

УДК 691.327

CREATION OF CONFIDENTIAL INTERVALS OF WORK OF HYDROTRANSPORT SYSTEMS

Kuznetsov Sergey Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, senior scientific employee, associate professor of the Siberian state university of means of communication, ksm56@yandex.ru

Kruglov Alexander Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of the Siberian state university of means of communication, kruglov_1945@mail.ru

Legostayeva Olga Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of the Siberian state university of means of communication, kruglov_1945@mail.ru

Abstract. The algorithm of creation of a confidential interval of model of an assessment of reliability of work of hydrotransport complexes is given. The concept of reliability is the basis for an assessment of reliability of transport and technological process, as probabilities of achievement by a complex of cars and mechanisms of an ultimate goal by production of installation and construction works. One of major factors of reliability of work of hydrotransport complexes of cars is their efficiency on time and an availability quotient to work. Outdated data on efficiency of cars are provided in normative documents during working time, which demand updating as cars are constantly improved. By results of natural tests of cars and complexes the database of values of availability quotients and efficiency on time was created. In a database the values which have passed two stages of check were brought: logical and mathematical.

In article, an example of creation of a confidential interval of values of efficiency on time depending on a complex indicator of reliability is reviewed: availability quotient. For creation of model selection of values of a database was formed. After selection formation according to GOST 8.207-76 its accessory to the law of normal distribution by means of criterion of a consent of Pearson was checked. Further, the efficiency model on time depending on an availability quotient of hydrotransport complexes (the regression equation) and a confidential interval of model was under construction.

Keywords: confidential interval, selection, regression equations, statistics.

ПОСТРОЕНИЕ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Кузнецов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент Сибирского государственного университета путей сообщения, ksm56@yandex.ru

Круглов Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент Сибирского государственного университета путей сообщения, kruglov_1945@mail.ru

Легостаева Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент Сибирского государственного университета путей сообщения, kruglov_1945@mail.ru

Аннотация. Приводится алгоритм построения доверительного интервала модели оценки надежности работы гидротранспортных комплексов. В основу оценки надежности транспортно-технологического процесса положено понятие надежности, как вероятности достижения комплексом машин и механизмов конечной цели при производстве строительно-монтажных работ. Одним из основных факторов надежности работы гидротранспортных комплексов машин является коэффициент использования их по времени и коэффициент готовности к работе. В нормативных документах приводятся устаревшие данные по коэффициентам использования машин в течение рабочего времени, которые требуют обновления, так как машины постоянно совершенствуются. По результатам натурных испытаний машин и комплексов была создана база данных значений коэффициентов готовности и коэффициентов использования по времени. В базу данных заносились значения, прошедшие два этапа проверки: логический и математический.

В статье рассмотрен пример построения доверительного интервала значений коэффициента использования по времени в зависимости от комплексного показателя надежности: коэффициента готовности. Для создания модели формировалась выборка значений из базы данных. После формирования выборки в соответствии с ГОСТ 8.207-76 проверялась ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. Далее строилась модель коэффициента использования по времени в зависимости от коэффициента готовности гидротранспортных комплексов (уравнение регрессии) и доверительный интервал модели.

Ключевые слова: доверительный интервал, выборка, регрессионные уравнения, статистика.

Актуальность. Гидротранспортные системы применяются для возведения земляного полотна при строительстве автомобильных и железных дорог. Они не требуют строительства подъездных автодорог от карьеров к месту возведения сооружения, значительно снижают площади отвода участков земли под карьеры за счет глубины их отработки. Возможна подача грунта с большей интенсивностью на ограниченные площади и в труднодоступные для автотранспорта участки сооружений, например, в узкие каньоны, пазухи сооружений и др. [2, 18]. Поэтому так важно было обновление базы данных основных показателей, влияющих на уровень надежности работы гидротранспортных комплексов, а именно: коэффициента готовности к работе и коэффициента использования машины по времени.

Для доказательства обоснованности значений базы данных по результатам натурных испытаний проводилась логическая и математическая (правомерность отклонения обосновывалась методами математической статистики) проверки испытаний [14, 15, 21].

Цель:

- статистическая обработка выборок;
- построение многофакторных математических моделей;
- построение доверительных интервалов математических моделей;

Задачи:

- создание баз данных по результатам натурных испытаний;
- обработка результатов натурных испытаний;
- построение моделей показателей натурных испытаний;
- формирование выборок остатков моделей и построения гистограмм плотности распределения остатков;
- создание программного обеспечения для построения доверительных интервалов.

Материалы и методы. При построении уравнения регрессии, связывающего коэффициент использования по времени и коэффициент готовности машины на основе выборки из базы данных по машинам, составляющих комплекс, требуется оценить и отобразить графически доверительный интервал, которому с заданной вероятностью принадлежит найденное решение. Построение доверительных интервалов уравнения регрессии производилось в соответствии с рекомендациями [4]. Рассмотрим эту проблему на простейшей задаче.

Пусть у нас имеется большой парк строительных машин, с нормальным распределением некоторых характеристик (например, коэффициент использования машин по времени за месяц). Требуется знать средние характеристики коэффициента использования по времени всех машин за последний месяц, но нет ни времени, ни желания измерять и взвешивать каждый овощ. Возникает вопрос, сколько машин надо взять на выборочную проверку для того, чтобы получить значения средних характеристик всех машин с заданной достоверностью?

Если промерить коэффициент использования по времени всех машин (это множество машин называется генеральной совокупностью), то получим со всей доступной нам точностью среднее значение коэффициента использования по времени $X_{\text{ср.ген}}$ - генеральное среднее. Нормальное распределение случайной величины определяется полностью, если известно его среднее значение и отклонение σ . Взяв некоторую выборку случайным образом и замерив нужные нам значения, получим для этой выборки: среднее значение $X_{\text{ср.выб}}$ и среднее квадратическое отклонение $S_{\text{выб}}$.

Известно, что если выборочная проверка содержит большое количество элементов (обычно n больше 30), и они взяты действительно случайным образом, то σ генеральной совокупности почти не будет отличаться от $S_{\text{выб}}$.

Тогда можно записать в общем виде оценку среднего значения генеральной совокупности с вероятностью $P(t)$

$$X_{\text{ср.ген}} = X_{\text{ср.выб}} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

Значения t , соответствующие заданному значению вероятности $P(t)$, с которой мы желаем знать доверительный интервал, приводятся в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. – Зависимость значения t от вероятности $P(t)$

$P(t)$	0,683	0,950	0,954	0,990	0,997
t	1,0	1,96	2,0	2,58	3,0

Таким образом, второй член в формуле (1) определяет диапазон (интервал), в котором находится среднее значение генеральной совокупности с заданной вероятностью.

Если объем выборки не большой, оценку среднего значения генеральной совокупности вычисляют по формуле:

$$X_{\text{ср.ген}} = X_{\text{ср.выб}} \pm t \frac{S_{\text{выб}}}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где, значение t для фиксированной вероятности $P(t)$ зависит от количества элементов n в выборке. Чем больше n , тем ближе будет полученный доверительный интервал к значению, даваемому формулой (1).

Перейдем теперь к построению доверительных интервалов для уравнения регрессии, связывающего совокупность n пар значений $X_i, Y_i, i=1,2,\dots,n$ на основе метода наименьших квадратов, следуя алгоритму, изложенному в [6].

Примем это выражение в виде

$$\check{Y}_i = b_0 + b_1 X_i, \quad (3)$$

где \check{Y} – предсказанное значение Y для данного X при определенных значениях коэффициентов b_0, b_1 . Минимизируя сумму квадратов отклонений $\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \check{Y}_i)^2$ от прямой (3), получим два нормальных уравнения относительно коэффициентов b_0 и b_1 , решение которых позволяет записать (3) в следующей форме

$$\check{Y}_i = \bar{Y} + b_1 (X_i - \bar{X}), \quad (4)$$

где $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} X_i, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} Y_i, b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X}) * (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}$.

Как уже указывалось выше, для построения доверительного интервала, в котором содержится предсказанное значение \check{Y} по формуле (4), необходимо получить оценку его дисперсии $V(\check{Y})$ и стандартного отклонения $\Delta(\check{Y}) = \sqrt{V(\check{Y})}$. Поскольку \bar{Y} и b_1 в уравнении регрессии (4) вычисляются по ограниченной совокупности значений, содержащей случайные ошибки, то они существенно влияют на величину \check{Y} . Предполагая, что Y_i и Y_j при $i \neq j$ некоррелированные величины и при этом $V(Y_i) = \sigma^2$ постоянна для всех i , приходим к выводу, что среднее арифметическое значение \bar{Y} и коэффициент b_1 уравнения регрессии (4) являются некоррелированными случайными величинами. В этом случае дисперсия предсказываемого среднего значения \check{Y}_0 , при некотором заданном X_0 , будет вычисляться по выражению

$$V(\check{Y}_0) = V(\bar{Y}) + (X_0 - \bar{X})^2 * V(b_1) = \frac{\sigma^2}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2 * \sigma^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}, \quad (5)$$

тогда оценку стандартного отклонения получим, заменяя σ^2 на её статистическую оценку s^2 , по выражению

$$\Delta(\check{Y}_0) = s * \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}} \quad (6)$$

Далее, следуя [6] получаем оценку доверительного интервала предсказанного по (4) индивидуального наблюдения:

$$\check{Y}_0 \mp t(n - 2, 1 - \frac{\alpha}{2}) \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}} * s, \quad (7)$$

где

$t(n - 2, 1 - \frac{\alpha}{2})$ – это $100(1 - \frac{\alpha}{2})\%$ -ная точка t -распределения Стьюдента с $(n - 2)$ степенями свободы; α - уровень значимости (так 95%-ный доверительный интервал обеспечивает $\alpha=0,05$).

Для проведения простого дисперсионного анализа уравнения регрессии вычисляются следующие величины:

$$\text{сумма квадратов регрессии } S_r = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) / n \right\}^2}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 / n}, \quad (8)$$

$$\text{сумма квадратов общая } S_p = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 / n, \quad (9)$$

$$\text{сумма квадратов остатков } S_s = S_p - S_r, \quad (10)$$

$$\text{стандартное отклонение } s = \sqrt{\frac{S_s}{n-2}}. \quad (11)$$

Изложенный подход реализован в программном пакете «Diagram», который предназначен для построения графиков и доверительных интервалов уравнения регрессии.

Ниже приводится результат работы программы для выборки $n=130$ пар значений коэффициентов использования по времени – K_B и коэффициента готовности – K_r земснарядов: уравнение регрессии (первые два члена) и размах доверительного интервала относительно предсказанного среднего значения K_B для произвольного значения коэффициента готовности $K_r = X_0$, составленные с помощью формулы (7).

$$\begin{aligned} \hat{Y} \pm t(128, 0,975) \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \cdot s = \\ = -0,26128 + 0,976829 \cdot K_r \pm 1,981 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{130} + \frac{(X_0 - 0,8558)^2}{0,03335}} \cdot 0,02284 \end{aligned}$$

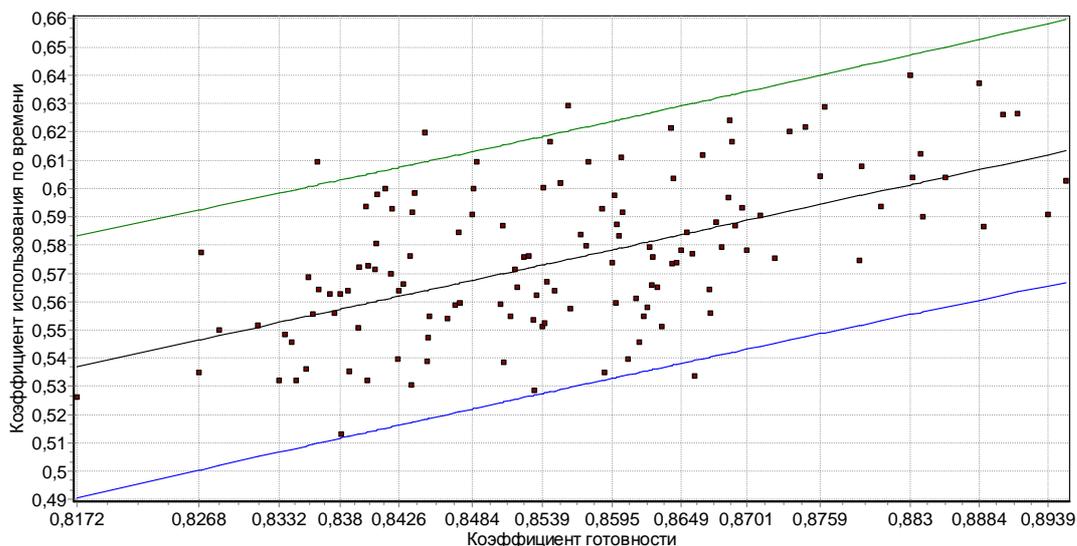


Рисунок 1 – Доверительный интервал для коэффициента использования по времени

П О С Т Р О Е Н И Е Г Р А Ф И К А

$$Kv = - 2.612780E-0001 + 9.768285E-0001 * Kg$$

Таблица - Земснаряды

Наименование показателя	Величина
ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
Количество кривых на графике, шт.	3
Уровень риска, %	5
Код расчета	0
ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
Средняя величина X	0.85581
Средняя величина Y	0.57644
Сумма квадратов регрессии	0.03039
Сумма квадратов SS остатка	0.06675
Сумма квадратов SS общая	0.09714
t(v, 1 - a / 2)	1.98097
F(2, n - 2, 1 - a)	3.09212
Остаточная дисперсия s ²	0.000521
Стандартное отклонение s	0.022836

М О Д Е Л Ь Д О В Е Р И Т Е Л Ь Н О Г О И Н Т Е Р В А Л А

- 1) $Y = Y_0 \pm 0.0452 * [1 + 0.00769 + 29.985287 * (X_0 - 8.558E-0001)]^{1/2}$
- 2) $Y = Y_0 \pm 1.981 * \{ [1 + 0.00769 + 29.985287 * (X_0 - 8.558E-0001)]^{1/2} \} * 0.02284$
- 3) $Y = Y_0 \pm 1.981 * \{ [1 + 1 / 130 + (X_0 - 8.5581E-0001) / 3.33497E-0002]^{1/2} \} * 0.02284$

Рисунок 2 – Листинг работы программы «Diagram»

На рисунке 1 приведены: диаграмма рассеяния пар значений коэффициентов использования по времени и готовности земснарядов, график уравнения регрессии и кривые доверительного интервала. Листинг работы программы приведен на рисунке 2.

Результаты. В СГУПС составлена программа «Diagram», которая позволяет построить доверительные интервалы для регрессионные уравнения [1 – 30]. На рисунках 1 и 2 приведен пример построения доверительного интервала коэффициента использования по времени гидротранспортных систем с помощью программы «Diagram».

Заключение (Выводы).

1. Рекомендуются при использовании комплексных показателей надежности строительных машин, полученных с помощью многофакторных математических моделей строить доверительные интервалы этих моделей с помощью программы «*Diagram*».

2. Анализ доверительных интервалов позволяет установить границы применения моделей, например, коэффициента использования по времени гидротранспортных систем и многих других. Этот метод является универсальным и его можно использовать для оценки реальной области применения моделей работы строительных машин, моделей технико-экономических показателей сборных железобетонных конструкций и других.

Библиографический указатель

1. *Анферов В.Н.* Имитационная модель оценки организационно-технологической надежности работы стреловых кранов / В.Н. Анферов, С.М. Кузнецов, С.И. Васильев // Изв. вузов. Строительство. –2013. –№ 1. –С. 70 – 78.

2. *Анферов В.Н.* Обоснование надежности работы строительных машин. Монография / В.Н. Анферов, С.И. Васильев, С.М. Кузнецов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, Институт нефти и газа, –2014. – 164 с.

3. *Габрусенко В.В.* Об экономической эффективности универсальных решетчатых балок / В.В. Габрусенко, В.А. Якушин, С.М. Кузнецов // Бетон и железобетон. –1990. –№ 7. –С. 12 – 14.

4. *Дрейпер Н.* Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер Г. Смит. – М., 1973. –392 с.

5. *Есина Н.А.* Обоснование способов погружения свай в мёрзлые грунты / Н.А. Есина, С.М. Кузнецов, Г.С. Шемяковский // Изв. вузов. Строительство. –2000. –№ 8. –С. 129 – 134.

6. *Исаков А.Л.* Оптимизация работы комплекса машин при строительстве объектов / А.Л. Исаков, К.С. Кузнецова, С.М. Кузнецов // Изв. вузов. Строительство. –2012. –№ 1. –С. 52 – 57.

7. *Исаков А.Л.* Формирование ресурсосберегающего комплекса машин для строительства зданий и сооружений / А.Л. Исаков, К.С. Кузнецова, С.М. Кузнецов // Механизация строительства. – 2013. – № 9. – С. 14 – 17.

8. *Кузнецова К.С.* Организационно-технологическая надежность строительства объектов / К.С. Кузнецова, С.М. Кузнецов, А.Д. Суворов, С.Н. Ячменьков // Монтажные и специальные работы в строительстве. –2007. – № 4. –С. 27 – 28.

9. *Кузнецов С.М.* Автоматизация построения моделей для оптимизации организационно-технологических решений / С.М. Кузнецов, Н.В. Холومهва, С.Э. Ольховиков // Научно-исследовательские публикации. Воронеж. – 2014. - № 7 (11). – С. 5-13.

10. *Кузнецов С.М.* Анализ остатков моделей организационно-технологических решений / С.М. Кузнецов, О.В. Соболева, М.П. Шефер // Научно-исследовательские публикации. Воронеж. – 2014. - № 7 (11). – С. 24-32.

11. *Кузнецов С.М.* Вероятностная модель работы многоступенчатых гидротранспортных систем / С.М. Кузнецов, Е.В. Лизунов, А.В. Щербаков // Изв. вузов. Строительство. –2006. –№ 9. –С. 33 – 41.

12. *Кузнецов С.М.* Комплексная оценка организационно-технологической надежности работы парка строительных машин / С.М. Кузнецов, К.С. Кузнецова, Н.А. Сироткин // Экономика ж. д. –2007. –№ 4. –С. 68 – 76.

13. *Кузнецов С.М.* Модели надежности эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 / С. М. Кузнецов, В.А. Глоотов, А. В. Зайцев // Трансп. : наука, техника, упр. - 2014. - №4. - С. 58-63.

14. *Кузнецов С.М.* Обработка результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании / С. М. Кузнецов, К. С. Кузнецова. - // Экономика ж. д. – 2010. – №7. – С. 88 – 99.

15. *Кузнецов С.М.* Обработка статистической информации / С.М. Кузнецов, В.Я. Ткаченко, Н.В. Холومهва //Научно-исследовательские публикации. – Воронеж. – 2014. – №4(7) – С.45-54.

16. *Кузнецов С.М.* Организационно-технологическая надёжность экскаваторных комплектов / С.М. Кузнецов, О.А. Легостаева // Изв. вузов. Строительство. –2005. –№ 10. –С. 62 – 69.

17. *Кузнецов С.М.* Оценка организационно-технологической надёжности строительства зданий и сооружений / С.М. Кузнецов, Н.А. Сироткин, О.А. Легостаева, С.Н. Ячменьков // Изв. вузов. Строительство. –2006. –№ 2. –С. 47 – 52.

18. *Кузнецов С.М.* Оценка технической надежности работы гидро-транспортных систем / С.М. Кузнецов // Экономика ж. д. - 2013. –№ 10. –С. 77 – 87.

19. *Кузнецов С.М.* Оценка технической надежности эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин для стрелочных переводов ВПРС-02 / С.М. Кузнецов, В.А. Глотов, А.В. Зайцев // Международный научно-исследовательский журнал: Сборник по результатам XXIII заочной научной конференции Research Journal of International Studies. Екатеринбург : МНИЖ – 2014. – № 1 (20) Часть 1. – С. 51 – 53.

20. *Кузнецов С.М.* Системотехника ресурсосберегающих технологических процессов строительства зданий и сооружений / С.М. Кузнецов // Монтажные и специальные работы в строительстве. –2005. – № 10. –С. 19 – 24.

21. *Кузнецов С.М.* Совершенствование обработки результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании / С.М. Кузнецов // Экономика ж. д. - 2013. –№ 7. –С. 90 – 97.

22. *Легостаева О.А.* Многофакторная модель оценки эффективности инвестиционных проектов / О.А. Легостаева, С.М. Кузнецов // Экономика ж. д. –2004. –№ 1. –С. 55 – 64.

23. *Лизунов Е.В.* Обоснование экономического эффекта от эжектирования напорного трубопровода / Е.В. Лизунов, В.А. Седов, С.М. Кузнецов // Механизация строительства. –2006. –№ 7. –С. 15 – 19.

24. *Майданик Е.М.* Автоматизация расчетов технико-экономических показателей железобетонных конструкций / Е.М. Майданик, С.М. Кузнецов // Пром. стр-во и инженер. сооружения. - 1987. - № 1. - С. 25-26.

25. *Пермяков В.Б.* Оценка организационно-технологической надежности работы строительных машин / В.Б. Пермяков, С.М. Кузнецов // Механизация строительства. –2008. –№ 11. –С. 24 – 29.

26. *Перцев В.П.* Техничко-экономическое обоснование инвестиционных проектов / В.П. Перцев, В.С. Воробьев, С.М. Кузнецов, О.А. Легостаева // Транспортное строительство. –2004. –№ 3. –С. 17 – 20.

27. *Редько Ю.М.* Автоматизация технико-экономической оценки эффективности конструкций промышленных зданий / Ю.М. Редько, С.М. Кузнецов, Ю.А. Рогатин// Бетон и железобетон. –1989. –№ 1. –С. 12 –14.

28. *Рогатин Ю.А.* Экономико-математическая модель расчета на ЭВМ технико-экономических показателей зданий из сборного железобетона

бетона / Ю.А. Рогатин, С.М. Кузнецов // Обзорная информация. – М.: ВНИИНТПИ, 1991. –64 с.

29. *Седов В.А.* Обоснование применения машин и механизмов для строительства сооружений / В.А. Седов, В.П. Перцев, С.М. Кузнецов // Транспортное строительство. –2004. –№ 2. –С. 12 – 14.

30. *Чулкова И.Л.* Вероятностная модель подбора тяжелых бетонов / И.Л. Чулкова, Т.А. Санькова, С.М. Кузнецов // Изв. вузов. Строительство. –2008. –№ 10. –С. 39 – 43.

Статья поступила в редакцию 16.07.2014 г.