**Марина
Аркадьевна
Журавская**

Marina A. Zhuravskaya

**Анна
Ананьевна
Лемперт**

Anna A. Lempert

**Александр
Михайлович
Маслов**

Aleksandr M. Maslov

**Людмила
Вячеславовна
Гашкова**

Lyudmila V. Gashkova

Функционирование транспортно-логистических систем с учетом оценки экологических последствий

Operation of transport and logistics systems with account to environmental impact assessment

Аннотация

В статье рассматриваются проблемы проектирования и планирования работы современных транспортно-логистических систем с позиций «зеленой» логистики. Разработана классификационная схема экологических факторов, которые появляются в результате деятельности транспортного комплекса. Показано, что основой оценки экологической эффективности транспорта является определение его роли в строительстве стабильного общества. Поэтому для того, чтобы определить экологические усилия, необходимо точно измерить и оценить воздействие деятельности транспортной отрасли на окружающую среду и результаты природоохранных мероприятий. В этой связи авторами разработан подход к качественной и количественной оценкам экоэффективности транспорта. Предложен метод прогнозирования, основанный на преобразовании Гильберта — Хуанга. Разработана технология количественной оценки экологических последствий размещения логистических объектов на основе авторского метода конструирования функции среды, оптико-геометрического подхода и нестационарной модели Гаусса, позволяющая оценивать концентрацию загрязняющих веществ в различные моменты времени.

Ключевые слова: региональная логистическая система, расположение логистических объектов, транспортная сеть, экономико-математическое моделирование, оценка экологических последствий.

DOI: 10.20291/2311-164X-2015-4-31-37

Summary

The article deals with the issues of designing and planning of modern transport and logistics systems from the standpoint of “green” logistics. A scheme to categorize environmental factors generated by transport sector activities has been developed. It is shown that the basis for assessment of environmental efficiency of transport is the definition of its role in building a sustainable society. Therefore, in order to determine the environmental efforts, it is necessary to accurately measure and evaluate the impact of activities of the transport sector on the environment and results of environmental activities. In this regard, the authors have developed an approach to qualitative and quantitative assessment of environmental performance of transport. A forecasting method based on Hilbert-Huang transform is proposed. A technology for quantifying the environmental impact of logistics facilities has been developed using the author's method of constructing an environment function, optical-geometric approach and non-stationary Gaussian model that allows to assess the concentration of pollutants at different times.

Keywords: regional logistics system, location of logistics facilities, transportation network, economic and mathematical modeling, environmental impact assessment.

DOI: 10.20291/2311-164X-2015-4-31-37

Авторы Authors

Марина Аркадьевна Журавская, канд. техн. наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС); e-mail: MZhuravskaya@usurt.ru | **Анна Ананьевна Лемперт**, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией Института динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН), Иркутск | **Александр Михайлович Маслов**, канд. техн. наук, научный сотрудник Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург | **Гашкова Людмила Вячеславовна**, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

Marina Arkadievna Zhuravskaya, PhD in Engineering, Associate Professor, “World Economy and Logistics” Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg; e-mail: MZhuravskaya@usurt.ru | **Anna Ananievna Lempert**, PhD in Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory, SB RAS (ISDCT SB RAS), Irkutsk | **Aleksandr Mikhaylovich Maslov**, PhD in Engineering, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg | **Lyudmila Vyacheslavovna Gashkova**, Associate Professor, World Economy and Logistics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Введение

Роль транспортно-логистических систем в жизни современного общества огромна. Часто их сравнивают с кровеносной системой человека. И действительно, транспорт обеспечивает мобильность населения и географическую доступность грузов и пассажиров.

Однако наряду со всеми преимуществами современных видов транспорта он является одним из самых главных факторов негативного влияния на окружающую среду. Наиболее злободневные проблемы сегодня: загрязнение воздуха, воды, почвы, шумовые и вибрационные воздействия, накопление пыли и мусора. Эти явления могут быть опасными для человеческого здоровья и жизни и могут влиять на условия жизни будущих поколений. Согласно современным исследованиям, транспортным системам принадлежит 25 % выбросов углекислого газа [1] и 23 % общего потребления энергии [2], что предполагает большие финансовые затраты, уязвимость в связи с повышением цен на топливо, нанесение вреда окружающей среде из-за использования невозобновляемых ископаемых видов топлива (95 %).

По данным Национальной академии наук США, автомобили в крупных городах являются причиной 20–25 % заболеваний, ведь более 50 % загрязнений городской атмосферы происходит от транспорта [3]. По мнению авторов работы [4], на долю автотранспорта приходится более 97 % суммарного выделения пыли в атмосферу карьера и т. д.

Рис. 1. Негативное влияние автотранспорта на почву, воздух и воду

Как видно из рис. 1, вред окружающей среде наносится не только транспортными средствами, но и транспортными сооружениями, а строительство, в частности дорог, препятствует естественной миграции и перемещению биологических видов, населяющих природную среду. Поэтому в настоящее время строительство любого объекта транспортно-логистической инфраструктуры невозможно без учета его экологического воздействия на окружающую среду.

Классификация воздействий и подходы к экологической оценке

Поскольку целью данной работы является разработка оценки экологических последствий функционирования транспортных систем, рассмотрим ее более подробно. Анализ научной литературы [1, 2, 5–9] позволил авторам статьи разработать классификационную схему экологических факторов, которые появляются в результате деятельности транспортного комплекса. Прежде всего, все факторы подразделяются на две большие группы: 1) факторы, негативно влияющие на окружающую среду при строительстве транспортной инфраструктуры, и 2) негативные факторы, появляющиеся непосредственно в процессе эксплуатации транспортно-логистических систем. В свою очередь, каждая из этих групп подразделяется еще на три подгруппы (рис. 2): отходы, энергопотребление, физическое воздействие на биосферу.

Рис. 2. Классификация экологических последствий функционирования транспортных систем

Причем эти подгруппы факторов присутствуют как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации транспортных систем. Тогда комплексную оценку, которая интегрально будет учитывать экологические последствия от работы транспорта, рассчитаем как среднегеометрическую величину:

$$\varepsilon = \sqrt[3]{K_W K_{EC} K_{PhIm}},$$

где K_W — коэффициент, учитывающий работу вида транспорта с отходами; K_{EC} — коэффициент, учитывающий энергопотребление вида транспорта; K_{PhIm} — коэффициент, учитывающий физическое воздействие вида транспорта на биосферу (выбросы в атмосферу NO_x , SO_x , разливы нефти, сбросы в почву и водоемы, шум и др.).

Все перечисленные факторы обуславливают актуальность данного исследования. Назрела необходимость комплексной оценки экологических последствий от функционирования транспортно-логистических систем. Успешно решить такую задачу возможно, лишь опираясь на концепцию устойчивого развития, которая учитывает не только экономический и социальный факторы в системе показателей природопользователей, но также и экологический фактор. Концепция устойчивого развития и охрана окружающей среды принадлежат к тем темам, которые в наибольшей степени волнуют сегодня общество, экономику и, естественно, транспортную отрасль. Современные транспортные системы не являются устойчивыми. Зачастую они усугубляют экологические проблемы, негативно влияя на здоровье людей и природу, именно поэтому глобальные изменения окружающей среды становятся для транспорта серьезной проверкой. А ориентация на традиционные экономические показатели в ближайшей перспективе может иметь самые негативные последствия. Требуется экологическая корректировка показателей прогресса транспортной отрасли на основе концепции устойчивого развития.

Канадский ученый Т. Литман определяет задачи устойчивого развития современных транспортных систем, обобщив результаты более 150 исследований [10], а в [11] Дж. Эллингтон полагает, что интеграция интенсивно взаимосвязанных экономических, экологических и социальных аспектов устойчивости дает «тройной практический результат». Таким образом, фундаментом устойчивой транспортной политики является универсальная интеграция. Степень же поддержания требуемой устойчивости транспортной отрасли зависит не только от экономической и социальной оценки, но и от экологической оценки.

Анализ транспортных систем европейских стран показал, что в Европе накоплен положительный опыт по оценке воздействия транспортной отрасли на окружающую среду. Так, авторами был изучен опыт стран, входящих в Евросоюз, где разработан алгоритм оценки воздействия на окружающую среду, состоящий из 7 этапов [12]. На первом этапе готовится документация и затем передается экспертам для оценки. Далее, по требованию экспертов, предоставляется дополнительная документация, и выполняется непосредственно оценка воздействия на окружающую среду. На пятом этапе проводятся общественные слушания, после которых утверждается окончательный эксперт, и на заключительном этапе готовится финальный отчет.

Неэффективное строительство транспортных сетей приводит к увеличению интенсивности движения, а значит, к транспортным заторам. Перегруженность улично-дорожной сети способствует снижению скорости и регулярности доставки грузов и пассажиров, росту себестоимости перевозки, увеличению транспортной усталости

участников движения и потере времени, приводит к снижению безопасности движения и качества жизни людей в целом. Вопросам грамотного размещения транспортно-логистических объектов уделяли серьезное внимание как зарубежные, так и российские ученые. Однако 58 % опрошенных руководителей муниципалитетов считают важным получать информацию о лучших международных и российских практиках в области устойчивого развития территорий, в том числе транспортных. Наиболее серьезным препятствием для реализации мероприятий в сфере устойчивого развития регионов они считают отсутствие релевантного опыта в области реализации «устойчивых» инициатив и недостаток соответствующей информации.

Вышесказанное подтверждает необходимость перехода на адекватный современным реалиям учет экоэффективности деятельности транспорта и его постепенного перевода на принципы «зеленой» логистики.

Экоэффективность

Международными организациями и отдельными странами предлагаются критерии и индикаторы устойчивого развития, содержащие нередко весьма сложную систему показателей. Разработка индикаторов устойчивого развития часто является комплексной и дорогостоящей процедурой, требующей большого количества информации, получить которую сложно или вообще невозможно.

С нашей точки зрения, классический расчет экоэффективности хорошо представлен в статье [13]. В другой статье в качестве показателей при оценке экономической эффективности экологических проектов с учетом временных характеристик предложен алгоритм расчета на основе чистого дисконтированного дохода, индекса доходности инвестиций [14].

Экологическая эффективность производства в работе [15] оценивается по шести индикаторам антропогенного воздействия на среду. Для получения интегрального значения $\mathcal{E}_3$ использована процедура нормирования каждого вида воздействий на выручку или персонал. Далее для всей совокупности предприятий определены средние значения каждого из нормированных воздействий, которые приняты за норму, равную 100 %. Соответственно, каждое из шести типов воздействия любого предприятия можно выразить в процентах к уровню, принятому за 100, просуммировать шесть оценок и разделить на шесть. Полученное соотношение экологических воздействий и экономического потенциала ($\mathcal{E}_3/\mathcal{E}_2$), по сути, является обратной величиной к экологической эффективности, которая вычисляется путем соответствующего преобразования.

Говоря об экоэффективности, необходимо помнить, что она, согласно теории устойчивого развития, является

лишь частью эффективности на транспорте (табл. 1) и служит индикатором его деятельности. Понятие эффективности логистических систем подробно рассмотрено в статье [16], где отмечено, что для определения эффективности существует самая общая и универсальная формула расчета: эффективность E равна отношению полезных конечных результатов R к затраченным ресурсам (затратам — Z):

$$E = \frac{R}{Z}.$$

Согласимся с приведенной формулой эффективности и с учетом теории устойчивого развития обобщим ее:

$$E = f(C, T, \varepsilon),$$

где $C = (c_i)$ — вектор экономических факторов; $T = (t_i)$ — вектор социальных факторов; $\varepsilon = (e_i)$ — вектор экологических факторов.

Таблица 1

Расчет эффективности на транспорте на основе теории устойчивого развития

Эффективность на транспорте, E		
Экономическая	Социальная	Экологическая
Ценовая доступность транспорта	Мобильность	Экологическая безопасность
c_i — стоимостный фактор	t_i — временной фактор	e_i — экофактор

Построение экологической матрицы — это отдельная нетривиальная задача. Такой метод оценки экоэффективности процессов на транспорте на основе принципов «зеленой» логистики базируется на выявлении последовательности отдельных возможных показателей с оценкой вероятности каждого промежуточного показателя, с вычислением суммы вероятности конечного события.

Так, основой оценки экологической эффективности транспорта является определение его роли в строительстве стабильного общества. Для того, чтобы определить экологические усилия, необходимо точно измерить и оценить воздействие деятельности транспортной отрасли на окружающую среду и результаты природоохранных мероприятий.

Необходимо отметить, что в количественном отношении негативное влияние транспортной отрасли, в частности транспортных узлов и сетей, на окружающую среду прямо пропорционально проходящим через них материальным потокам. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка технологии их прогнозирования.

Прогнозирование материальных потоков с использованием преобразования Гильберта — Хуанга

Говоря о потоках в транспортных и логистических системах [17], прежде всего подразумевают потоки единиц транспортных средств и партий перевозимых грузов. Природа зарождения и поведения этих потоков носит смешанный детерминированно-стохастический характер. При этом нельзя полностью пренебречь ни первыми, ни вторыми факторами. Кроме того, характер исследуемых процессов не всегда позволяет построить модель прогнозирования с помощью уже известных законов распределения случайных величин, а работа с частными законами распределения связана с многими сложностями и зачастую не позволяет построить универсальную модель. В связи с указанными факторами для построения прогнозных моделей логистических потоков авторами предлагается использовать анализ временных рядов на основе преобразования Гильберта — Хуанга (НТТ) [18].

По мнению Н. Хуанга, НТТ позволяет преобразовать любую функцию или временной ряд (в том числе нестационарный) вне зависимости от наличия априорной информации и гипотез о них. При этом исходная информация разлагается на составляющие: монотонную функцию или константу (в нашем случае характеризуют детерминированные составляющие потоковых процессов), шум — гармонические функции (характеризуют вероятностные составляющие). Данный метод дает хорошие результаты для решения многих практических задач (например, он успешно применяется в области электроэнергетики [19]), но отсутствие строгой теоретической базы требует эвристического подхода к решению каждой отдельной задачи и дополнительных исследований, позволяющих подтвердить правомерность его применения.

Преобразование Гильберта — Хуанга включает в себя два основных этапа: эмпирическую модовую декомпозицию (Empirical Mode Decomposition — EMD) и Гильбертов спектральный анализ (HSA) [20].

EMD — метод разложения сигналов на функции, которые получили название «эмпирических мод». Эмпирическая мода, или внутреннее колебание (intrinsic mode functions, IMF), представляет собой колебательный режим, у которого амплитуды и частоты могут быть переменными, как функции времени. IMF обладает следующими свойствами:

1. Количество экстремумов функции (максимумов и минимумов) и количество пересечений нуля не должны отличаться более чем на единицу.

2. В любой точке функции среднее значение огибающих, определенных локальными максимумами и локальными минимумами, должно быть нулевым.

Опишем метод более подробно. Пусть имеется произвольный временной ряд $x(t)$. Для модовой декомпозиции исходного временного ряда последовательно вычисляются функции эмпирических мод — $b_j(t)$ и остатков — $r_j(t)$:

$$r_j(t) = r_{j-1}(t) - b_j(t),$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, n$ при $r_0 = x(t)$.

Результатом разложения будет представление временного ряда в виде суммы модовых функций и конечного остатка:

$$x(t) = b_j(t) + r_n(t),$$

где n — количество эмпирических мод, которое устанавливается в ходе вычислений.

Ниже описана методика, по которой любую функцию и любой произвольный временной ряд можно разделить на семейство функций IMF.

Находим в сигнале $x(t)$ все локальные экстремумы процесса. Представляем верхнюю и нижнюю огибающие процесса в виде сплайна. Так как для построения сплайнов обычно используют полиномы нечетных степеней, а исследуемые в логистических системах данные — это, как правило, дискретные величины, то по локальным экстремумам допустимо строить интерполяционный сплайн первого порядка (этим задачи логистики отличаются от задач электротехники и электроэнергетики, в которых оперируют кубическими сплайнами или рядами Фурье). Соответственно, по максимумам U и минимумам L , огибающим функцию $x(t)$, определяем функцию средних значений $m_1(t)$. Разность между сигналом $x(t)$ и функцией $m_1(t)$ принимаем за первое приближение к первой функции IMF, компоненту операции отсеивания (Sifting) — функцию $h_1(t)$:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t).$$

Повторяем операции 1 и 2, принимая вместо $x(t)$ функцию $h_1(t)$, и находим второе приближение к функции IMF — компоненту отсеивания $h_2(t)$. И так далее — при всех k :

$$h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t).$$

В качестве критерия останова вычислений используем нормализованную квадратичную разность между двумя последовательными операциями отсеивания с остатком по значению 0,001. Последнее значение $h_k(t)$ итераций принимается за наиболее высокочастотную функцию $b_1(t) = h_k(t)$ семейства IMFs, которая непосредственно входит в состав исходного сигнала $x(t)$. Это позволяет вычесть $C_1(t)$ из состава сигнала и оставить в нем более низкочастотные составляющие:

$$r_1(t) = x(t) - b_1(t).$$

Функция $r_1(t)$ обрабатывается как новые данные по аналогичной методике отсеивания с нахождением второй функции семейства IMF — $b_2(t)$, после чего процесс продолжается:

$$r_2(t) = r_1(t) - b_2(t).$$

В конечном итоге достигается декомпозиция данных:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n b_k(t) + r_n(t).$$

Процесс может быть остановлен по следующим критериям:

1. Компонент $b_n(t)$ или остаток $r_n(t)$ во всем интервале задания сигнала становятся несущественными по своим значениям или мощности по сравнению с сигналом.

2. Остаток $r_n(t)$ становится монотонной функцией, из которой больше не может быть извлечено функций IMFs.

Поскольку, как ранее уже отмечалось, при описании материальных потоков в логистике чаще используются дискретные величины, то для характеристики детерминированной составляющей исследуемого процесса удобно использовать полученный на основании остатка тренд, а при отсутствии такового — среднее значение. В качестве иллюстрирующего примера рассмотрим временной ряд прибытия вагонов на грузовую станцию общего пользования (с соответствующей нормировкой), который рассматривался ранее в работах [21, 22].

Рис. 3. Функции IMF временного ряда и среднее значение на основании остатка:
— c_1 ; — c_2 ; — c_3 ; — c_4 ; — среднее

Очевидно (рис. 3), что расчеты остановлены на четвертой итерации. Функция $r_n(t) = r_4(t)$ не является монотонной, однако ее влияние можно считать несущественным.

Гильбертов спектральный анализ (HSA) базируется на построении Гильбертова спектра (Hilbert Spectrum, HS):

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{k=1}^n a_k(t) \exp \left(i \int_0^t \omega_i(\tau) d\tau \right),$$

где Re — действительная часть комплексного числа, $a_k(t)$, $\omega_k(t)$ — амплитуда и мгновенная частота соответствующей компоненты. Отметим, что они являются функциями от времени. Комбинация EMD и HS была названа Н. Хуангом преобразованием Гильберта — Хуанга (ННТ).

Далее на основе методов искусственного интеллекта с использованием полученного спектрального разложения формируется компьютерная модель, которая обучается прогнозированию на заданный интервал времени. Подробное описание данной модели — предмет отдельного исследования.

Изложенный выше подход позволяет с высокой точностью прогнозировать материальные потоки в транспортно-логистических системах.

Оценка распространения загрязнений

На основе подхода, представленного в [23–26], авторы предлагают следующий способ количественной оценки загрязняющего влияния элементов транспортной сети на окружающую среду.

Пусть в рассматриваемой области имеются источники загрязнений A_i , уровни выбросов которых известны и прямо пропорциональны мощности проходящих через них материальных потоков. Также известна функция $p(x, y)$, характеризующая скорость распространения загрязнений в зависимости от географических факторов (например, рельефа местности, розы ветров, скорости рассеивания и т. д.).

Тогда, следуя [23], для каждой точки M области можно определить минимальное время достижения загрязняющих выбросов из каждого источника.

$$T_{MA_i} = \min_{\Gamma} \int_{\Gamma} \frac{d\Gamma}{p(x, y)},$$

где $\Gamma \in G(A_i, M)$ — множество всех непрерывных, соединяющих точки A_i и M .

Далее, зная величину T_{MA_i} , для оценки концентрации можно воспользоваться нестационарной Гауссовой моделью распространения примесей без учета отражения от поверхности Земли:

$$C_i(x, y, t) = \frac{Q_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y} e^{-\frac{(x-x_i-u_x t/T_{MA_i})^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_i-u_y t/T_{MA_i})^2}{2\sigma_y^2}},$$

где $C_i(x, y, t)$ — концентрация загрязняющего вещества в точке с координатами в момент времени t ; Q_i — мощность непрерывного точечного источника загрязнения; $u_x = u_x(x, y)$, $u_y = u_y(x, y)$ — компоненты вектора скорости ветра; t — время; σ_x , σ_y — горизонтальные дисперсии, не зависящие от номера источника; x_i , y_i — координаты точечного источника загрязнения.

В этом случае суммарная концентрация загрязняющих веществ определяется как

$$C(x, y, t) = \sum_i C_i(x, y, t).$$

На рис. 4 представлен пример распределения загрязняющих веществ в местности с преобладающим северо-восточным ветром от точечного источника с координатами (0, 0). Концентрация уменьшается от темного к светлому.

Рис. 4. Распределение концентрации загрязняющих веществ

Заключение

В настоящей статье на основе комплексного анализа теории и практики функционирования современных транспортно-логистических систем показана необходимость учета при их проектировании и эксплуатации принципов «зеленой» логистики.

Анализ научной литературы позволил авторам статьи разработать классификационную схему экологических факторов, которые появляются в результате деятельности транспортного комплекса, и предложить подход к качественной и количественной оценкам экоэффективности транспорта. В частности, отмечено, что негативное влияние транспортной отрасли на окружающую среду прямо пропорционально проходящим материальным потокам. В этой связи особую актуальность приобретает разработка технологии прогнозирования последних. Предложен метод прогнозирования материальных потоков по временным рядам, основанный на преобразовании Гильберта — Хуанга, поскольку данный подход позволяет учитывать как детерминированные, так и стохастические факторы, одновременное влияние которых характерно для изучаемых систем.

Разработана технология количественной оценки экологических последствий размещения логистических

объектов на основе авторского метода конструирования функции среды, оптико-геометрического подхода и нестационарной модели Гаусса, позволяющая оценивать концентрацию загрязняющих веществ в различные моменты времени. В дальнейшем предполагается

распространить предложенный подход на случай протяженных источников загрязнений. **ИТ**

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты № 14-07-00222, 13-06-00653.

Список литературы

1. Baumann H., Boons F., Bragd A. Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives // Journal of Cleaner Production. — 2002. — V. 10. — P. 409–425.
2. Abukhader S. M., Jönson G. Logistics and the environment: is it an established subject? // International Journal of Logistics: Research and Applications. — 2004. — V. 7. — P. 137–149.
3. Григорьев В. А., Огородников И. А. Экологическое домостроение: проблемы градостроительства в мире, России, Сибири // Аналитический обзор. Сер. «Экология». — Вып. 63. — Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2001. — 152 с.
4. Кошкарлов В. Е., Неволин Д. Г., Кошкарлов В. Е. Разработка технологии обеспыливания карьерных автодорог на основе битумно-полимерных материалов // Инновационный транспорт. — 2015. — № 2 (16). — С. 65–71. — ISSN 2311–164X.
5. Zhuravskaya M., Tarasyan V. Forming of the regional core transport network taking into account the allocation of alternative energy sources based on artificial intelligence methods // Transport problems. — Vol. 9, I. 4. — 2014. — P. 121–130.
6. Environmental performance as an operations objective // International Journal of Operations & Production Management. — 2001. — V. 21. — P. 1553–1572.
7. Angheluta A., Costea C. Sustainable go-green logistics solutions for Istanbul metropolis // Transport problems. — 2011. — V. 6, Iss. 2. — P. 59–67.
8. Воронков А. Н., Точков А. Г., Вакуленко Р. Я. Направления применения «зеленых» технологий в логистике // Вестник СамГУПС. — 2012. — № 2. — С. 62–69.
9. Кизим А., Кабертай Д. Современные тренды «зеленой» логистики в условиях глобализации // Логистика. — 2013. — № 1. — С. 46–49.
10. Журавская М. А. «Зеленая» логистика — стратегия успеха в развитии современного транспорта // Вестник УрГУПС. — 2015. — № 1 (25). — С. 38–48.
11. Litman T. Well Measured: Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute. 2015 [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.vtpi.org/wellmeas.pdf> (дата обращения: 29.11.2015).
12. Elkington J. Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. Capstone. Oxford, 1997. — 402 p.
13. Directive 2011/92/EU of the European Parliament and of the Council on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment // Official Journal of the European Union L 26. 28 January 2012. — P. 1–21.
14. Koliński A. The role of production efficiency regarding ecological aspects // Eco Production and Logistics / Golinska P. (ed.). — 2013. — Springer. — P. 93–102.
15. Плотникова Л. В. Особенности расчета экологического ущерба на высокоурбанизированных территориях // Экономика природопользования. — 2008. — № 4. — С. 61–78.
16. Мартынов А. С. Экологическая эффективность предприятий России и Казахстана: сравнительный анализ // Евразийская экономическая интеграция. — 2010. — № 3 (8). — С. 33–56.
17. Мифтяхетдинов И. Эффективность функционирования международных логистических систем // Ресурсы. Информация. Снабжение. Конкуренция. — 2010. — № 1. — С. 38–42.
18. Казаков А. Л., Петров М. Б., Маслов А. М. Особенности формирования грузо- и вагонопотоков в региональной транспортной системе // Экономика региона. — 2011. — № 3. — С. 184–193.
19. Huang N. E., Shen Z., Long S. R. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. SOC. — London, Ser. A, 1998. — No. 454. — P. 903–995.
20. Сидоров Д. Н. Методы анализа интегральных динамических моделей: теория и приложения. — Иркутск: Издательство ИГУ, 2013. — 293 с.
21. The Hilbert-Huang transform and its applications / Norden E. Huang, Samuel S. P. Shen. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck. Link, Singapore 596224.
22. Казаков А. Л., Маслов А. М. Моделирование входящего транспортного потока на грузовую станцию с учетом его суточной неравномерности // Транспорт Урала. — 2008. — № 2. — С. 65–71. — ISSN 1815–9400.
23. Казаков А. Л., Маслов А. М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2009. — № 3. — С. 27–32.
24. Казаков А. Л., Лемперт А. А. Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 7. — С. 50–57.
25. Лемперт А. А., Казаков А. Л., Бухаров Д. С. Математическая модель и программная система для решения задачи размещения логистических объектов // Управление большими системами: сборник трудов. — 2013. — № 41. — С. 270–284.
26. Журавская М. А., Лемперт А. А., Смородинцева Е. Е. О математическом инструментарии для поддержки принятия решений в логистических системах различных уровней // Инновационный транспорт. — Екатеринбург, 2012. — № 5 (6). — С. 20–23. — ISSN 2311–164X.