

\* \* \*

Электричество, 2015, № 8, с. 44–48.

## Магниторезистивный эффект углеродных нанотрубок в магнитных материалах<sup>1</sup>

КУСТОВ Е.Ф., СЕРЕБРЯННИКОВ С.В., ЧЕРКАСОВ А.П.

*В результате расчета зонной структуры нанотрубок установлено: магнитное поле практически не влияет на нанотрубки ( $nn$ ) металлического типа; нанотрубки ( $n0$ ), если  $n$  кратно трем, при наличии магнитного поля превращаются из металлических в полупроводниковые, что вызывает магнеторезистивный эффект; нанотрубки других значений  $n$  имеют полупроводниковую структуру, причем ширина запрещенной зоны уменьшается с увеличением магнитного поля, что вызывает отрицательный магнеторезистивный эффект.*

Ключевые слова: магнеторезистивный эффект, нанотрубки, углеродные нанотрубки, зонная структура, запрещенная зона, магнитное поле

Зонная структура нанотрубок определяется их типом ( $nm$ ), в зависимости от симметрии они могут иметь металлическую или полупроводниковую электропроводность. Трубки типов ( $nn$ ) и ( $n0$ ) при  $n = 3p$ ,  $p = 1, 2, \dots$  имеют металлическую проводимость, остальные типы трубок в структуре зон имеют запрещенную зону и обладают электропроводностью полупроводникового типа. В магнитном поле нанотрубки проявляют необычные свойства магнетосопротивления, которые определяются изменением типа электропроводности в магнитном поле. Магнитная восприимчивость нанотрубок исследовалась как теоретически, так и экспериментально. Исследование магнитной восприимчивости многослойных нанотрубок проводилось в [1]. Теория взаимодействия электронных состояний с магнитным полем, теплоемкость, энтропия и магнитная восприимчивость, а также проблемы расчета

магнитных характеристик материалов последовательно изложены в [2].

В [3–5] исследовалось влияние нанотрубок на магнитные характеристики ферромагнитных материалов и параметры ферромагнитного резонанса для применения этих материалов в радиопоглощающих покрытиях.

Для сердечников магнитопроводов применяются электротехнические стали, в которых параметры электромагнитных потерь определяются эвтектическими фазами углерода и железа, свойства которых можно существенно улучшить, заменив структурную форму углеродных включений на углеродные нанотрубки. Уже получены материалы с существенно улучшенными характеристиками механической прочности – аналоги дамасской стали, когда углеродные фазы заменяются углеродными нанотрубками. Нанотрубки мешают развитию микротрещин и существенно повышают механическую прочность стальных изделий. Аналогично с заменой углеродной фазы на углеродные нанотрубки

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках работы по гранту РФФИ № 13-08-00905.

будут меняться магнитные потери электротехнической стали, особенно потери на вихревые токи. Однако это зависит от электропроводности нанотрубок, которая меняется в зависимости от их типа, свойств симметрии и структуры зоны проводимости, валентной и запрещенной зон. Запрещенная зона нанотрубки с металлической электропроводностью равна нулю, поэтому они имеют большую электропроводность, чем полупроводниковые. Легирование сталей полупроводниковыми нанотрубками может реализовывать их преимущества для магнитных материалов. Однако большинство нанотрубок имеют металлическую электропроводность, поэтому особое значение имеет исследование структуры энергетических зон как металлических, так и полупроводниковых нанотрубок.

В статье рассмотрено влияние магнитных полей на валентную зону и зону проводимости и показана,

но, что в магнитных полях в металлических нанотрубках появляется запрещенная зона, что должно приводить к появлению полупроводниковой электропроводности.

Влияние магнитного поля на зонную структуру нанотрубок рассчитывалось для трубок всех типов ( $nn$ ) и ( $n0$ ).

**Влияние магнитного поля на зонную структуру нанотрубок ( $nn$ ) типа.** Зонные структуры нанотрубок типа (33) и (55) в свободном состоянии и в магнитном поле показаны на рис. 1 и 2. Уровни энергии вершины валентной зоны и минимума зоны проводимости пересекаются на нулевом уровне энергии, их энергия не зависит от магнитного поля. Расщепление от магнитного поля наблюдается для уровней внутри валентной зоны, для которых энергия отрицательна, и вверху зоны проводимости, для которых энергия положительна, но эти уровни энергии не влияют на электропроводность нанот-

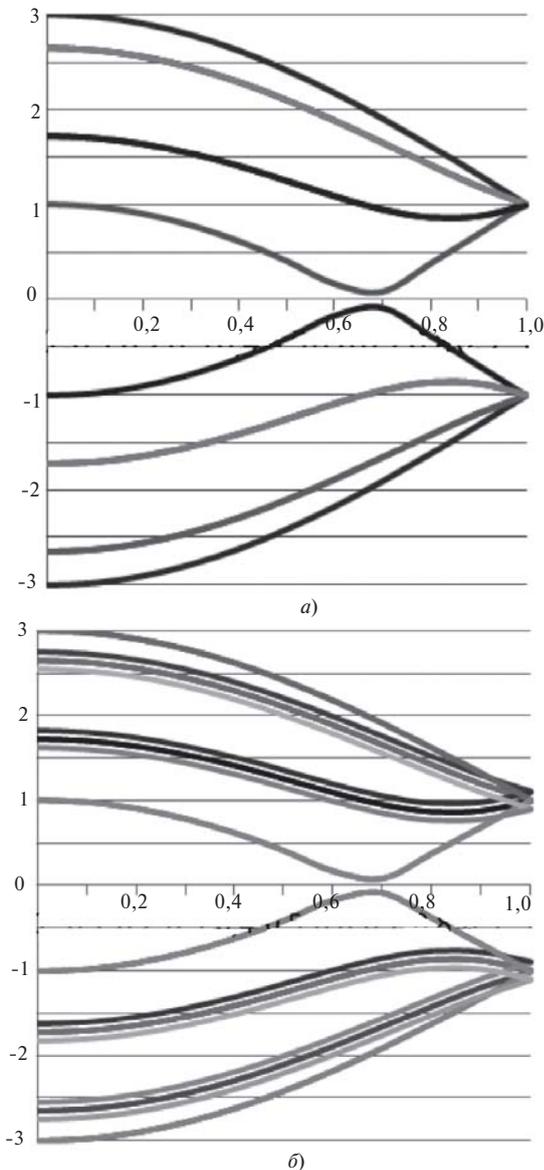


Рис. 1. Зонные структуры нанотрубки типа (33): а – в свободном состоянии; б – в магнитном поле

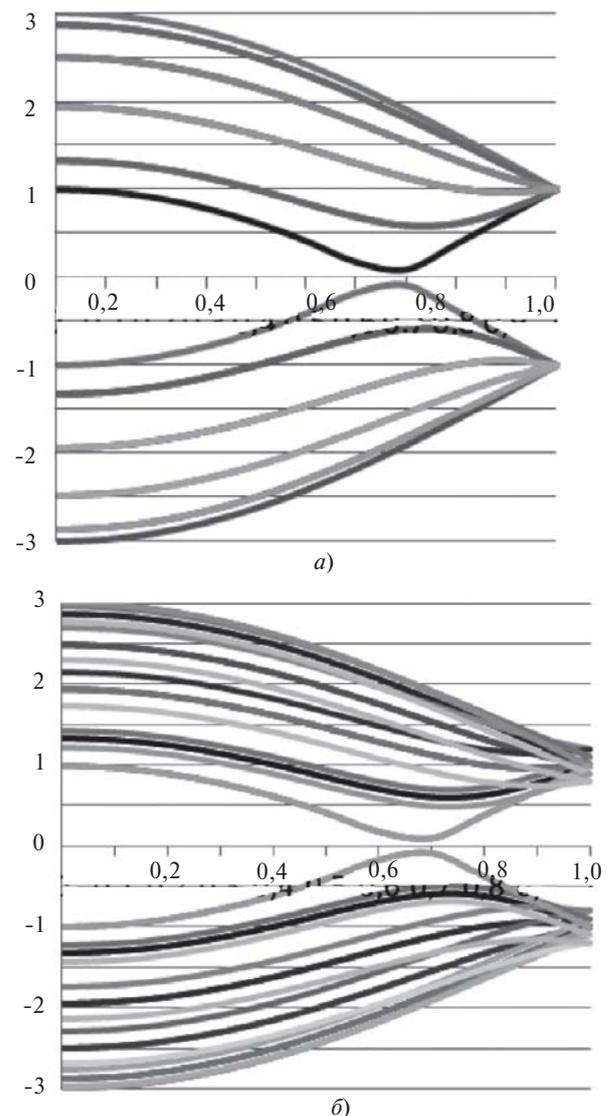


Рис. 2. Зонные структуры нанотрубки типа (55): а – в свободном состоянии; б – в магнитном поле

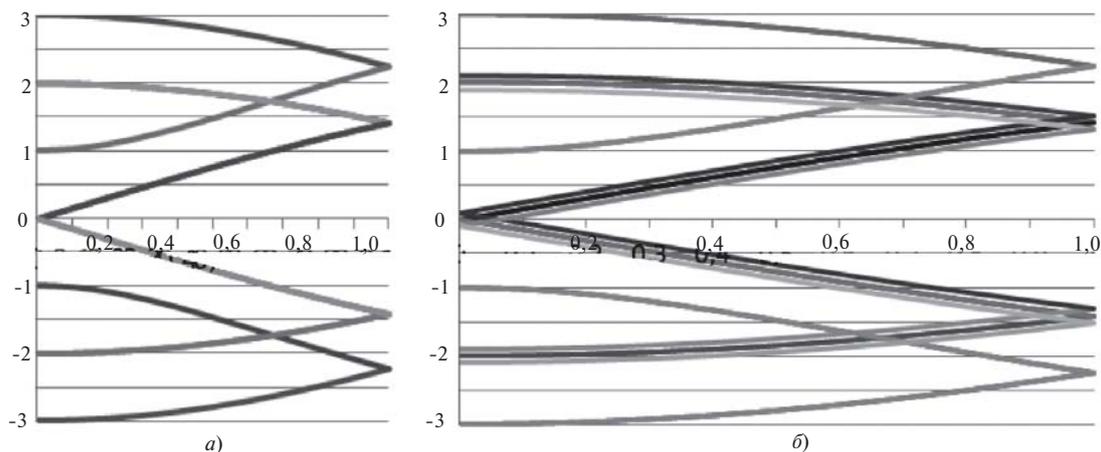


Рис. 3. Зонные структуры нанотрубки типа (30): а – в свободном состоянии; б – в магнитном поле

рубки. Поэтому можно заключить, что трубки типа  $(nn)$  остаются металлическими независимо от влияния магнитного поля.

**Влияние магнитного поля на зонную структуру нанотрубок типа  $(n0)$ .** Зонные структуры нанотрубки типа (30) представлены на рис. 3, а на рис. 4 показана зависимость ширины запрещенной зоны от магнитного поля. В магнитном поле нанотрубка типа (30) становится полупроводниковой, так как

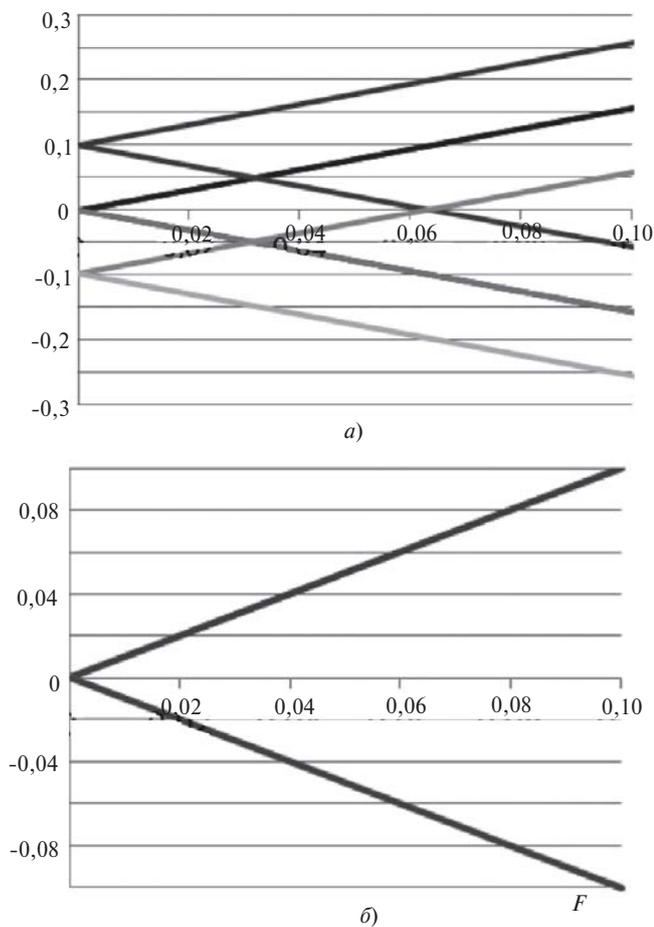


Рис. 4. Зонные структуры нанотрубки типа (30): а – вблизи запрещенной зоны; б – зависимость ширины запрещенной зоны от магнитного поля  $F$

при приложении магнитного поля возникает запрещенная зона, ширина которой пропорциональна значению магнитного поля (рис. 4).

На рис. 5 представлены зонные структуры трубки типа (40), которая имеет полупроводниковую структуру зон. Магнитное поле уменьшает ширину запрещенной зоны (интервал энергии в начале ко-

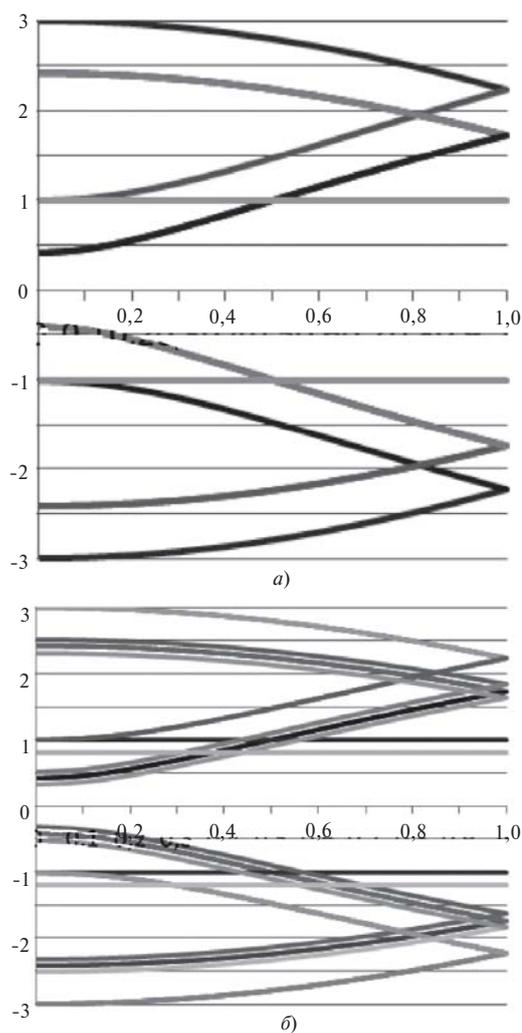


Рис. 5. Зонные структуры нанотрубки типа (40): а – в свободном состоянии; б – в магнитном поле

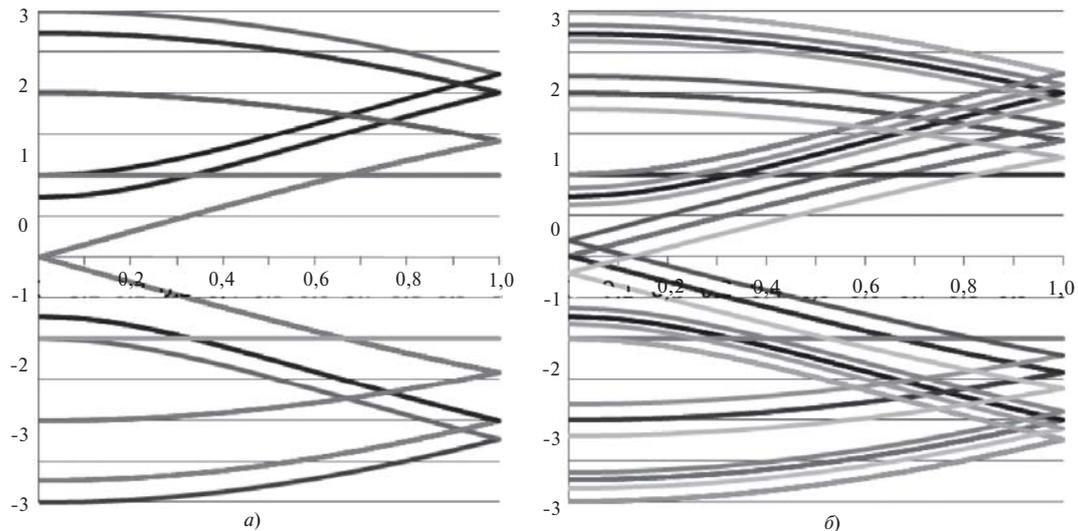


Рис. 6. Зонные структуры нанотрубки типа (60): а – в свободном состоянии; б – в магнитном поле

ординат), что должно приводить к появлению эффекта отрицательного магнетосопротивления, поскольку при приложении магнитного поля сопротивление таких трубок должно уменьшаться.

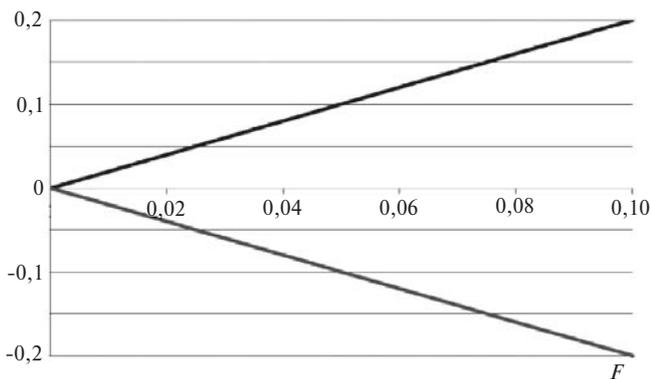


Рис. 7. Зависимость ширины запрещенной зоны от магнитного поля  $F$  нанотрубки типа (60)

Зонные структуры нанотрубки типа (60) показаны на рис. 6. Видно, что в магнитном поле возникает запрещенная зона, ширина которой растет с увеличением магнитного поля (рис. 7). Это должно приводить к появлению эффекта магнетосопротивления, поскольку при приложении магнитного поля сопротивление таких трубок должно увеличиваться.

Таким образом, расчет зонной структуры нанотрубок показал, что магнитное поле практически не влияет на нанотрубки ( $nn$ ) металлического типа. Нанотрубки типа ( $n0$ ), если  $n$  кратно трем, в магнитном поле становятся полупроводниковыми, что вызывает эффект магнетосопротивления. Нанотрубки других значений  $n$  имеют полупроводниковую структуру зон, ширина запрещенной зоны которых уменьшается с увеличением магнитного поля, что вызывает отрицательный эффект магнетосопротивления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников А.А., Аграшев В.В. Магнитная восприимчивость многослойных нанотрубок. – ФТТ, 1998, 40, №10, с. 1950–1954.
2. Кустов Е.Ф., Новоторцев В.М. Магнетохимия молекулярных структур. – М.: КРОССАНД, 2014, 400 с.
3. Серебрянников С.В., Чепарин В.П., Китайцев А.А., Смирнов Д.О., Румянцев П.А. Свойства ультрадисперсных наполнителей на основе легированных гексаферритов. – Труды XVIII МСЕМФМ, Moscow, 2010, 19 November, с. 369–375.
4. Серебрянников С.В., Чепарин В.П., Китайцев А.А., Смирнов Д.О., Румянцев П.А. Влияние толщины покрытия с наполнителем в виде высокоанизотропного феррита на величину поглощения электромагнитного излучения. – Материалы XVII Международной конф. «Магнетизм, дальнее и ближнее спин-спиновое взаимодействие», 20–22 ноября 2009, Москва-Фирсановка, с. 223–228.
5. Кустов Е.Ф., Мирошниченко А.Ю., Серебрянников С.В. Размеры и свойства кристаллических кластеров кубической и гексагональной симметрии со структурой магнетоплюмбита и шпинели. – Инженерная физика, 2010, № 3, с. 1–21.

[23.03.15]

*Авторы: Кустов Евгений Федорович окончил в 1962 г. электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ). В 1988 г. после защиты диссертации присуждена ученая степень доктора физико-математических наук. Профессор кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК) МЭИ.*

*Серебрянников Сергей Владимирович окончил в 1975 г. электромеханический факультет МЭИ. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию «Влияние электрических полей и модификации полимеров на эксплуатационные свойства материалов электротехнического назначения». Профессор, заведующий кафедрой ФТЭМК МЭИ.*

*Черкасов Анатолий Петрович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1968 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры ФТЭМК МЭИ.*

## The Magnetoresistive Effect of Carbon Nanotubes in Magnetic Materials

E.F. KUSTOV, S.V. SEREBRYANNIKOV, and A.P. CHERKASOV

*It has been found from calculations of nanotube zonal structure that magnetic field has almost no effect on metal-type nanotubes (nn); as regards (n0) nanotubes placed in magnetic field transform from metal into semiconducting ones if n is multiple of 3, which gives rise to a magnetoresistive effect; nanotubes with n having other values have a semiconductor structure, and it should be noted that the width of forbidden band decreases with increasing the magnetic field strength, which gives rise to a negative magnetoresistive effect.*

**Key words:** magnetoresistive effect, nanotubes, carbon nanotubes, zonal structure, forbidden band, magnetic field

### REFERENCES

1. Ovchinnikov A.A., Atrashev V.V. *Fizika tverdogo tela – in Russ. (Solid state physics)*, 1998, 40, No. 10, pp. 1950–1954.
2. Kustov E.F., Novotortsev V.M. *Magnetokhimiya molekulyarnykh struktur (Magneto-chemistry molecular structures)*. Moscow, Publ. KROSSAND, 2014, 400 p.
3. Serebryannikov S.V., Cheparin V.P., Kitaitsev A.A., Smirnov D.O., Rumyantsev P.A. *Trudy XVIII MCEMFМ (Proc. of the XVIII MCEMFМ)*. Moscow, 2010, 19 November, pp. 469–375.
4. Serebryannikov S.V., Cheparin V.P., Kitaitsev A.A., Smirnov D.O., Rumyantsev P.A. *Materialy XVII Mezhdunarodnoi konf. «Magnetizm, dal'nee i blizhnee spin-spinovoye vzaimodeistviye – in Russ. (Proc. of the XVII Intern. conf. «Magnetizm, far and near spin-spin interaction»)*. Moscow–Firsanovka, 2009, 20–22 November, pp. 223–228.
5. Kustov E.F., Miroshnichenko A.Yu., Serebryannikov S.V. *Inzhenernaya fizika – in Russ. (Engineering physics)*, 2011, No. 3, pp. 1–21.

*Authors: Kustov Evgenii Fedorovich (Moscow, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department, the National and Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»).*

*Serebryannikov Sergei Vladimirovich (Moscow, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, NRU «MPEI».*

*Cherkasov Anatolii Petrovich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department, NRU «MPEI».*

\* \* \*

### ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Полные тексты статей в формате .pdf размещены на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)  
Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: [etr1880@mail.ru](mailto:etr1880@mail.ru);

[l.s.kudinova@rambler.ru](mailto:l.s.kudinova@rambler.ru)