

# ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ НАНОМАГНИТНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

## INFORMATION PROCESSING BY NANOMAGNETIC LOGIC DEVICES

A. Dmitriev

*Summary.* The article discusses the principles of information processing by nanomagnetic logic devices consisting in manipulating the magnetization of individual magnetic nanoparticles in a single-domain state and combined into a logical network. In a single-domain state, nanoparticles have uniaxial magnetic anisotropy, which makes them a bistable system suitable for binary coding of information: the magnetization down corresponds to a logical «0», the magnetization upwards is «1». These two states are separated by an energy barrier, the height equal to the energy of the magnetic anisotropy. The considered logical network, consisting of magnetic nanoparticles, implies an absolutely new way of carrying out logical operations. We are talking about a network of nanomagnets connected by a dipole interaction and admitting the existence of intermediate frustrated states, analogous to quantum entanglement.

*Keywords:* information processing, nanomagnetic logic device, spintronics.

**Дмитриев Алексей Иванович**

К.ф.-м.н., доцент, Российский университет транспорта (Москва); с.н.с., Институт проблем химической физики РАН (Черноголовка)  
alex-dmitriev2005@yandex.ru

*Аннотация.* Обсуждаются принципы обработки информации наномagnитными логическими устройствами, состоящие в манипулировании намагниченностью отдельных магнитных наночастиц, находящихся в однодоменном состоянии, и объединенных в логическую сеть. В однодоменном состоянии наночастицы имеют одноосную магнитную анизотропию, что делает их бистабильной системой, пригодной для двоичного кодирования информации: намагниченности вниз соответствует логический «0», намагниченности вверх — «1». Эти два состояния отделены энергетическим барьером, высотой равной энергии магнитной анизотропии. Рассматриваемая логическая сеть, состоящая из магнитных наночастиц, подразумевает абсолютно новый способ проведения логических операций. Речь идет о сети наномagnитов, связанных дипольным взаимодействием и допускающих существование промежуточных фрустрированных состояний, аналогичных квантовой запутанности.

*Ключевые слова:* обработка информации, наномagnитное логическое устройство, спинтроника.

## Введение

У современного пользователя стремительно развивающихся электронных гаджетов могла сложиться иллюзия об их беспредельном усовершенствовании. Однако это вовсе не так. Сегодня обозначилось отклонение от закона Г. Мура [1], выполнявшегося на протяжении всей электронной эпохи, которое означает замедление темпов роста производительности электронных устройств. Связано это с тем, что как заметил Р. Ландауэр еще на заре электронной эры, при преобразовании 1 бита информации всегда выделяется теплота [2]. Пути преодоления этого термодинамического предела дальнейшего усовершенствования микроэлектроники были обозначены в 2007 году благодаря работам нобелевских лауреатов А. Ферта и П. Грюнберга [3, 4].

Сегодня в электронике и вычислительной техники для обработки информации используются электрические токи — упорядоченные потоки электрически заряженных частиц — электронов. У электронов помимо электрического заряда есть еще одно свойство — собственный магнитный момент, называемый спином. Сегодня эта степень свободы остается почти никак не за-

действованной. Научиться использовать магнитные спины для кодирования и обработки информации — магистральное направление физики твердого тела, материаловедения, нанотехнологии и информатики. Логическим завершением этой работы стало бы становление нового направления в технике, которое уже сегодня получило название — спинтроника со своими новой уникальной электронной базой и физическими принципами, которые станут основой компьютеров пятого поколения [5–9].

Технологической реализацией вычисленных процессов в компьютерах пятого поколения может стать кодирование информации магнитными спинами. Обработка информации при этом будет состоять в манипулировании намагниченностью магнитных наночастиц, находящихся в однодоменном состоянии, и объединенных в логическую сеть. Такая сеть представляет собой наномagnитное логическое устройство [10, 11]. Наномagnитная логика бездиссипативна — она не требует для совершения логических операций протекания токов, а потому приближает устройства к энтропийному пределу, предсказанному Р. Ландауэром, в то время как главная трудность современных компьютеров связана именно с диссипацией энергии.

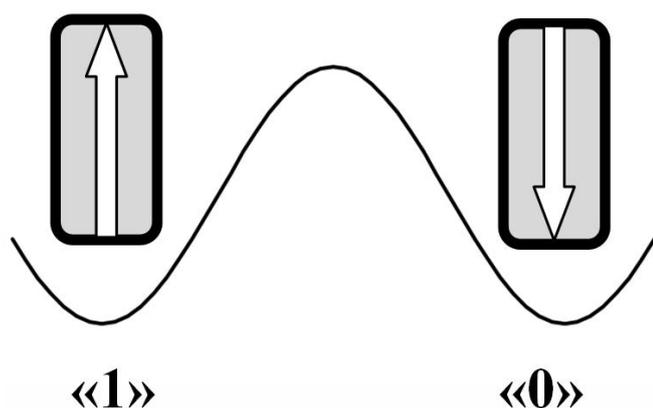


Рис. 1. Схема кодирования информации в однодоменных наночастицах: намагниченности вниз соответствует логический «0», намагниченности «вверх» — «1». Синусоида соответствует зависимости энергии магнитной анизотропии от ориентации вектора намагниченности относительно оси легкого намагничивания

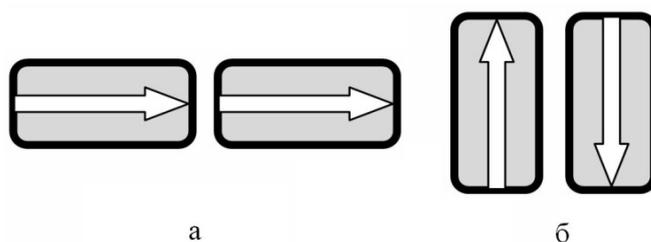


Рис. 2. Схема взаимной ориентации намагниченностей двух соседних наночастиц в зависимости от их взаимной ориентации

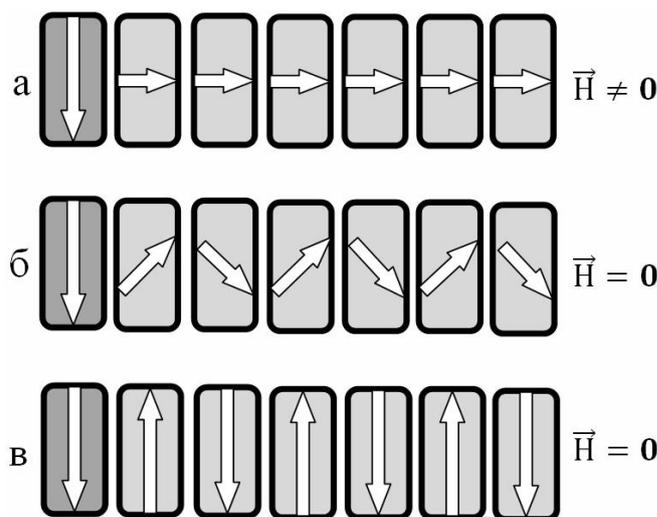


Рис. 3. Схема преобразования информации в простейшей одномерной цепочке однодоменных наночастиц

Обсуждению принципов обработки информации (выполнения логических операций) с помощью наноманнитных логических устройств посвящена настоящая статья.

### Физические основы наноманнитной логики

Наноманнитные логические устройства создаются на основе ферромагнитных наночастиц, имеющих значительную одноосную магнитную анизотропию и находящихся в однодоменном состоянии, что делает их бистабильной системой, пригодной для двоичного кодирования информации. Намагниченности вниз соответствует логический «0», намагниченности «вверх» — «1» (рис. 1). Эти два состояния отделены энергетическим барьером, высотой равной энергии магнитной анизотропии.

Взаимная ориентация намагниченностей двух соседних наночастиц определяется магнитным ди-

поль-дипольным взаимодействием, а значит, зависит от взаимной ориентации наночастиц. Энергия диполь-дипольного взаимодействия  $W_{ij}$  зависит от взаимного расположения диполей:  $W_{ij} = -p_i p_j (\cos\theta_{ij} - 3\cos\theta_i \cos\theta_j) / r_{ij}^3$ , где  $p$  — дипольный момент;  $r_i$  и  $r_j$  — радиус-векторы диполей с моментами  $p_i$  и  $p_j$ , соответственно;  $r_{ij} = r_i - r_j$ ,  $\theta_{ij}$  — угол между векторами  $p_i$  и  $p_j$ ;  $\theta_i$  и  $\theta_j$  — углы между векторами  $p_i$  и  $p_j$  и вектором  $r_{ij}$ . Из формулы видно, что для пары диполей с одинаковыми дипольными моментами  $p$  при «горизонтальной» ориентации дипольных моментов (рис. 2а) эта энергия минимальна ( $W = -2p^2/r^3$ ), когда дипольные моменты параллельны; при «вертикальной» ориентации дипольных моментов (рис. 2, б) энергия диполь-дипольного взаимодействия минимальна ( $W = -p^2/r^3$ ), когда дипольные моменты антипараллельны [12].

На рис. 3 приведена схема преобразования информации в простейшей одномерной цепочке однодоменных наночастиц.

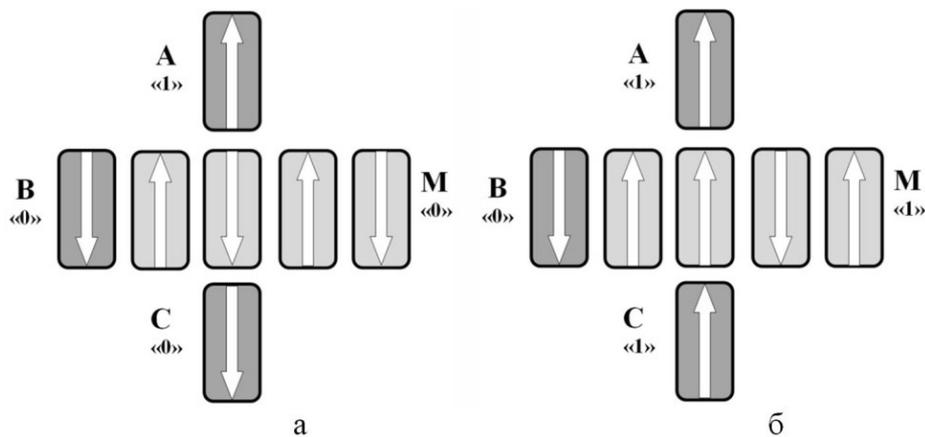


Рис. 4. Схема наномангнитного мажоритарного логического элемента. Буквами А, В, С обозначены входы схема, буквой М — выход

На «входе» магнитной цепи имеется наночастица с фиксированным направлением намагниченности (с высокой энергией магнитной анизотропии). Магнитная анизотропия наночастиц, следующих за ней, ниже. Приложение внешнего магнитного поля ориентирует магнитные моменты слабо анизотропных наночастиц вдоль осей трудного намагничивания, оставляя направление магнитного момента наночастицы на «входе» неизменным (рис. 3а). После отключения магнитного поля термические флуктуации возвращают магнитные моменты слабо анизотропных частиц в цепочке к прежнему направлению — вдоль осей легкого намагничивания (рис. 3б). Конкретное направление намагниченности — «вверх» («1») или вниз («0»), которое будут принимать магнитные моменты, регулируется диполь-дипольным взаимодействием. В рассматриваемой схеме они будут располагаться антипараллельно, начиная от частицы на «входе» (рис. 3в). Таким образом, направление намагниченности наночастицы на «выходе» (а значит и логическое состояние) является функцией состояния входного наномангнетика.

Принципы функционирования устройств наномангнитной логики

Рассмотрим принципы функционирования устройств наномангнитной логики на примере мажоритарного логического элемента. Такой элемент работает по «принципу большинства», т.е. если на большинстве его входов будет логическая «1», то и на выходе схемы установится «1»; и наоборот, если на большинстве входов будет логический «0», то и на выходе установится «0». Пусть логическая схема состоит из шести наночастиц, расположенных друг относительно друга как показано на рис. 4. Каждая из наночастиц может быть намагничена либо вниз (такая ориентация намагниченности соответствует логическому «0»), либо вверх (такая ориентация намагниченности

соответствует логической «1»). Наночастицы, обозначенные на рис. 4 буквами **A**, **B**, **C**, являются входами логической схемы. Наночастица, обозначенная на рис. 4 буквой **M**, является выходом логической схемы. Ориентация вектора намагниченности наночастиц **A**, **B**, **C** управляется с помощью внешнего воздействия, например наложением внешнего магнитного поля. Ориентация вектора намагниченности всех остальных наночастиц, включая наночастицу **M**, определяется диполь-дипольным взаимодействием.

На рис. 4а входные наночастицы внешними силами переведены в конкретные состояния намагниченности: **A** = 1, **B** = 0, **C** = 0. На центральную наночастицу, окруженную наночастицами **A**, **B**, **C**, со стороны **B** и **C** действуют силы, стремящиеся развернуть ее намагниченность вниз, а со стороны **A** действует сила, стремящаяся развернуть его намагниченность вверх. Суммарное действие двух первых сил преобладает, и намагниченность центрального элемента разворачивается вниз. За счет диполь-дипольного взаимодействия намагниченность наночастицы, расположенной справа от центральной, устанавливается антипараллельно, что в свою очередь приводит к намагниченности наночастицы **M** вниз. Это означает, что на выходе устанавливается логический «0» (рис. 4а). На рис. 4б показана другая конфигурация входных сигналов: **A** = 1, **B** = 0, **C** = 1. Рассуждая аналогичным образом, приходим к тому, что на выходе устанавливается логическая «1» (рис. 4б). Легко видеть, что рассматриваемая комбинация наночастиц, управляемая внешним магнитным полем в сочетании с диполь-дипольным взаимодействием между отдельными наночастицами выполняет мажоритарную логическую операцию. Ниже приведена ее таблица истинности.

Описанная мажоритарная логическая схема может выполнять различные бинарные логические операции

Таблица истинности мажоритарной логической операции

A	B	C	M	Бинарная логическая операция
0	0	1	0	$M(A, B, 1) = A \cup B$
0	1	1	1	
1	0	1	1	
1	1	1	1	
0	0	0	0	$M(A, B, 0) = A \cap B$
0	1	0	0	
1	0	0	0	
1	1	0	1	

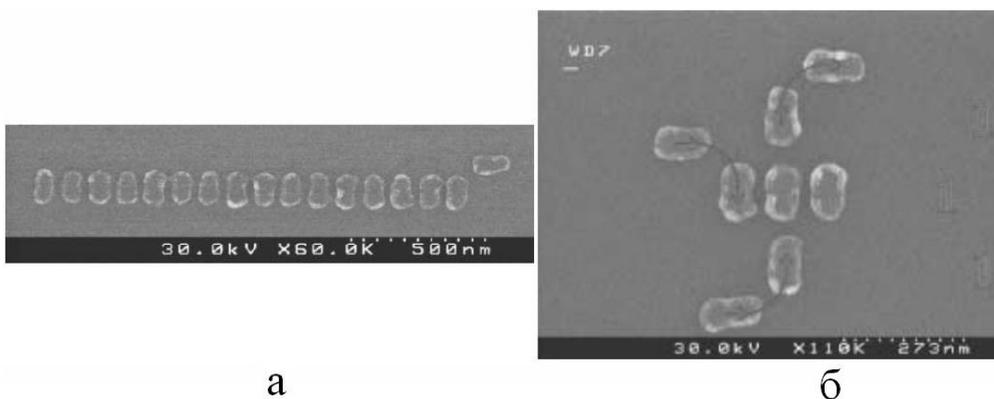


Рис. 5. Микрофотографии, полученные на сканирующем электронном микроскопе, наномангнитных логических структур: цепочка из 16 наночастиц пермаллоя размером  $70 \times 135 \times 30$  нм (а); усложненная наномангнитная логическая схема, предназначенная для тестирования логических комбинаций с обозначением красными цифрами битных состояний (б)

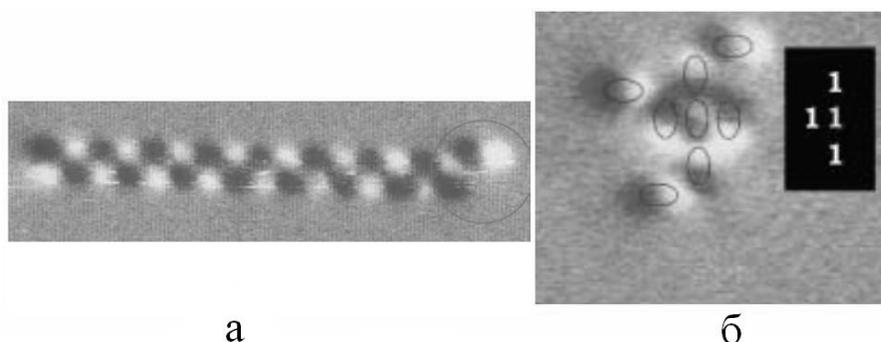


Рис. 6. Микрофотографии, полученные на магнитно-силовом микроскопе, наномангнитных логических структур пермаллоя, изображенных на рис. 5: цепочка из наночастиц (а); усложненная наномангнитная логическая схема (б)

(ИЛИ, И, а также некоторые другие), например,  $M(A, B, 1) = A \cup B$ ,  $M(A, B, 0) = A \cap B$  (см. таблицу). Более того с помощью рассмотренной логической сети можно реализовать любые, даже довольно сложные логические операции. Такая сеть, как и в квантовых устройствах, может работать со смешанной информацией, которая не извлекается и не записывается в виде отдельных битов, логических «0» и «1». В этом случае логическая сеть, состоящая из магнитных наночастиц, подразумевает абсолютно новый способ проведения логических операций,

поддерживаемый совсем иной математикой, отличной от Булевой алгебры.

#### Материалы для устройств наномангнитной логики

В настоящее время в экспериментах используют не только линейные магнитные цепочки наночастиц (рис. 5а), но и структуры с более сложной геометрией, изготовленные из пермаллоя (рис. 5б) [13].

Центральным вопросом наномагнитной логики остается вопрос регистрации результата логической операции — считывания битного состояния в рассматриваемых устройствах. На сегодня самым распространенным способом является получение контрастного магнитного изображения на магнитно-силовом микроскопе (рис. б).

Второй способ — с помощью фотоэмиссионной электронной микроскопии [14]. Понятно, что оба метода мало подходят для использования в персональных компьютерах, использующих наномагнитную логику. Поэтому одни из горячих направлений наномагнитной логики является интеграция туннельных магниторезистивных элементов (например, на основе  $\text{CoFeB}$ ) с наномагнитными логическими устройствами.

Сегодня магниторезистивные слои зарекомендовали себя как надежные элементы современных компьютеров: эффект гигантского магнитного сопротивления (ГМС) используется в считывающих головках жестких дисков, а также в технологии магниторезистивной оперативной памяти. Первые попытки создания программируемых ГМС-устройств для наномагнитной логики предприняты в работах [15].

Для наномагнитных логических устройств нужны материалы с достаточно большей энергией магнитной анизотропии для того, чтобы термические флуктуации не приводили к потере ориентации магнитного момента и к потере информации. Недавно удалось создать новые наномагниты на основе  $\epsilon$ -фазы оксида железа  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  с гигантской магнитной анизотропией. В условиях сильной анизотропии магнитные поля, требуемые для переключения направления намагниченности (а значит

изменения битового состояния), становятся неприемлемо большими. Это ставит задачу поиска немагнитного механизма управления битовым состоянием в наномагнитных логических операциях. Таковым может быть температурная манипуляция вектором намагниченности в окрестности спин-переориентационного перехода в наночастицах  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  [16–17]. Кроме того, в наночастицах  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  обнаружено магнитоэлектрическое взаимодействие, открывающее новые пути решения вопроса считывания битного состояния в рассматриваемых устройствах.

## ВЫВОДЫ

Сформулированы методы обработки информации (выполнения логических операций) с помощью наномагнитных логических устройств. Предложены принципы устройства мажоритарного логического элемента. В его основе лежит набор суперпарамагнитных наночастиц, объединенных в логическую сеть. Рассматриваемая логическая сеть подразумевает абсолютно новый способ проведения логических операций, который заключается в манипулировании намагниченностью отдельных наночастиц с помощью внешнего магнитного поля в сочетании с диполь-дипольным взаимодействием. Обсуждаемые в статье принципы способны обеспечить бездиссипативную обработку информации в энергетическом пределе, близком к оценкам Ландауэра, где на первый план выходят термодинамические аспекты.

Автор признателен сотруднику МГУПС (МИИТ) В. П. Соловьеву за полезные обсуждения. Работа поддержана грантом РФФИ № 16–07–00863а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits // *Electronics*. 1965. Vol. 38, N8. P. 114–117.
2. Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process // *IBM Journal of Research and Development*. 1961. Vol. 5, N3. P. 183–191.
3. Fert A. Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics // *Reviews of Modern Physics*. 2008. V. 80, N4. P. 1517–1530.
4. Grünberg P. A. Nobel Lecture: From spin waves to giant magnetoresistance and beyond // *Reviews of Modern Physics*. 2008. V. 80, N4. P. 1531–1540.
5. Моргунов Р.Б., Дмитриев А. И. Наноструктуры ферромагнитных полупроводников — будущее спинтроники // *Российский химический журнал*. 2009. Т. LIII, № 2. С. 36–46.
6. Дмитриев А.И., Таланцев А. Д., Зайцев С. В., Коплак О. В., Моргунов Р. Б. Нано-и гетероструктуры магнитных полупроводников для спинтроники // *Известия академии наук. Серия химическая*. 2011. Вып. 6. С. 1027–103.
7. Wolf S. A., Awschalom D. D., Buhrman R. A., Daughton J. M., Molnár S., Roukes M. L., Chtchelkanova A. Y., Treger D. M. Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future // *Science*. 2001. V. 294, N5546. P. 1488–1495.
8. Žutić I, Fabian J., Sarma S. D. Spintronics: Fundamentals and Applications // *Reviews of Modern Physics*. 2004. V. 76, N2. P. 323–410.
9. Ohno H. A window on the future of spintronics // *Nature Materials*. 2010. V. 9, N12. P. 952–954.
10. Wang J., Meng H., Wang J.-P. Programmable spintronics logic device based on a magnetic tunnel junction element // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 97, N10. P. 10D509.
11. Niemier M. T., Bernstein G. H., Csaba G., Dingler A., Hu X. S., Kurtz S., Liu S., Nahas J., Porod W., Siddiq M., Varga E. Nanomagnet logic: progress toward system-level integration // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2011. Vol. 23, N49. P. 493202.
12. Физическая энциклопедия / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. Т. 1. 704 с.

13. Imre A., Csaba G., Ji L., Orlov A., Bernstein G. H., Porod W. Majority Logic Gate for Magnetic Quantum-Dot Cellular Automata // Science. 2006. V. 311, N5758. P. 205–208.
14. Carlton D. Nanomagnetic Logic. Technical Report UCB/Eecs-2012–22. Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley / [Электронный ресурс]: <http://digitalassets.lib.berkeley.edu/techreports/ucb/text/Eecs-2012–22.pdf> (дата обращения 08.06.2017).
15. Patil Sh., Lyle A., Harms J., Lilja D. J., Wang J.-P. Spintronic Logic Gates for Spintronic Data Using Magnetic Tunnel Junctions // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Design. Amsterdam, Netherlands, 2010. P. 125–131.
16. Дмитриев А.И., Коплак О. В., Namai A., Tokoro H., Ohkoshi S., Моргунов Р. Б. Магнитный фазовый переход в нанопроволоках  $\epsilon$ -In<sub>x</sub>Fe<sub>2-x</sub>O<sub>3</sub> // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 11. С. 2140–2147.
17. Дмитриев А.И., Коплак О. В., Namai A., Tokoro H., Ohkoshi S., Моргунов Р. Б. Спин-переориентационный переход в нанопроволоках  $\epsilon$ -In<sub>0.24</sub>Fe<sub>1.76</sub>O<sub>3</sub> // Физика твердого тела. 2014. Т. 56. № 9. С. 1736–1739.

© Дмитриев Алексей Иванович (alex-dmitriev2005@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Российский университет транспорта