

## Модель системы управления движением мобильного робота на основе нечеткой логики

*А.Н. Виноградов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*

*vinogr-artem@yandex.ru*

Использование автономных мобильных роботов позволяет минимизировать человеческий фактор в экстремальных условиях. Моделирование движения таких роботов осуществляется на основе классического и нечеткого регуляторов. Недостатком данных моделей является то, что в них не учитываются динамические эффекты и влияние внешних факторов. В работе рассмотрена актуальная проблема автоматического управления движением гусеничного робота в задаче достижения заданных координат. Объектом управления является мобильный гусеничный робот, управление которым осуществляется как с пульта управления, так и полностью автономно. Построена математическая модель гусеничного робота, управляемого регулятором на основе нечеткой логики. Выбраны входные и выходные переменные нечеткой модели. Осуществлено проектирование модели в среде графического программирования LabView. Показано, что модель позволяет вручную задавать координаты точек отправления и прибытия, физические характеристики робота, коэффициенты трения, бокового и продольного сопротивления. Все выходные данные модели представлены в виде графиков, которые дают возможность оценить динамику изменения во времени сигналов управления и ошибок по положению и ориентации робота. Построена траектория движения робота. Результаты тестирования показали, что созданная в среде LabView математическая модель работоспособна. Робот достигает заданных координат при воздействии вычисленных сигналов управления. Динамические эффекты, такие как трение по грунту, боковое сопротивление и центробежная сила, возникающие при повороте, не оказывают существенного влияния на управление движением мобильного робота на основе нечеткой логики.

**Ключевые слова:** гусеничный робот; динамическая модель; нечеткая логика; графическое программирование; LabView

**Для цитирования:** Виноградов А.Н. Модель системы управления движением мобильного робота на основе нечеткой логики // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 79–86. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-79-86

## Model of a Mobile Robot Movement Control System Based on Fuzzy Logic

A.N. Vinogradov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

vinogr-artem@yandex.ru

**Abstract:** Using autonomous mobile robots permits to minimize a human factor and to implement them in various extreme conditions. Modeling such robots is carried out based on a classical and fuzzy regulator. The drawback of such models is that in them the dynamic factors and the influence of external factors have not been taken into account. In the work the actual problem of automatic traffic control of a wheeled robot in the task of achieving the specified coordinates has been considered. The object of the control is a tracked mobile robot acting by remote control and fully autonomous. A mathematical model of a tracked robot controlled by the regulator on the basis of fuzzy logic has been developed. The input and output variables of the fuzzy model have been selected. The model has been designed in the LabView graphical programming environment. The model enables to manually set the coordinates of the points of departure and arrival, the robot physical characteristics, the coefficients of friction, lateral and longitudinal resistance. All output data of the model have been presented in graphs, allowing the estimation of the dynamics of control signals changes and errors in position and orientation of the robot. The trajectory of the robot movement has been built. Testing permits to make a conclusion that the mathematical model constructed in the LabView environment is efficient. The robot in this model reaches the specified coordinates under the influence of the computed control signals. The dynamic effects, such as the ground friction, lateral resistance and the centrifugal force arising during rotation do not significantly affect the control of the mobile robot by the described fuzzy regulator.

**Keywords:** caterpillar robot; dynamic model; fuzzy logic; graphic programming; LabView

**For citation:** Vinogradov A.N. Model of a mobile robot movement control system based on fuzzy logic. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 79–86. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-79-86

**Введение.** Разработка автономных мобильных роботов – одно из наиболее актуальных направлений в робототехнике и теории автоматического управления. Использование таких роботов позволяет не рисковать человеческими жизнями и минимизировать человеческий фактор в экстремальных условиях – зонах биологического, химического или радиационного заражения. В работах [1, 2] описано моделирование движения автономных мобильных роботов на основе классического и нечеткого регуляторов. Однако в данных моделях не учитываются динамические эффекты и влияние внешних факторов: трение по грунту, суммарная реакция смятия, сдвига и среза грунта, боковое сопротивление и центробежная сила, возникающие при повороте.

Цель настоящей работы – построение математической модели движения гусеничного робота в двумерной среде без препятствий с учетом трения по грунту, бокового сопротивления и центробежной силы. Математическое моделирование проводится в среде графического программирования LabView.

**Постановка задачи.** В качестве объекта управления используется гусеничный робот. Преимуществом гусеничного движителя является повышенная проходимость. Благодаря большей по сравнению с колесной платформой площади соприкосновения с грунтом удается достигнуть низкого давления на грунт [3, 4]. На рис.1 показано, как распределены силы, действующие на гусеничный мобильный робот во время поворота на угол  $\varphi$ .

Задача управления движением робота заключается в перемещении робота из точки с координатами  $(x; y)$ , углом ориентации  $\alpha$  и начальной скоростью  $V$  в точку с координатами  $(x^*; y^*)$  и углом ориентации  $\alpha^*$ . Считается, что робот достиг точки назначения, если ошибки положения и ориентации  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\alpha$  меньше среднеквадратического отклонения навигационной системы. Используется прямоугольная система координат, начало координат может быть выбрано произвольно. Текущие координаты робота определяются в реальном времени навигационной системой, имеющей погрешность, которая учитывается при моделировании.

Динамическую модель гусеничного робота можно описать следующей системой уравнений [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_1 + F_2 - F_{cent} \cdot \sin \alpha - R_1 - R_2, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{cent} \cdot \cos \alpha - g\mu_l, \\ I_z \frac{d\omega}{dt} = M_c - M_r, \\ M_c = \frac{b}{2} [(F_1 - R_1) - (F_2 - R_2)], \\ M_r = \frac{mgl\mu_l}{3}, \\ R_1 = \left( \frac{W}{2} - \frac{HmV_1^2 x}{bR} \right) \mu_r, \\ R_2 = \left( \frac{W}{2} - \frac{HmV_2^2 x}{bR} \right) \mu_r, \\ \alpha = \arctg \frac{\omega^2 l}{4g\mu_l}, \end{array} \right.$$

где  $m$  – масса робота;  $x, y$  – координаты робота по оси абсцисс и ординат соответственно;  $F_1, F_2$  – тяга на правой и левой гусенице соответственно;  $F_{cent}$  – центробежная сила, действующая на объект при повороте;  $\alpha$  – угол скольжения;  $R_1, R_2$  – продольные силы сопротивления;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu_l$  – коэффициент бокового сопротивления;  $I_z$  – момент инерции относительно вертикальной оси  $Z$ ;  $\omega$  – угловая скорость поворота относительно центра масс;  $M_c$  – момент относительно центра масс;  $M_r$  – момент сопротивления повороту;  $W$  – вес робота;  $H$  – высота центра инерции;  $b$  – ширина колеи;  $V_1, V_2$  – скорость левой и правой гусеницы соответственно;  $\mu_r$  – коэффициент продольного сопротивления;  $l$  – длина гусеницы.

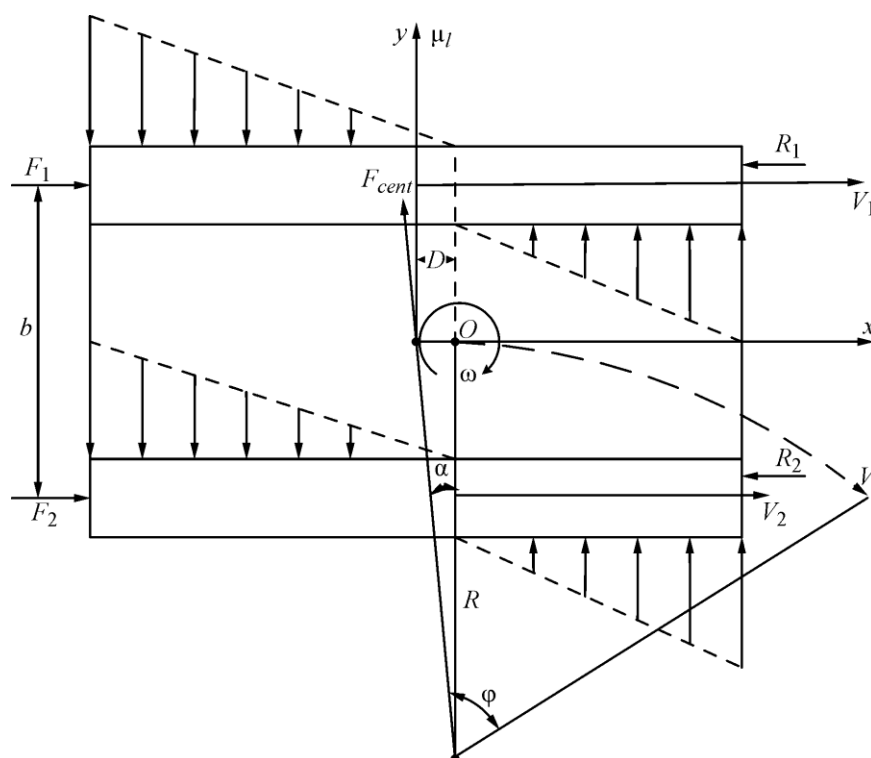


Рис.1. Иллюстрация динамики гусеничного робота во время поворота  
 Fig.1. Illustration of the dynamics of a crawler robot during a turn

**Построение нечеткого регулятора.** Для управления гусеничным роботом будем использовать нечеткий регулятор [6–8], который характеризуется меньшей требовательностью к производительности вычислительного устройства, что критично при разработке мобильных роботов. Существует несколько алгоритмов нечеткого вывода, каждый из которых имеет ограничения. Анализ этих алгоритмов позволяет найти подходящий для конкретного случая.

Алгоритм Цукамото используется только для монотонных функций принадлежности выходных переменных. Это автоматически делает его непригодным в описываемых условиях, когда используются трапециевидные функции принадлежности. Алгоритм Такаги – Сугено применяется, когда известны весовые коэффициенты при неизвестной форме функций принадлежности выходных переменных. Алгоритмы Мамдани и Ларсена схожи по своей структуре. В отличие от алгоритма Такаги – Сугено они используются, если известны формы функций принадлежности. Также они не требуют определения весовых коэффициентов и отличаются только способом выбора импликации. Так как в рассматриваемом случае можно выбрать форму функций, целесообразно применять алгоритм Мамдани.

Будем использовать следующие входные нечеткие переменные:  $\beta_1$  – ошибка угловой ориентации робота, которая определяется как разница между текущим углом ориентации робота и требуемым;  $\beta_2$  – сектор, представляющий направление, в котором находится точка назначения. В качестве выходных переменных выберем величины «тяга левой гусеницы» и «тяга правой гусеницы».

Нечеткая база знаний состоит из 81 правила, которые представляют логические соотношения между входными и выходными нечеткими переменными. Приведем формулировки некоторых правил:

1. ЕСЛИ «Ошибка угловой ориентации» есть «сильно отрицательная» И «Сектор» есть «сзади», ТО «тяга левой гусеницы» есть «полный назад» И «тяга правой гусеницы» есть «малый назад».

...

40. ЕСЛИ «Ошибка угловой ориентации» есть «близкая к нулю» И «Сектор» есть «спереди-справа», ТО «тяга левой гусеницы» есть «вперед» И «тяга правой гусеницы» есть «малый вперед».

...

81. ЕСЛИ «Ошибка угловой ориентации» есть «сильно положительная» И «Сектор» есть «сзади», ТО «тяга левой гусеницы» есть «малый назад» И «тяга правой гусеницы» есть «полный назад».

**Моделирование.** Моделирование движения мобильного робота и нечеткой системы управления проводилось в среде графического программирования LabView (иногда называемой языком G). Преимущество LabView заключается в визуализации программного кода в виде функциональных блоков, что упрощает понимание модели и последующее ее развитие и масштабирование. Кроме того, LabView поддерживает взаимодействие с множеством измерительных приборов и датчиков, что в будущем позволит быстро перейти к этапу полунатурного моделирования. По умолчанию LabView поддерживает работу с нечеткими системами, что позволяет использовать готовые алгоритмы, при этом сохраняется возможность для их модернизации.

Структурная схема модели движения мобильного робота представлена на рис.2. Обозначения на рисунке соответствуют обозначениям на рис.1 и описанию поставленной задачи. Центральным элементом является вычислительный блок, производящий ключевые математические вычисления. Туда же интегрированы и вычисления блока отрицательной обратной связи.

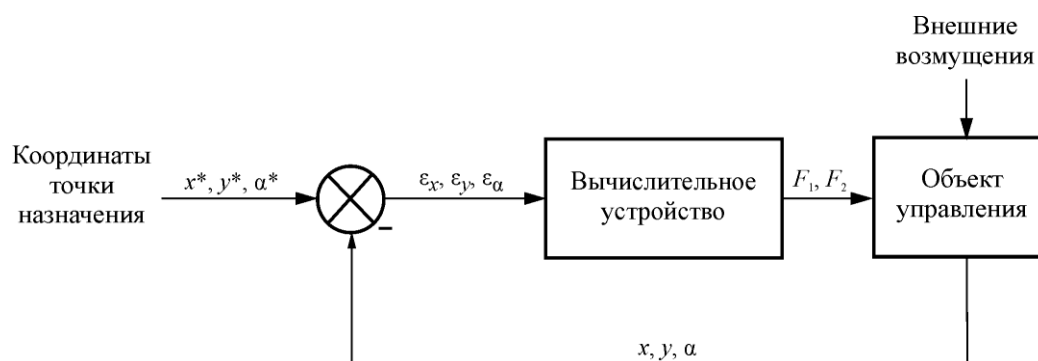


Рис.2. Структурная схема модели движения мобильного робота  
Fig.2. Structural diagram of the model of a mobile robot movement

Координаты точек отправления и прибытия, а также физические параметры робота и окружающей среды задаются вручную. На выходе вычислительного блока получают сигналы управления. Текущие координаты должны определяться непосредственно датчиками самого робота, но в рамках модели они вычисляются аналитически. При этом в модели учитывается, что навигационная система работает неидеально. Блок-диаграмма модели, построенной в среде LabView, показана на рис.3.

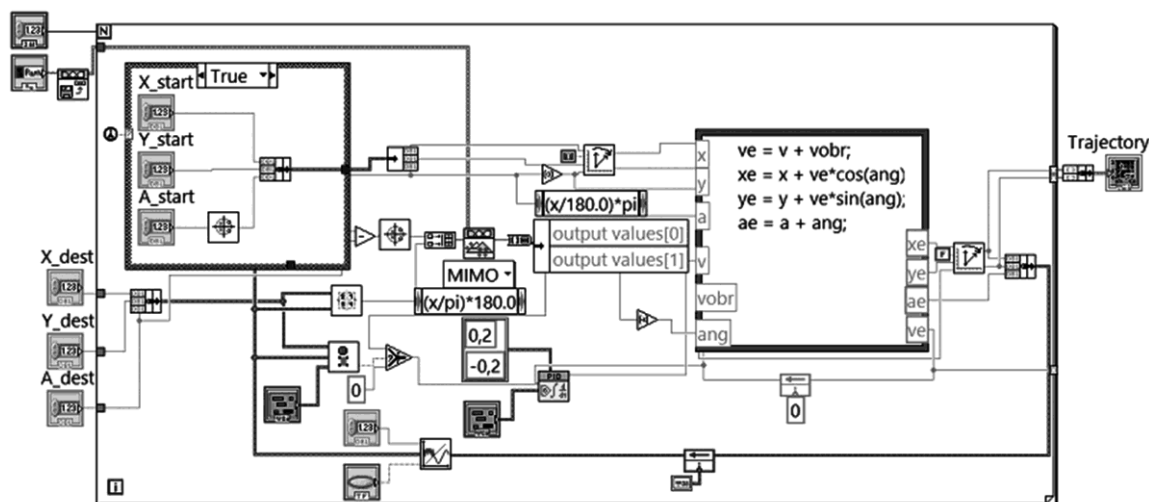


Рис.3. Блок-диаграмма модели движения мобильного робота, построенной на основе нечеткой логики  
 Fig.3. Block diagram of the motion model of a mobile robot built on the basis of fuzzy logic

**Эксперимент.** Робот из точки *A* с координатами (0; 0), ориентацией  $0^\circ$  и начальной скоростью 0,5 м/с перемещается в точку *B* с координатами (200; 200) и ориентацией  $0^\circ$ .

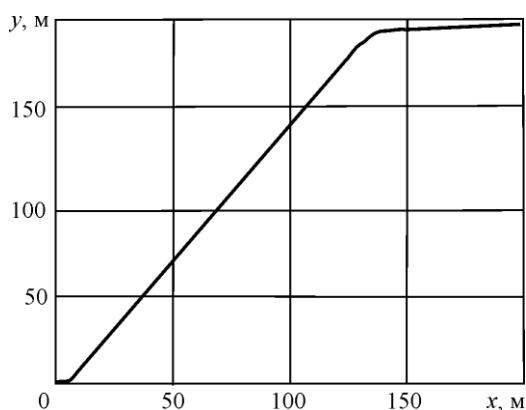


Рис.4. Траектория движения робота  
 Fig.4. The trajectory of the robot

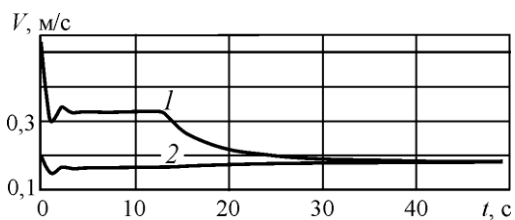


Рис.5. Скорость правой (1) и левой (2) гусениц робота во время поворота на начальном этапе движения

Fig.5. The speeds of the robot tracks during the turn at the initial stage of movement: 1 – the speed of the right track; 2 – the speed of the left track

Нечеткий регулятор позволяет роботу достигнуть поставленной цели с учетом погрешности навигационной системы, центробежной силы, сил продольного и бокового сопротивления. Основную часть пути робот движется по прямой, совершая повороты только в начале и конце траектории. Это упрощает управление и стабилизацию, а также позволяет уменьшить износ исполнительных механизмов. Моделирование движения гусеничного мобильного робота проводилось при следующих параметрах:  $r = 0,15$  м;  $b = 1$  м;  $l = 1,7$  м;  $H = 0,25$  м;  $m = 1$  кг;  $\mu_l = 0,4$ ;  $\mu_r = 0,095$ . На рис.4 изображена траектория движения робота. Видно, что робот достигает окрестности целевой точки (200; 200) с некоторой ошибкой. Это объясняется тем, что навигационная система работает с погрешностью. В данном случае среднеквадратическое отклонение навигационной системы составило 5 м, ошибка прибытия равна 2,5 м. На рис.5 показаны графики изменения скорости гусениц в момент поворота на начальном этапе движения.

**Заключение.** Работоспособность разработанной модели системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики подтверждает точность достижения точки назначения. Данная модель мобильного робота адекватно описывает поведение мобильного робота, управляемого разработанным нечетким регулятором, в условиях неидеальной навигационной системы с учетом трения грунта, продольного и бокового сопротивления.

### Литература

1. Vinogradov A., Terentev A., Petrov V., Petrov O. Development of mathematical model of moving wheeled robot using visual programming platform Labview // 2017 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). – St. Petersburg, 2017. – P. 1056–1059.
2. Разработка метода планирования траектории перемещения мобильного автономного робота в трехмерной среде на основе аппарата нечеткой логики / Д.А. Белоглазов, Е.Ю. Косенко, В.В. Соловьев и др. // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №4-1.  
URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_120\\_Beloglazov.pdf\\_847d266d50.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_120_Beloglazov.pdf_847d266d50.pdf) (дата обращения: 08.10.2018).
3. Анализ влияния параметров гусеничного движителя лесных машин на уплотнение слабых почвогрунтов / В.Н. Лобанов, Г.Н. Кривченкова, А.В. Артемов и др. // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2009. – №22. – С. 194–199.
4. Аникин А.А., Баракханов Л.В. Влияние конструктивных параметров гусеничного движителя на проходимость // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – № 9. – URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/160604.html> (дата обращения: 08.10.2018).
5. Глебов Н.А., Амин Н.М. Управление безэкипажными гусеничными машинами и роботами / Восьмая всероссийская мультиконференция по проблемам управления. – Ростов н/Д: ЮФУ, 2015. – Т. 2. – С. 200–202.
6. Финаев В.И., Игнатъев В.В. Системы управления на основе объединения классической и нечеткой моделей объекта. – М.: Физматлит, 2013. – 158 с.
7. Ходашинский И.А. Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // Проблемы управления. – 2009. – №4. – С. 15–23.
8. Akka K., Khaber F. Optimal tracking control of a trajectory planned via fuzzy reactive approach for an autonomous mobile robot // International J. of Advanced Robotic Systems. – 2018. – Vol. 15. – URL: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1729881418760624> (дата обращения: 08.10.2018).

Поступила в редакцию 05.06.2018. г.; после доработки 15.10.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

**Виноградов Артем Николаевич** – аспирант Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1.), [vinogr-artem@yandex.ru](mailto:vinogr-artem@yandex.ru)

### References

1. Vinogradov A., Terentev A., Petrov V., Petrov O. Development of mathematical model of moving wheeled robot using visual programming platform Labview. 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). St. Petersburg, 2017, pp. 1056–1059.
2. Qu Dunyue. Development of a method for planning the trajectory of moving a mobile autonomous robot in a three-dimensional environment based on a fuzzy logic apparatus. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2015, no. 4. (in Russian).
3. Lobanov V.N., Krivchenkova G.N., Artemov A.V., Belov A.A., Nesterov D.Yu. Analysis of the influence of the parameters of the tracked drive of forest machines on the compaction of weak soils. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2009, no. 22, pp. 194–199. (in Russian).
4. Anikin A.A., Barakhtanov L.V. The influence of constructive parameters of a tracked drive on the patency. *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana*, 2010, no. 09. (in Russian).
5. Glebov N.A., Amin N.M. Control of the unmanned tracked machines and robots. *Vos'maya Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya, Rostov-na-Donu: YuFU*, 2015, vol. 2, pp. 200–

202.

(in Russian).

6. Finayev V.I., Ignat'yev V.V. *Control systems based on combining classical and fuzzy object models*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 158 p. (in Russian).

7. Khodashinskiy I.A. Identification of fuzzy systems: methods and algorithms. *Problemy upravleniya = Public Administration Issues*, 2009, no. 4. pp. 15–23. (in Russian).

8. Akka K., Khaber F. Optimal tracking control of a trajectory planned via fuzzy reactive approach for an autonomous mobile robot. *International journal of advanced robotic systems*, 2018, vol. 15. Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1729881418760624> (accessed: 08.10.2018).

Received 05.06.2018; Revised 15.10.2018; Accepted 27.11.2018

**Information about the author:**

**Artem N. Vinogradov** – PhD student of the Institute of Microdevices and Control systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [vinogr-artem@yandex.ru](mailto:vinogr-artem@yandex.ru)

**Вниманию читателей журнала**

**«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

**Подписку на печатную версию журнала можно оформить:**

- по каталогу «Газеты, журналы» АО Агентство «Роспечать» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 47570
- по прямой подписке в АО Агентство «Роспечать»: [www.press.rospr.ru](http://www.press.rospr.ru)
- по каталогу АО «МК-Периодика»: [www.periodicals.ru](http://www.periodicals.ru); [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- через редакцию - с любого номера и до конца года

**Подписку на электронную версию журнала  
можно оформить на сайтах:**

- Научной электронной библиотеки: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru); [www.akc.ru](http://www.akc.ru);  
[www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru)
- ООО «УП Урал-Пресс»: [www.delpress.ru](http://www.delpress.ru)
- ООО «ИВИС»: [www.ivis.ru](http://www.ivis.ru)