мантия $Q_{\text{СМВ}}$ (сравнительно с полным тепловым потоком на поверхности Земли Q_S во внешнее пространство) не оказывает существенного влияния на эволюцию мантии. Таким образом, посредством вариации параметров модели мантии можно найти удовлетворительное решение и с более высоким значением k .

Сложность моделирования при больших значениях k заключается также в появлении ускоренного роста твердого ядра, приводящего к радиусу твердого ядра, большему наблюдаемого сейсмологами. Для решения этой проблемы в модель введена возможность возникновения субадиабатического слоя на границе ядро – мантия (*Gubbins et al., 1982*). Субадиабатический слой, в котором тепловая конвекция отсутствует, замедляет как охлаждение жидкого ядра, так и скорость роста твердого ядра.

В ходе настоящего исследования рассмотрена модель совместного остывания мантии и ядра Земли (*Stevenson et al., 1983; Schubert et al., 2001; Решетняк, 2021; Reshetnyak, 2022*), дополненная возможностью появления субадиабатического слоя на границе ядро – мантия при больших значениях теплопроводности ядра k . Подбор параметров осуществлен методом Монте-Карло в допустимых диапазонах значений.

Краткое описание модели остывания Земли

Детальное описание модели, зависящей от одной радиальной координаты r , содержится в работах (*Решетняк, 2021; Reshetnyak, 2022*). Рассмотрим совместное остывание мантии и ядра за счет теплового потока на поверхности Земли Q_S начиная с момента времени $t = 0$ – времени окончания процесса аккреции и разделения Земли на ядро ($0 \leq r < r_b$) и мантию ($r_b \leq r \leq r_s$). Предполагается, что первоначальное распределение физических полей в ядре подчиняется адиабатическому распределению. По мере охлаждения в центре ядра начинает формироваться твердое ядро $0 \leq r < c$, радиус c которого растет со временем t . Теплообмен в этой области происходит за счет теплопроводности твердого ядра, а решение удовлетворяет условию непрерывности теплового потока Q_{ICB} на границе $r = c$. Процесс охлаждения ядра определяется заданными начальными условиями и тепловым потоком $Q_{\text{СМВ}}$ на границе ядро – мантия.

Процесс охлаждения мантии задается начальными условиями, концентрацией радиоактивных источников в мантии и потоками $Q_{\text{СМВ}}$, Q_S . Предполагается, что температура в мантии постоянна по радиусу r и меняется скачком в пограничных слоях при $r = r_b$ и $r = r_s$. Для нахождения потоков $Q_{\text{СМВ}}$ и Q_S используется эмпирическая зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея, используемая в теории турбулентности. Решение комбинированной задачи совместного охлаждения ядра и мантии с учетом непрерывности тепловых потоков Q_{ICB} , $Q_{\text{СМВ}}$ дает полное решение задачи охлаждения планеты. Дополнительно в модель введена возможность появления субадиабатического слоя. Если градиент температуры в ядре становится меньше адиабатического, то появляется слой (*Gubbins et al., 1982; Reshetnyak, 2019*), в котором нет тепловой конвекции, а тепло переносится за счет процесса теплопроводности. В силу убывания плотности теплового потока с радиусом $\sim r^{-2}$ формирование слоя начинается на границе r_b , нижняя граница r_1 слоя движется со временем вниз в направлении к центру Земли, толщина субадиабатического слоя $r_b - r_1$ увеличивается.

Как показано в работе (*Reshetnyak, 2019*), при использовании метода Монте-Карло удастся подобрать параметры модели остывания системы ядро – мантия, позволяющие применить значения возраста твердого ядра размером, совпадающим с современным с точностью до 10 %, порядка 2,6 млрд лет. В модели решение удовлетворяло трем условиям: равенство радиуса твердого ядра современному $\hat{c} = 1,22 \cdot 10^6$ м; равенство

теплового потока на поверхности Земли современному $\hat{Q}_s = 44$ ТВт (Schubert et al., 2001); средние по времени значения джоулевой диссипации магнитного поля Q_J^1 до и после появления твердого ядра – более 0,5 ТВт. Последнее условие следует из оценок омической диссипации для современного магнитного поля и трехмерных моделей динамо (Roberts et al., 2003). Точные значения используемых параметров модели можно найти в цитируемых работах; вычисления проводились для значений теплопроводности $k = 7 \cdot 10^{-7}$ Вт/(м·К).

Результаты численного моделирования

Численные эксперименты с утроенным значением $k = 2,1 \cdot 10^{-6}$ Вт/(м·К) при тех же значениях остальных параметров приводят к решению либо $Q_J = 0$, что соответствует отсутствию динамо, либо даже к $Q_J < 0$. Последнее означает, что энергии в системе недостаточно не только для генерации магнитного поля, но и для поддержания конвекции, т. е. указывает на необходимость введения субадиабатического слоя. Поведение $c(t)$ в рассматриваемом случае слабо зависит от значения k . Поиск решения при тех же перечисленных выше критериях отбора и большом k приводит к решению с приемлемым Q_J , но с радиусом твердого ядра c порядка 2 000 км. Другими словами, удовлетворить всем перечисленным критериям в данной постановке задачи не удается.

Далее в работе была рассмотрена возможность появления субадиабатической области (Gubbins et al., 1982; Reshetnyak, 2019), в которой тепловая конвекция отсутствует. Обратим внимание, что это не исключает существования композиционной конвекции, связанной с ростом твердого ядра. С учетом перечисленных выше критериев отбора, также как и в работе (Reshetnyak, 2022), варьируя начальную температуру в центре Земли T_0 (6 879 К), температуру кристаллизации ядра T_s^0 (5 317 К), параметры v_0 ($1,317 \cdot 10^7$ м²/с) и A (82 463 К) в зависимости кинематической вязкости мантии от температуры T ($v = v_0 e^{\frac{A}{T}}$), а также параметр, связанный с концентрацией радиоактивных источников в мантии C_e^m ($1,34 \cdot 10^{-14}$ К/с) (Решетняк, 2021), методом Монте-Карло было получено решение, удовлетворяющее заданным критериям. В скобках приведены полученные значения параметров. Ориентировочные диапазоны параметров для метода Монте-Карло были взяты из цикла работ Лаброзе для ядра и исследований мантии (Schubert et al., 2001). Более точные оценки диапазонов автору не известны. Зависимость возраста твердого ядра и его размера от некоторых из этих параметров можно найти в работе (Reshetnyak, 2019). Для T_0 диапазон равен [5 600, 7 000] К, T_s^0 – [5 300, 5 400] К, v_0 – [10^7 , $2 \cdot 10^7$] м²/с, A – [$3 \cdot 10^4$, $9 \cdot 10^4$] К, C_e^m – [10^{-14} , 10^{-13}] К/с. Количество расчетов прямой задачи составляло порядка 2 000.

На рисунке (а) показано, как в момент времени $t = 1,1$ млрд лет граница конвективной зоны r_1 начинает изменяться, отодвигаясь от границы ядро – мантия r_b , еще до появления твердого ядра. Появление твердого ядра в момент времени $t = 2,1$ млрд лет приводит к замедлению роста субадиабатической области в связи с возникновением дополнительных источников энергии, связанных с дифференциацией вещества и латентной теплотой кристаллизации твердого ядра. Для современного момента времени $t = 4,5$ млрд лет значения r_1 и c в модели составляют 2 350 и 1 280 км, что соответствует толщине зоны тепловой конвекции $d = r_1 - c = 1 000$ км. Столь небольшая толщина конвективной зоны, близкая по порядку величины к солнечной, может представлять интерес для асимптотических оценок с малым параметром $\varepsilon = d/r_b$.

На рисунке (б) представлено поведение тепловых потоков на границах мантии Q_s , $Q_{СМВ}$, а также джоулевой диссипации Q_J . За исключением небольших деталей, отражающих влияние начальных условий, три указанные величины имеют максимум при малых t и далее убывают с ростом времени. На всем интервале времени значения Q_J положительны, что означает наличие достаточной энергии для генерации магнитного поля. Средние значения Q_J до и после появления твердого ядра соответствуют 0,8 и 0,6 ТВт. Появление твердого ядра не приводит к резкому изменению Q_J , что согласуется с палеомагнитными наблюдениями, которые не показывают резких изменений напряженности магнитного поля, его конфигурации и частоты инверсий. Однако следует отметить, что напряженность магнитного поля пропорциональна $Q_J^{1/2}$, и требуется достаточно большое изменение Q_J , чтобы изменения магнитного поля стали заметны. Модель не исключает, что сразу после разделения Земли на ядро и мантию дипольное магнитное поле могло быть достаточно слабым, поскольку величина Q_J была слишком большой для генерации крупномасштабного магнитного поля [см. подробнее о критерии существования дипольного магнитного поля в работе (Christensen

¹ В модели предполагается, что в течение значительных периодов времени вся энергия магнитного поля переходит в тепло. В этом случае джоулева диссипация может использоваться в качестве оценки величины магнитной энергии по порядку величины (Roberts et al., 2003).

et al., 2006)]. Данный критерий основан на оптимальном соотношении силы плавучести и силы Кориолиса для генерации крупномасштабного магнитного поля. При доминировании силы плавучести над силой вращения (как это предположительно происходит на Венере) генерация крупномасштабного магнитного поля невозможна.

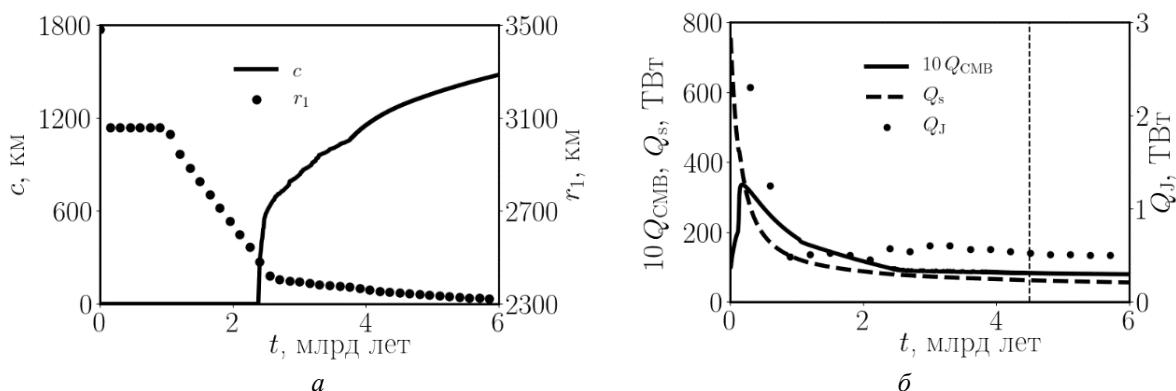


Рисунок. Эволюция во времени: a – радиуса твердого ядра c ; b – теплового потока на границе ядро – мантия Q_{CMB} , на поверхности Земли Q_s , энергии диссипации магнитного поля Q_J с учетом субадиабатического слоя.

Значения Q_{CMB} увеличены на графике в 10 раз

Figure. Evolution in time: a – radius of the solid core c ; b – heat flow at the core – mantle boundary Q_{CMB} , on the Earth's surface Q_s , energy of the magnetic field dissipation taking into account the subadiabatic layer. The values of Q_{CMB} are increased 10 times on the graph

Обратим внимание, что условие появления твердого ядра 2,4 млрд лет назад представляет большой интерес для палеомагнитных исследований, согласно которым за этот период магнитное поле не претерпевало существенных изменений. В противном случае возникли бы трудности при обосновании существования неоднократных суперхронов, сравнимой по величине частоты инверсий и напряженности магнитного поля.

Заключение

В представленной модели Земля состоит из нескольких оболочек: мантии, ядра жидкого, ядра твердого. Возникающие в ней пограничные слои ассоциируются со слоем D'' и литосферой и имеют тепловую природу. Оценки толщин пограничных слоев близки к сейсмологическим оценкам. Поскольку температура в основном объеме мантии считается постоянной, то скачки температуры в слоях несколько больше ожидаемых, в частности, вблизи поверхности Земли. Как уже отмечалось, модель ядра основана на адиабатическом приближении и полностью пренебрегает пограничными слоями. Появление субадиабатического слоя III, связанного с тепловой стратификацией, приводит к ослаблению теплопереноса в ядре. Поскольку при росте твердого ядра происходит выделение легкой примеси на $r = c$, в слое III продолжает существовать композиционная конвекция. Вопрос о том, насколько композиционная конвекция приводит к разрушению субадиабатического слоя, на настоящий момент остается открытым. Следует также отметить, что вклад мелкомасштабного магнитного поля в Q_J может быть велик; этот факт усложняет сравнение модели с палеомагнитными измерениями, основанными на поведении дипольной компоненты. При всех упомянутых недостатках модель в первом приближении позволяет согласовать данные по наблюдаемому тепловому потоку на поверхности Земли, радиусу твердого ядра и эволюции геомагнитного поля в прошлом; больших противоречий в оценках свойств вещества мантии также не наблюдается.

Благодарности

Работа, посвященная разработке модели остывания мантии, выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН. Построение модели остывания ядра Земли осуществлено при поддержке гранта РФФ 23-17-00112.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Решетняк М. Ю. Параметрическая тепловая модель эволюции Земли // Письма в Астрономический журнал. 2021. Т. 47, № 7. С. 525–534. DOI: <https://doi.org/10.31857/s032001082107007x>. EDN: KZFOSQ.
- Aubert J., Labrosse S., Poitou C. Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 179, Iss. 3. P. 1414–1428. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04361.x>.

- Christensen U. R., J. Aubert J. Scaling properties of convection-driven dynamos in rotating spherical shells and application to planetary magnetic fields // *Geophysical Journal International*. 2006. Vol. 166, Iss. 1. P. 97–114. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03009.x>.
- de Koker N., Steinle-Neumann G., Vlček V. Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid *Fe* alloys at high *P* and *T*, and heat flux in Earth's core // *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2012. Vol. 109, Iss. 11. P. 4070–4073. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1111841109>.
- Gubbins D., Thomson C., Whaler K. Stable regions in the Earth's liquid core // *Geophysical Journal International*. 1982. Vol. 68, Iss. 1. P. 241–251. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb06972.x>.
- Gubbins D., Alfè D., Davies C., Pozzo M. On core convection and the geodynamo: Effects of high electrical and thermal conductivity // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2015. V. 247. P. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.04.002>.
- Reshetnyak M. Yu. Evolution of the inner core of the Earth: Consequences for geodynamo // *Magnetohydrodynamics*. 2019. Vol. 55. N 1/2. P. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.22364/mhd.55.1-2.21>.
- Reshetnyak M. Yu. Mantle cooling regulation and ancient geomagnetic field // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2022. Vol. 22. Article number: ES2006. DOI: <https://doi.org/10.2205/2022es000797>. EDN: MDPDCD.
- Reshetnyak M. Yu. Parametric thermal model for the evolution of the Earth // *Astronomy Letters*. 2021. Vol. 47, Iss. 7. P. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063773721070070>. EDN: VETPNM.
- Roberts P. H., Jones C. A., Calderwood A. R. Energy fluxes and ohmic dissipation in the Earth's core // *Earth's core and lower mantle*. Ed. Jones C. A. London : CRC Press, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203207611>.
- Schubert G., Turcotte D. L., Olson P. *Mantle convection in the Earth and planets*. Cambridge University Press, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612879>.
- Stevenson D. J., Spohn T., Schubert G. Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets // *Icarus*. 1983. Vol. 54, Iss. 3. P. 466–489. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(83\)90241-5](https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90241-5).
- Tarduno J. A., Cottrell R. D., Bono R. K., Oda H. [et al.]. Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo // *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2020. Vol. 117, Iss. 5. P. 2309–2318. DOI: [10.1073/pnas.1916553117](https://doi.org/10.1073/pnas.1916553117).
- Wicht J., Sanchez S. Advances in geodynamo modelling // *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*. 2019. Vol. 113, Iss. 1–2. P. 2–50. DOI: <https://doi.org/10.1080/03091929.2019.1597074>.

References

- Reshetnyak, M. Yu. 2021. Parametric thermal model of the evolution of the Earth. *Pis'ma v Astronomicheskiiy zhurnal*, 47(7), pp. 525–534. DOI: <https://doi.org/10.31857/s032001082107007x>. EDN: KZFOSSQ. (In Russ.)
- Aubert, J., Labrosse, S., Poitou, C. 2009. Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo. *Geophysical Journal International*, 179(3), pp. 1414–1428. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04361.x>.
- Christensen, U. R., J. Aubert, J. 2006. Scaling properties of convection-driven dynamos in rotating spherical shells and application to planetary magnetic fields. *Geophysical Journal International*, 166(1), pp. 97–114. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03009.x>.
- de Koker, N., Steinle-Neumann, G., Vlček, V. 2012. Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid *Fe* alloys at high *P* and *T*, and heat flux in Earth's core. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 109(11), pp. 4070–4073. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1111841109>.
- Gubbins, D., Thomson, C., Whaler, K. 1982. Stable regions in the Earth's liquid core. *Geophysical Journal International*, 68(1), pp. 241–251. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb06972.x>.
- Gubbins, D., Alfè, D., Davies, C., Pozzo, M. 2015. On core convection and the geodynamo: Effects of high electrical and thermal conductivity. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 247, pp. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.04.002>.
- Reshetnyak, M. Yu. 2019. Evolution of the inner core of the Earth: Consequences for geodynamo. *Magnetohydrodynamics*, 55(1/2), pp. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.22364/mhd.55.1-2.21>.
- Reshetnyak, M. Yu. 2022. Mantle cooling regulation and ancient geomagnetic field. *Russian Journal of Earth Sciences*, 22. Article number: ES2006. DOI: <https://doi.org/10.2205/2022es000797>. EDN: MDPDCD.
- Reshetnyak, M. Yu. 2021. Parametric thermal model for the evolution of the Earth. *Astronomy Letters*, 47(7), pp. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063773721070070>. EDN: VETPNM.
- Roberts, P. H., Jones, C. A., Calderwood, A. R. 2003. Energy fluxes and ohmic dissipation in the Earth's core. In *Earth's core and lower mantle*. Ed. Jones C. A. London : CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203207611>.
- Schubert, G., Turcotte, D. L., Olson, P. 2001. *Mantle convection in the Earth and planets*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612879>.
- Stevenson, D. J., Spohn, T., Schubert, G. 1983. Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets. *Icarus*, 54(3), pp. 466–489. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(83\)90241-5](https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90241-5).

Tarduno, J. A., Cottrell, R. D., Bono, R. K., Oda, H. et al. 2020. Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 117(5), pp. 2309–2318. DOI: 10.1073/pnas.1916553117.

Wicht, J., Sanchez, S. 2019. Advances in geodynamo modelling. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 113(1–2), pp. 2–50. DOI: <https://doi.org/10.1080/03091929.2019.1597074>.

Сведения об авторе

Решетняк Максим Юрьевич – ул. Б. Грузинская, 10, г. Москва, Россия, 123995;
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН; Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6336>

Maxim Yu. Reshetnyak – 10 B. Gruzinskaya, Moscow, Russia, 123995;
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation; Dr Sci. (Phys.&Math.), Leading Researcher;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6336>