

ВЛИЯНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СОЧЕТАНИЙ СОБЫТИЙ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЩЕРБА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

Кушникова Е.В., Кушников В.А., Богомолов А.С.,

*Институт проблем точной механики и управления — обособленное структурное
подразделение ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия
okusch9@gmail.com, alexbogomolov@yandex.ru, kushnikoff@yandex.ru,*

Резчиков А.Ф.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
rw4cy@mail.ru*

Аннотация. В статье разработана математическая модель, позволяющая учесть влияние критических сочетаний событий при решении задачи минимизации ущерба от воздействия воздушных загрязнителей на население, сельское хозяйство и окружающую среду. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании систем экологического мониторинга.

Ключевые слова: крупномасштабные системы, управление, экологический мониторинг, загрязнение атмосферы, математическая модель, причинно-следственные связи.

Введение

Известно [1], что минимально допустимая величина ущерба, причиняемого атмосферными выбросами промышленного предприятия крупномасштабной системе с учетом штрафов за превышение предельно допустимых концентраций загрязнителей определяется из решения задачи:

$$\begin{aligned} & \rightarrow \\ & Cf (Cf_1, Cf_2, Cf_3, Cf_4, Cf_5) \rightarrow \min \\ & Cf_1 = \int_{t_2}^{t_1} Cf_1^* (\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) dt, \quad Cf_2 = \int_{t_2}^{t_1} Cf_2^* (\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) dt, \\ & Cf_3 = \int_{t_2}^{t_1} Cf_3^* (\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) dt, \quad Cf_4 = \int_{t_2}^{t_1} Cf_4^* (\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) dt \quad (1) \\ & Cf_5 = \int_{t_2}^{t_1} L(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) + S(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) dt \end{aligned}$$

при известных ограничениях и граничных условиях:

$$\begin{aligned} & R_i (\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) \geq 0, \quad i = \overline{1, k_1}, \quad R_i (\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) \leq 0, \quad i = \overline{n_1 + 1, k_2}, \\ & F_i^{(t_1)} (\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) = 0, \quad i = \overline{n_2 + 1, k_3}, \quad F_i^{(t_2)} (\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) = 0, \quad i = \overline{n_3 + 1, k_4} \end{aligned}$$

(Cf_1 - ущерб, связанный с ростом заболеваемости населения из-за воздействия атмосферных загрязнителей; Cf_2 - потери сельского хозяйства в результате воздействия атмосферных выбросов; Cf_3 - потери, связанные с изменением окружающей природной среды; Cf_4 - потери из-за ухудшения качества жизни населения; Cf_5 - потери промышленного предприятия; S - штрафные санкции за нарушение санитарно-гигиенических нормативов).

Для решения задачи (1) разработан комплекс математических моделей [2], позволяющий определить величину целевой функции из решения систем нелинейных дифференциальных уравнений системной динамики. Структурная схема комплекса математических моделей приведена на рисунке 1.

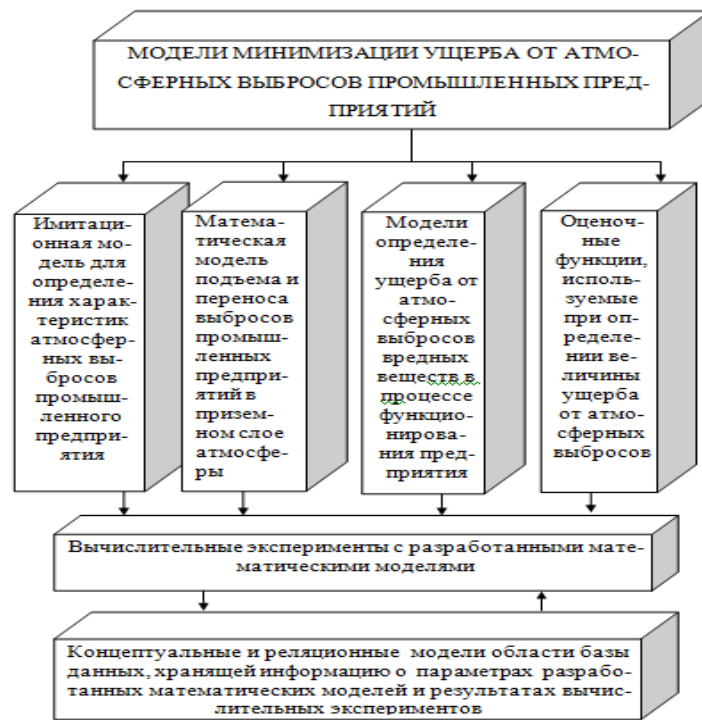


Рис. 1. Математические модели задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий

Вычислительные эксперименты, проведенные с разработанными моделями [2], показали, что погрешность вычисления целевой функции может изменяться в зависимости от критического сочетания комплекса событий, каждое из которых по отдельности значительно не влияет на результаты расчетов.

1. Постановка задачи

Разработать математическую модель, позволяющую оценить степень влияния критических сочетаний событий на точность математических моделей (2), используемых при минимизации ущерба от воздействия загрязнителей атмосферы на население, сельское хозяйство и окружающую среду.

2. Математическая модель и подход к решению

При проведении вычислительных экспериментов с (2) было установлено, что критические сочетания событий наибольшее влияние оказывают на модели, используемые для расчета распределения концентрации поллютантов $c_j = f_j(x, y, z, \vec{a})$ по контролируемым объектам и территориям. С учетом этого обстоятельства математическая модель, разрабатываемая для решения поставленной задачи, имеет вид системы продукций:

ПРОДУКЦИЯ j . ЕСЛИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ СОВОКУПНОСТЬ УСЛОВИЙ: $\langle (B_1(x, y, z, \vec{a}) R_1 B_2(x, y, z, \vec{a}) R_2 \dots R_{k-1} B_k(x, y, z, \vec{a})) \rangle_j$, ТО ИСКОМАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИМЕЕТ ВИД: $c_j = f_j(x, y, z, \vec{a}) R_i \in \{AND, OR, NOT, AND - NOT, OR - NOT\}$, $i = \overline{1, k}$ ($j = \overline{1, m}$) (2)

ЕСЛИ НЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ НИ ОДНО ИЗ УСЛОВИЙ $(B_1(x, y, z, \vec{a}) R_1 B_2(x, y, z, \vec{a}) R_2 \dots R_{k-1} B_k(x, y, z, \vec{a}))_j$, $j = \overline{1, m}$, ТО $c = f(x, y, z, \vec{a})$

ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ИЗ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА И ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ

Всего система состоит из 33 сочетаний событий, формализованных с использованием продукций (2). В таблице 1 приведены первые 9 сочетаний событий, состоящих из комбинаций внешних факторов $F_i, i = \overline{1,7}$ и управлений $E_i, i = \overline{1,7}$, влияющих на концентрацию загрязнителей атмосферы.

Таблица 1. Сочетания событий, влияющих на точность моделей (2)

№	Обозначение сочетаний событий	Описание сочетаний событий
1	2	3
1	m_1	События: F_1 (высокий уровень смога) и E_2 (уменьшение концентрации поллютантов на 10%)
2	m_2	События: F_2 (задымленность от лесных пожаров) и E_3 (уменьшение концентрации поллютантов на 20%)
3	m_3	События: F_1 (высокий уровень смога) и E_2 (уменьшение концентрации поллютантов на 40%)
4	m_4	События: F_4 (зимний антициклон) и E_2 (уменьшение концентрации поллютантов на 10%)
5	m_5	События: F_1 (высокий уровень смога) и E_3 (уменьшение концентрации поллютантов на 20%)
6	m_6	События: F_7 (нет внешних воздействий, влияющих на ущерб) и E_5 (уменьшение концентрации на 40%)
7	m_7	События: F_7 (нет внешних воздействий, влияющих на ущерб) и E_3 (уменьшение концентрации поллютантов на 20%)
8	m_8	События: F_5 (повышенный уровень смога и задымленности города из-за лесных пожаров) и E_5 (уменьшение концентрации на 40%)
9	m_9	События: F_1 (высокий уровень смога) и F_3 (летний антициклон), и E_2 (уменьшение концентрации поллютантов на 10%)

На рисунке 2 приведена диаграмма, характеризующая изменение погрешности определения потерь от воздействия воздушных загрязнителей атмосферы при различных сочетаниях событий $m_i, i = \overline{1,33}$, состоящих из комбинаций внешних факторов $F_i, i = \overline{1,7}$ и управлений $E_i, i = \overline{1,7}$, влияющих на математическую модель (2).

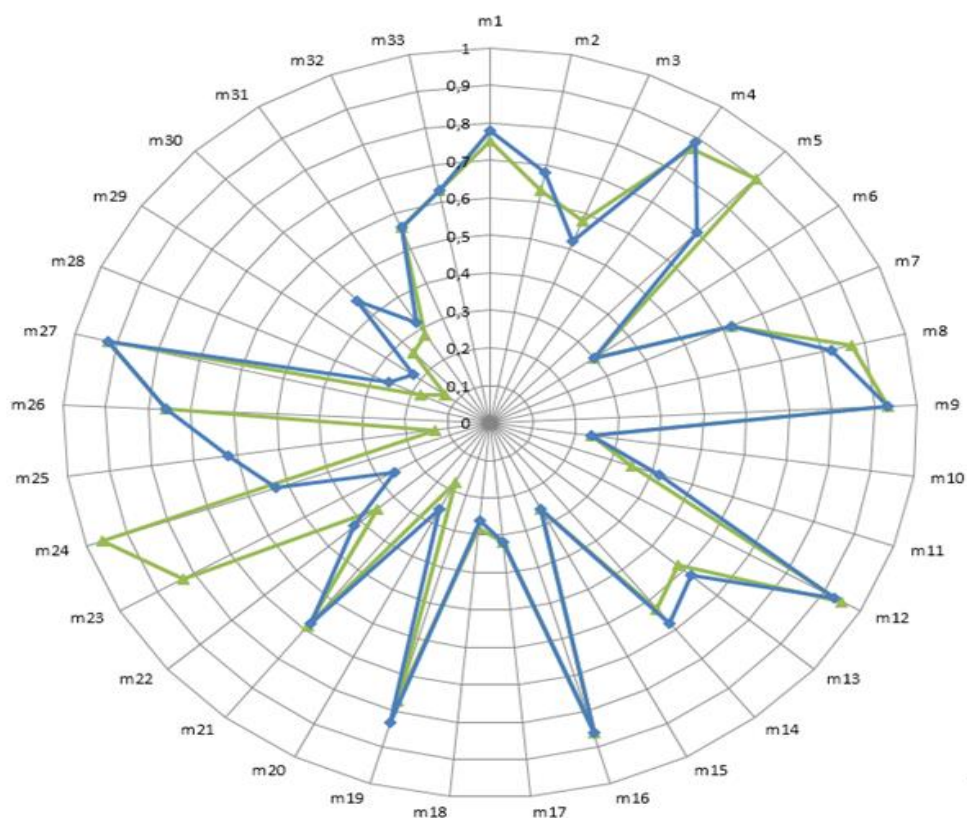


Рис. 2. Изменение погрешности определения ущерба от воздействия воздушных загрязнителей атмосферы при различных сочетаниях событий $m_i, i = \overline{1,33}$, состоящих из комбинаций внешних факторов $F_i, i = \overline{1,7}$ и управлений $E_i, i = \overline{1,7}$

На диаграмме потери измеряются в шкале отношений в долях от максимума. Зеленая линия показывает ожидаемую экспертами и ЛПР величину потерь при возникновении различных сочетаний событий $m_i, i = \overline{1,33}$. Эта величина получена с учетом данных, приведенной в публикациях [1-3]. Синяя линия характеризует величину потерь, определенную в процессе вычислительного эксперимента. Расстояние между этими линиями определяет величину погрешности модели при различных критических сочетаниях событий.

При использовании полученных результатов при построении моделей системной динамики [4-17] возникает необходимость оценить вероятность наступления критических сочетаний событий, влияющих на погрешность математических моделей. Для этой цели может быть применен аппарат цепей Маркова и системы линейных однородных дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена [18-20].

На рисунке 3 приведен граф, используемый для построения систем уравнений Колмогорова-Чепмена при определении вероятности возникновения достаточно часто встречающегося критического сочетания, состоящего из пяти базовых событий.

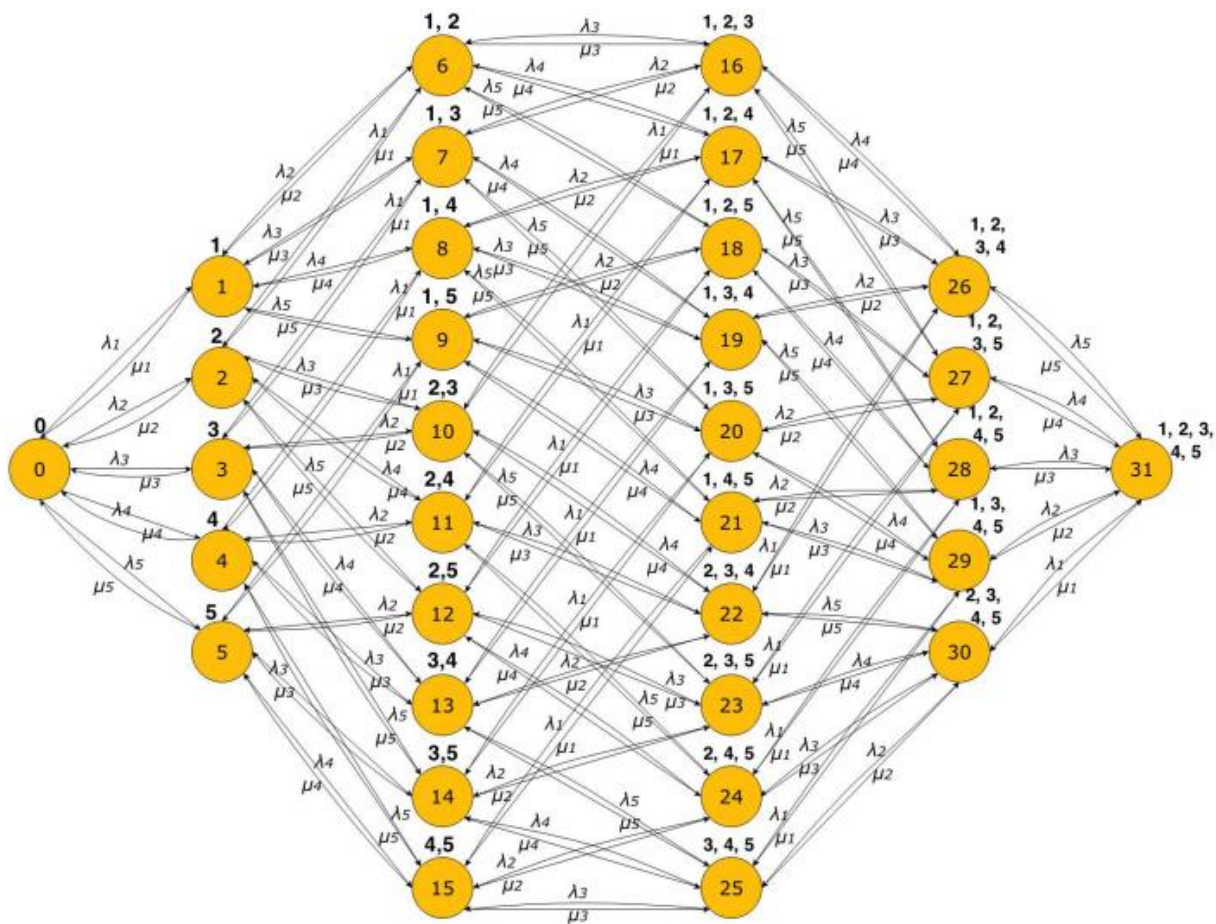


Рис. 3. Граф состояний для определения вероятности возникновения пятиэлементного критического сочетания событий: вершины – состояния; ребра – связи; λ_i, μ_i – интенсивности потоков возникновения и ликвидации событий, приводящих к их критическому сочетанию

В качестве примера ниже приведены первые пять уравнений системы Колмогорова Чепмена, используемой для определения вероятности критического сочетания событий:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)P_0(t) + \mu_1P_1(t) + \mu_2P_2(t) + \mu_3P_3(t) + \mu_4P_4(t) + \mu_5P_5(t)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1P_0(t) + \mu_2P_6(t) + \mu_3P_7(t) + \mu_4P_8(t) + \mu_5P_9(t) - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \mu_1)P_1(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2P_0(t) + \mu_1P_6(t) + \mu_3P_{10}(t) + \mu_4P_{11}(t) + \mu_5P_{12}(t) - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \mu_2)P_2(t)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_3P_0(t) + \mu_1P_7(t) + \mu_2P_{10}(t) + \mu_4P_{13}(t) + \mu_5P_{14}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \mu_3)P_3(t)$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_4P_0(t) + \mu_1P_8(t) + \mu_2P_{11}(t) + \mu_3P_{13}(t) + \mu_5P_{15}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_5 + \mu_4)P_4(t)$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_5P_0(t) + \mu_1P_9(t) + \mu_2P_{12}(t) + \mu_3P_{14}(t) + \mu_4P_{15}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_5)P_5(t)$$

3. Обсуждение результатов

Анализ результатов проведённых вычислительных экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

1. Результаты, полученные при использовании разработанной математической модели хорошо совпадают с ожиданиями экспертов и ЛППР, а также с результатами предыдущих исследований при

возникновении сочетаний событий $m_1 - m_4$, $m_6 - m_{12}$, $m_{14} - m_{19}$, m_{21} , $m_{31} - m_{33}$. При возникновении сочетаний событий m_8 , m_{13} , m_{22} погрешность определения потерь возрастает до 10 %; для сочетаний событий m_{23} , m_{24} , она не превышает 22,2%, а для событий m_5 , m_{28} , m_{30} погрешность превышает 40%.

- При использовании разработанной математической модели в системах поддержки принятия решений и управления по критерию минимума потерь от загрязнения атмосферы промышленностью и автотранспортом наиболее достоверные результаты будут получены при возникновении сочетаний событий $m_1 - m_4$, $m_6 - m_{12}$, $m_{14} - m_{19}$, m_{21} , $m_{31} - m_{33}$, наименее достоверные для сочетаний m_{23} , m_{24} , m_{25} , что для ряда приложений может потребовать дополнительную корректировку математического обеспечения.
- Корректировка модели должна происходить через введение дополнительного числового коэффициента, изменение вспомогательных функций модели и/или за счет изменения учитываемых причинно-следственных связей, существующих между переменными модели. Процедура коррекции таких моделей разработана в [1,2].

4. Заключение

Разработанная математическая модель позволяет определить изменение погрешности расчетов при решении задачи минимизации ущерба от воздействия воздушных загрязнителей на население, сельское хозяйство и окружающую среду. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании систем экологического мониторинга муниципального уровня.

Литература

- Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю. Модели и алгоритмы минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий // Управление большими системами: сборник трудов. 2015. № 57. С. 158-190.
- Кушникова Е.В. Модели и алгоритмы управления технологическим оборудованием для уменьшения атмосферных выбросов предприятия // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Саратов. гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю.А.. Саратов, 2016
- Кушникова Е.В. Модели и методы прогнозирования аварийных ситуаций, возникающих при выбросе загрязнителей промышленных предприятий // Материалы Всероссийской научной конференции с Международным участием «Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении». - Саратов: ООО Издательский Центр «Наука», 2013. С. 81 – 85.
- Форрестер Д. Мировая динамика: пер. с англ. / Д. Форрестер. – М.: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 379 с.
- Бродский Ю.И. Распределенное имитационное моделирование сложных систем. Москва, 2010.
- Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Предотвращение критических сочетаний событий при сварке роботизированными технологическими комплексами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. N 4. – С. 60–71.
- Щербаков М.А., Кушников В.А. Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т 2, N 1(55). – С. 196–200.
- Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах // Мехатроника автоматизация, управление. 2017. Т 18. N 5. – С. 328–332.
- Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Богомолов А.С., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю., Хамутова М.В. Информационно-управляющая система для поддержки принятия решений по ликвидации последствий наводнений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. N 11(149). – С. 39–45.
- Burkov V.N., Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. The mechanisms of smart management for industrial enterprises // Applied Mathematics and Control Sciences. 2020. № 1. С. 59-73.
- Буркова И.В., Дранко О.И., Крюков С.В., Струков А.Ю. Дихотомическое представление при комплексной оценке предприятий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 133-136.
- Khamutova M.V., Kushnikov V.A., Dranko O.I. A mathematical model for choosing an action plan for the prevention and elimination of flood effects // IFAC-PapersOnLine. 2022. Т. 55. № 3. С. 113-118.
- Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Дранко О.И., Богомолов А.С., Селютин А.Д. Модели и методы проверки достижимости целей и выполнимости планов в крупномасштабных системах на примере целей и планов ликвидации последствий наводнения // Автоматика и телемеханика. 2023. № 12. С. 49-63.

14. *Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Кушников В.А., Яндыбаева Н.В., Иващенко В.А.* Методы прогнозной оценки социально-экономических показателей национальной безопасности // Проблемы управления. 2015. № 5. С. 37-44.
15. *Кушников В.А., Яндыбаева Н.В.* Модель Форрестера в управлении качеством образовательного процесса вуза // Прикладная информатика. 2011. № 3 (33). С. 65-73.
16. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Цвиркун А.Д.* Управление в человеко-машинных системах с автоматизированной процедурой коррекции целей // Автоматика и телемеханика. 1998. № 7. С. 168-175.
17. *Кушников О.В., Гусятников В.Н., Кушников В.А.* Задачи управления хранилищем данных промышленного предприятия по критерию эффективности функционирования // Естественные и технические науки. №4. 2024. С.171-173.
18. *Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Твердохлебов В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Анализ критических ситуаций, вызванных неблагоприятным стечением обстоятельств // Контроль. Диагностика. 2014. № 7. С. 12-16.
19. *Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Кушников В.А., Яндыбаева Н.В., Иващенко В.А.* Методы прогнозной оценки социально-экономических показателей национальной безопасности // Проблемы управления. 2015. № 5. С. 37-44.
20. *Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г., Кушников В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Шоломов К.И.* Управление авиационно-транспортными системами на основе причинно-следственных деревьев событий // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2015. № 6. С. 13-17.