

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Особенности намагничивания природных ферримагнетиков

В. И. Трухин, В. И. Максимочкин, Ю. А. Минина^a

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики Земли. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: ^ajulia.minina@gmail.com

Статья поступила 28.01.2009, подписана в печать 04.02.2009.

Исследовано поведение двухподрешеточных природных ферримагнетиков при воздействии на них постоянных и переменных полей, повышенных и пониженных температур. Получены неизвестные ранее особенности зависимостей термонамагнитности (ТН) и парциальной термоостаточной намагнченности (ПТОН) от полей и температур. Получено самообращение термоостаточной и парциальной термонамагнитности на образце, в котором до воздействия на него полей и температур самообращения не наблюдалось.

Ключевые слова: термонамагнитность, самообращение.

УДК: 537.67, 550.38. PACS: 91.25.N, 91.25.F.

Введение

Геомагнитные исследования занимают одно из ведущих мест в геофизике, поскольку геомагнитное поле (ГМП) играет огромную роль в жизни нашей планеты и, возможно, даже в возникновении и поддержании жизни.

ГМП намагничивает ферримагнитные минералы горных пород земной коры и по направлению естественной остаточной намагнитности (ЕОН) древних горных пород можно определять эволюцию ГМП, изменения его напряженности и направления его силовых линий. Такого рода исследования называются палеомагнитными. Было установлено, что ЕОН может быть направлена по и против современного ГМП [1].

Наиболее распространенным видом намагнитности ЕОН горных пород является термоостаточная намагнитность (ТОН), изучению которой посвящено множество работ. На основе палеомагнитного изучения ТОН древних изверженных пород разных континентов и дна океана построена магнитохронологическая шкала смены знаков ЕОН за последние 600 млн лет. Было предположено, что направления ЕОН древних пород, приблизительно антипараллельные современному ГМП, возникли благодаря сменам полярности ГМП, т. е. инверсиям ГМП [2].

Помимо изменения направлений ЕОН и предполагаемых изменений полярности ГМП было обнаружено также, что палеомагнитные полюса, определенные на разных континентах, двигались в течение последних 400–600 млн лет из экваториальных зон Земли по разным траекториям к современным положениям магнитных полюсов Земли [2]. Эти результаты имели очень большое значение для геофизики, они дали простор таким нерешенным геофизическим проблемам, как тектоника литосферных плит, дрейф континентов, спрединг (расширение) дна океана.

В связи с такими серьезными палеомагнитными выводами возникла необходимость тщательного изучения палеомагнитных методов и достоверности полученных результатов.

В 1949 г. Ж. В. Грэхэм [3] впервые в своем письме Л. Ньюелю поставил вопрос о возможном существовании физических или химических механизмов приобретения горными породами обратной ЕОН, альтернативных ин-

версиям ГМП. Грэхэм изучил слой осадочных горных пород одного возраста и нашел в нем участки как с прямой, так и с обратной ЕОН. Одинаковый возраст всех изученных им осадков позволил выдвинуть предположение о том, что обратная ЕОН не могла образоваться в обратном ГМП, т. е. в результате инверсии ГМП. Иначе весь слой был бы намагничен антипараллельно направлению современного ГМП.

В 1955 г. Л. Ньюель опубликовал знаменитую работу [4], в которой предложил четыре физических механизма приобретения ферримагнитными веществами, в частности горными породами, намагнитности, антипараллельной намагничающему полюсу, за счет физико-химических процессов в самих ферримагнетиках и ферримагнитных минералах. Этот процесс получил название «самообращение намагнитности». Эта работа Л. Ньюеля является базовой для изучающих самообращение намагнитности горных пород: на ее выводах основаны рассуждения многих исследователей вплоть до наших дней.

Таким образом, возникла альтернативная ситуация: обратная намагнитность ЕОН у горной породы может возникнуть либо за счет смены полярности ГМП, либо за счет явления самообращения намагнитности. Однозначного ответа на вопросы о механизме обратного намагничивания ЕОН нет.

Решению этой проблемы посвящено много работ, в том числе и сотрудников геомагнитной лаборатории кафедры физики Земли физического факультета МГУ [5–9]. В последних публикациях представлен разработанный на базе теории Ньюеля механизм самообращения намагнитности и его компьютерная модель, а также предложен метод изучения реальности инверсий путем детального исследования особенностей намагничивания горных пород [9].

Самообращение намагнитности может быть «полным» или «частичным». Полным самообращением называется эффект, при котором намагнитность образца горной породы меняет знак, когда при своем изменении ТОН проходит через значение точки компенсации T_k и переходит в область отрицательных значений. Частичным самообращением называется аномальный спад на кривой лабораторного термонамагничивания образца или, наоборот, увеличение намагнитности при лабора-

торном терморазмагничивании ТОН или ЕОН образца, которые не сопровождаются дальнейшей сменой знака намагниченности.

Итак, эффект самообращения термонамагниченности проявляется на горных породах разного происхождения. В нашей работе изучались подводные базальты, обладающие и не обладающие эффектом самообращения.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей образования и разрушения ТОН и ПТОН, создаваемых на природных двухподрешеточных ферримагнетиках с двумя антипараллельно направленными спонтанными намагниченностями I_{BS} , I_{AS} , а также влиянию на ТОН и ПТОН постоянных и переменных магнитных полей, повышенных и пониженных температур.

Аппаратура, объект исследования, методика эксперимента

В настоящей работе использовалась автоматизированная установка, основным элементом которой является высокочувствительный вибромагнитометр ВМА-1, измеряющий намагниченность образца в присутствии и в отсутствие магнитного поля. С помощью компьютера после закрепления образца на установке по заданной программе с измерением во времени магнитных полей и температуры автоматически проводится широкий комплекс магнитных измерений, обработка, хранение и выдача экспериментальных данных [10].

Для точных измерений остаточной намагниченности использовался прибор JR-6, имеющий точность измерения компоненты остаточной намагниченности — 1%. Для размагничивания образцов в переменном поле использовалась специальная размагничающая установка с перемещающимся соленоидом и компенсацией лабораторного магнитного поля двумя парами колец Гельмгольца.

Эксперименты проводились на образцах океанских базальтов, взятых из разных областей с разными условиями формирования пород и с разными тектоническими условиями. Это образцы 59-1(4) и 62-1(6) с Красного моря, 16/30 и 16/33 с хребта Буве и 29/1(2) и 29-12(3) с разлома Романш.

Магнитные характеристики образцов представлены в таблице.

По данным термомагнитного и микрозондового анализа ферримагнитные зерна исследованных базальтов представлены титаномагнетитами. Точки Кюри ферримагнитной фракции, определенные по кривой зависимости намагниченности от температуры $I_s(T)$ в поле 0.24 Тл на разных образцах, варьировались от 185 до 250°С. Величина максимальной блокирующей температуры составляла 250°С (таблица).

Титаномагнетитовые зерна обр. 29-12 имели изометрическую форму и размеры менее 2 мкм. Величины $R_s = 0.31 - 0.38$ свидетельствуют о том, что магнитная структура ферримагнитных зерен близка к однодоменно-му состоянию.

Экспериментальные исследования

Изучение полевой зависимости ТН и ТОН

Были проведены эксперименты по изучению полевой зависимости ТН и ТОН на образцах 16/30, 16/33, 59-1(4), 62-1(6) и 29-1(2) в слабых полях 0.05, 0.075, 0.1, 0.15 и 0.2 мТл. Все образцы прогревались до 350°С, а охлаждались в соответствующем поле.

Как видно из рис. 1, *a*, у образцов, на которых ранее не было обнаружено самообращения, зависимость намагниченности от поля линейная.

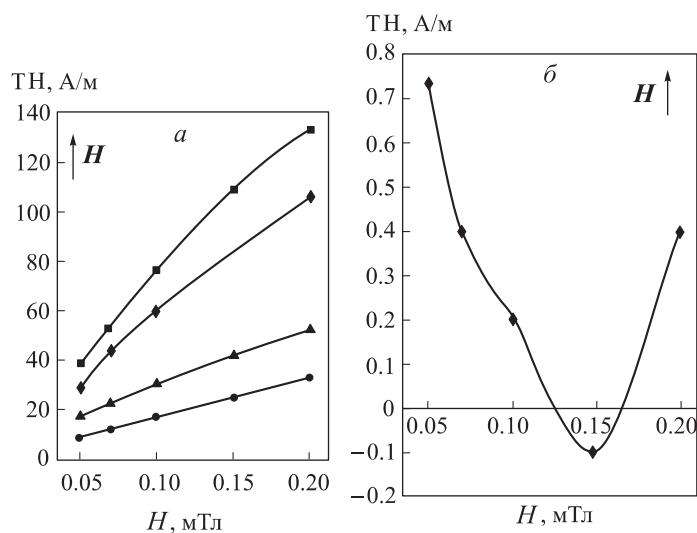


Рис. 1. (а) Полевая зависимость ТН образцов 59-1(2) (●), 62-1(6) (▲), 16/33 (■) и 16/30 (◆). (б) Полевая зависимость ТН образца 29/1(2)

У образца 29/1(2), у которого ранее наблюдалось явление самообращения, закон линейности не выполняется, кроме того, термонамагниченность в интервале полей 0.125–0.165 мТл антипараллельна полю (рис. 1, *b*).

Создание ПТОН

Были проведены исследования парциальной намагниченности, которая создавалась на образцах 29/1(2) и 16/30. Максимальная температура, до которой нагревались образцы, 350°С. Поля во всех экспериментах 0.1 мТл. Температурные интервалы для ПТОН составляли 50, 25 и 10°С. Эксперимент проводился следующим образом: нагрев без поля, при охлаждении включалось поле в выбранном интервале, затем оно выключалось и последующее охлаждение происходило уже без поля. Перед созданием ПТОН образцы размагничивались переменным полем ($H_{max} = 100$ мТл) и нагревом до $T = 350$ °С. Образец 16/30 размагничивался только переменным полем, а образец 29/1(2) — двумя способами.

Было проведено исследование поведения парциальных термонамагниченостей образца 29/1(2), образованных в узких интервалах через 10°С от 300 до 350°С в области низких температур. После охлаждения образца до комнатной температуры (рис. 2), он охлаждался в жидком азоте до $T = -181$ °С при $H = 0$. На рис. 3 представлены кривые нагрева ПТОН от низких температур. Несмотря на отсутствие поля, при нагреве наблюдается рост величины ПТОН. Эффект роста, вероятно, связан со следующим механизмом взаимодействия спонтанных намагниченностей. Как известно, $I_s = I_{BS} - I_{AS}$, при этом, как видно из рис. 3, в начале $I_{AS} > I_{BS}$ по модулю. Этим объясняется отрицательное значение ПТОН при низких температурах, затем I_{AS} при увеличении температуры начинает уменьшаться и происходит рост намагниченности I_s . При некоторой температуре I_{AS} становится равной I_{BS} , и наблюдается переход через ноль (точка компенсации). После этого перехода I_s продолжает расти, а I_{AS} имеет незначительное влияние, и намагни-

Магнитные характеристики образцов

| Образец | EOH I_n , А/м | Восприимчивость $k_0 \times 10^{-6}$, ед. СИ | Фактор Кенигсбергера Q_n | R_s | Коэрцитивная сила H_c , мТл | Остаточная коэрцитивная сила H_{cr} , мТл | Точка Кюри T_C , °С | Точка блокирования T_b , °С |
|---------------|--------------------|--|----------------------------------|-------|-------------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------------|
| Красное море | | | | | | | | |
| 59-1(4) | 47.6 | 931.5 | 221 | 0.31 | 23 | 29 | — | 250 |
| 62-1(6) | 80 | 145 | 238 | 0.36 | 8.2 | 11 | 203 | 225 |
| Хребет Буве | | | | | | | | |
| 16/30 | 75.5 | 883 | 206 | 0.38 | | 78 | 185 | |
| 16/33 | 56.5 | | | 0.36 | | | 225 | |
| Разлом Романш | | | | | | | | |
| 29-12(3) | 1.4 | 2220 | 22.5 | 0.38 | 35 | 56 | 250 | 250–480, 520 |
| 29/1(2) | 2.2 | 2050 | 27 | | | | | |

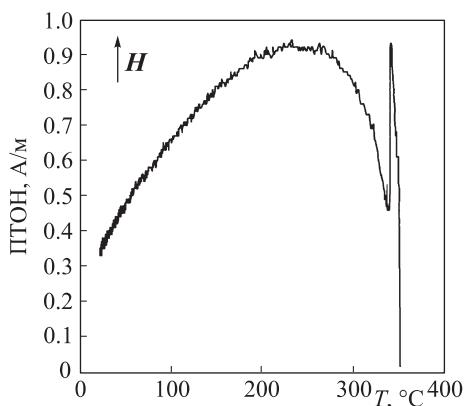


Рис. 2. Образование ПТОН в интервале $T = (350\text{--}340)$ °С в поле 0.1 мТл. Образец 29/1(2)

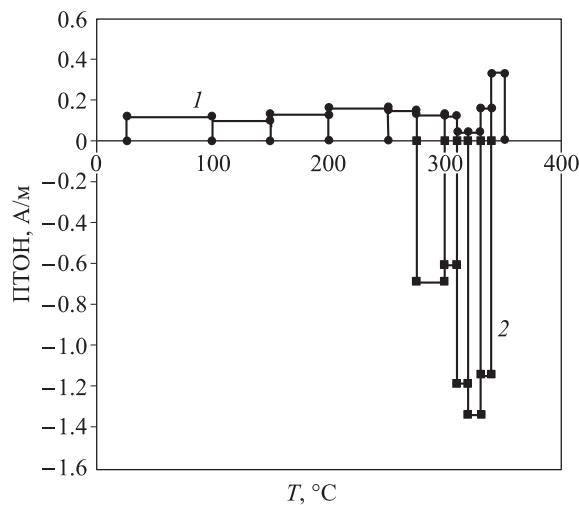


Рис. 4. Спектр ПТОН, образованных в поле 0.1 мТл и измеренных при разных температурах (образец 29/1(2)) (1 — $T = 25$ °С, 2 — $T = -180$ °С)

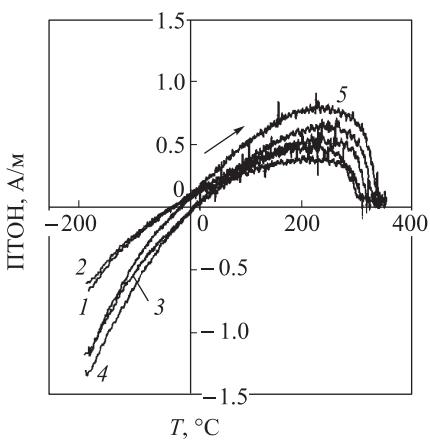


Рис. 3. Изменение ПТОН ($H = 0.1$ мТл), созданных в разных температурных интервалах, при нагреве образца 29/1(2) в отсутствие поля (1 — $T = (275\text{--}300)$ °С, 2 — $T = (300\text{--}310)$ °С, 3 — $T = (320\text{--}330)$ °С, 4 — $T = (330\text{--}340)$ °С)

ченность ПТОН продолжает увеличиваться. Затем при высокой температуре, близкой к точке Кюри, происходит уменьшение I_{BS} за счет хаотизации магнитных моментов атомов и намагниченность стремится к нулю.

Экспериментально проверялся закон аддитивности (рис. 4). По этому закону должно выполняться соотношение $\text{ТОН} = \sum_i(\text{ПТОН})_i$ (величина термоостаточной намагниченности должна равняться сумме парциальных

намагниченностей). Но на образце 29/1(2) это равенство не выполняется, после подсчета оказалось, что: $\sum \text{ПТОН} = 1.58$ А/м, $\text{ТОН} = 0.41$ А/м (здесь ПТОН и ТОН измерены при комнатной температуре). Термоостаточная намагниченность оказалась меньше почти в 4 раза, чем сумма парциальных. По-видимому, это связано с тем, что испытуемый образец обладает свойством самообращения. Отметим, что ПТОН, измеренные при $T = -180$ °С, антипараллельны намагничивающему полюсу.

Зависимость намагниченности от воздействия переменного поля

На образцах 29/1(2) и 16/30 также проводились эксперименты по изучению влияния размагничивания переменным полем полной ТОН и ПТОН. Вначале образцы размагничивались, затем создавалась ТОН при нагреве до 350 °С и охлаждении в поле 0.1 мТл, а ПТОН создавалось в интервале $T = (325\text{--}300)$ °С в поле 0.1 мТл. После образования ТОН и ПТОН происходило размагничивание образцов в кольцах Гельмгольца. Диапазон переменных полей — (2–100) мТл (рис. 5, 6).

На рис. 5 при размагничивании ПТОН наблюдалась точка компенсации T_k , а затем произошел переход через

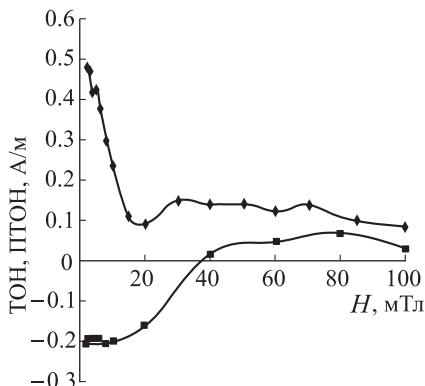


Рис. 5. Размагничивание ТОН (◆) и ПТОН (■) образца 29/1(2) переменным полем (TON: $T_{\max} = 350^{\circ}\text{C}$, $H = 0.1 \text{ мТл}$; ПТОН: $T = (325–300)^{\circ}\text{C}$, $H = 0.1 \text{ мТл}$)

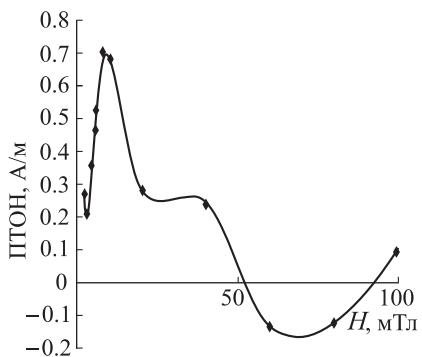


Рис. 6. Размагничивание ПТОН ($T = (325–300)^{\circ}\text{C}$, $H = 0.1 \text{ мТл}$) образца 16/30 переменным полем

ноль, намагниченность перешла в положительную область. На рис. 6 также при размагничивании ПТОН произошел переход через ноль в двух точках, образовалась отрицательная компонента небольшой величины.

На образце 29/1(2) было замечено интересное явление (рис. 7), похожее на то, что наблюдалось на рис. 3, однако в этом случае рост намагниченности происходил после размагничивания переменным полем 100 мТл при последующем нагреве без поля. Это может быть связано с ростом спонтанной намагниченности за счет спада одной из компонент I_s .

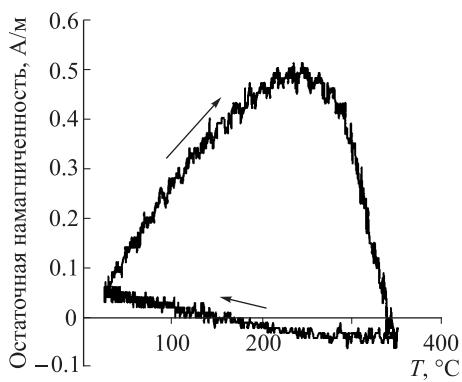


Рис. 7. Изменение остаточной намагниченности при нагреве и охлаждении образца 29/1(2) в отсутствие поля после размагничивания ПТОН ($T = (325–300)^{\circ}\text{C}$, $H = 0.1 \text{ мТл}$) переменным полем

Заключение

В ходе выполнения настоящей работы экспериментально изучалось поведение ТОН при воздействии внешних факторов — температуры и переменного поля. Получен ряд новых, ранее не наблюдавшихся особенностей. Возможно, что эти особенности связаны с эффектом самообращения термонамагниченности.

1. Обнаружена нелинейная зависимость ТОН(H) у образцов, обладающих эффектом самообращения, тогда как у образцов без данного эффекта зависимость ТОН(H) линейная. На образце с нелинейной зависимостью получено частичное и полное самообращение ТОН (рис. 1).

2. У исследованных образцов с самообращением при их нагреве в отсутствие поля от температур жидкого азота остаточная намагниченность растет в положительную сторону. Обнаружены случаи, когда точка компенсации T_k близка к комнатной температуре (рис. 3). Получено полное самообращение ПТОН при температурах ниже комнатной. Это может быть признаком самообращения ТОН. Наблюдался эффект, когда при нагреве в отсутствие магнитного поля от низких температур происходит увеличение намагниченности, хотя обычно при нагреве без поля наблюдается ее спад (рис. 3).

3. У образцов с самообращением при их термонамагничивании наблюдалось нарушение закона аддитивности ТОН — сумма парциальных намагниченостей не равняется величине полной термоостаточной намагниченности (рис. 4).

4. На образце 29/1(2) и 16/30 при размагничивании переменным полем обнаружены отрицательные и положительные компоненты. При размагничивании переменным полем полной термоостаточной намагниченности никаких особенностей не наблюдается (рис. 5, 6).

5. На образце 29/1(2) наблюдался рост намагниченности при нагреве в отсутствие поля после размагничивания образца переменным полем, что может быть обусловлено сложным взаимодействием спонтанных намагниченностей подрешеток. Этот эффект получен впервые — обычно при нагреве без поля намагниченность уменьшается. Вполне возможно, этот эффект также является признаком, по которому мы можем определить возможность самообращения на образце (рис. 7).

Итак, в работе получены результаты, среди которых ряд новых, требующих дополнительного изучения и теоретического осмысливания. Все особенности поведения ТН и ТОН получены при действии повышенных и пониженных температур и магнитных полей. Это говорит о том, по нашему мнению, что все особенности связаны с изменениями в структуре спонтанных намагниченостей магнитных подрешеток. По нашему мнению, такие особенности могут возникать и в природных условиях, и возможно, что горных пород, обладающих эффектом самообращения, существует намного больше, чем нам известно в настоящее время.

Исследование этой проблемы будет продолжено.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-05-00623а).

Список литературы

1. Brunhes B. // J. Phys. (Paris). 1906. **5**. P. 705.
2. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М., 1986.
3. Graham J. W. // J. Geophys. Res. 1949. **54**, P. 131.
4. Neel L. // Adv. Phys. 1955. **4**. P. 191.

5. Трухин В.И., Шрейдер А.А., Багин В.И. и др. // Физика Земли. 2001. № 6. С. 86.
6. Трухин В.И., Максимочкин В.И. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 1. С. 68.
7. Трухин В.И., Жиляева В.А., Курочкина Е.С. // Физика Земли. 2004. № 6, С. 42.
8. Трухин В.И., Жиляева В.А., Саврасов Д.И. и др. // Физика Земли. 1984. № 11, С. 78.
9. Трухин В.И., Безаева Н.С. // УФН. 2006. **176**. С. 507.
10. Максимочкин В.И., Трухин В.И., Гарифуллин Н.М., Хасанов Н.А. // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 5. С. 1.

Features of natural ferrimagnetics magnetization

V. I. Trukhin, V. I. Maksimochkin, Yu. A. Minina^a

Department of Physics of the Earth, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^ajulia.minina@gmail.com

Behavior of the double-sublattice natural ferrimagnetics under action of the permanent and variable magnetic fields, as well as low and high temperatures, is studied. Novel peculiarities of the TM and partial ПТОН versus applied fields and temperature are obtained. It is shown that in the sample, which reveals no self-reversal effects before application of the external field and the temperature, it is observed self-reversal thermoremainning magnetization and partial thermoremainning magnetization after application of the external fields and the temperature.

Keywords: thermoremainning magnetization, self-reversal.

PACS: 91.25.N, 91.25.F.

Received 21 January 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2009).

Сведения об авторах

1. Трухин Владимир Ильич — д. ф.-м. н., профессор, декан факультета; тел.: 939-16-82, e-mail: dean@phys.msu.su.
2. Максимочкин Валерий Иванович — д. ф.-м. н., профессор; тел.: 939-48-81, e-mail: maxvi@phys.msu.ru.
3. Минина Юлия Андреевна — мл. научн. сотр.; тел.: 939-48-81, e-mail: julia.minina@gmail.com.