



Оригинальная статья

УДК 632.151+630\*587+004

DOI 10.17073/0368-0797-2021-11-839-845



## ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НА ЛЕСНЫЕ МАССИВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ

В. П. Мешалкин<sup>1,2</sup>, О. Б. Бутусов<sup>1</sup>, В. Дж. Дови<sup>3,4</sup>,  
А. Ю. Белозерский<sup>1</sup>, В. В. Челноков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (Россия, 125047, Москва, Мнусская пл., 9)

<sup>2</sup> Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 31)

<sup>3</sup> Межвузовский исследовательский центр High Tech Recycling (HTR) (Италия, 00185, Рим, пл. Альдо Моро, 5)

<sup>4</sup> Генуэзский университет (UniGE) (Италия, 16126, Лигурия, Генуя, ул. Балби, 5)

**Аннотация.** Рассмотрено действующее предприятие черной металлургии, которое при выплавке стали использует три различных технологических режима, каждый из которых характеризуется индивидуальным составом ингредиентов выбросов химических загрязнений в атмосферу, влияющих на состояние лесных массивов вокруг предприятия. На основе расшифровки спутниковых пиксельных фотоизображений лесных массивов определен технологический режим с наименьшим воздействием на лесные массивы. Данный режим соответствует условию минимальной площади экологических зон вокруг предприятия черной металлургии. Предложена оценка воздействия химических загрязнений предприятий черной металлургии на лесные массивы в виде площадей экологических зон состояния лесной растительности и объемов биомассы на различных участках лесного массива. Мозаика экологических зон лесных массивов определяется по спутниковым пиксельным фотоизображениям лесных массивов с использованием оригинального алгоритма управляемого кластерного анализа.

**Ключевые слова:** предприятие черной металлургии, контрольные пиксели, лесные массивы, кластеры, экологические зоны, химические загрязнения, биомасса

**Для цитирования:** Мешалкин В.П., Бутусов О.Б., Дови В.Дж., Белозерский А.Ю., Челноков В.В. Оценка воздействия химических загрязнений предприятий черной металлургии на лесные массивы с использованием спутниковых фотоизображений // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 11. С. 839–845. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-839-845>

Original article

## ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CHEMICAL POLLUTION OF FERROUS METALLURGY ENTERPRISES ON FORESTS USING SATELLITE PHOTOGRAPHS

V. P. Meshalkin<sup>1,2</sup>, O. B. Butusov<sup>1</sup>, V. G. Dovi<sup>3,4</sup>,  
A. Yu. Belozerskii<sup>1</sup>, V. V. Chelnokov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9 Miusskaya Sqr., Moscow 125047, Russian Federation)

<sup>2</sup> Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, RAS (31 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

<sup>3</sup> Interuniversity Research Centre High Tech Recycling (HTR) (5 Piazzale Aldo Moro, Roma 00185, Italia)

<sup>4</sup> University of Genoa (5 Via Balbi, Genova, Liguria 16126, Italia)

**Abstract.** The considered operating ferrous metallurgy enterprise uses three different technological modes of steel smelting, each of which is characterized by an individual composition of the ingredients of chemical pollutant emissions into the atmosphere affecting the state of the forest areas around this enterprise. Based on the decoding of satellite pixel photographs of forest areas, the technological mode with the least impact on forest areas was determined. It corresponds to the condition of the minimum area of ecological zones around the ferrous metallurgy enterprise. The authors propose an assessment of the impact of chemical pollution of ferrous metallurgy enterprises on forests in the form of areas of ecological zones of the state of forest vegetation and the volume of biomass in its various parts. The mosaic of ecological zones of forest areas is determined from their satellite pixel photographs using an original algorithm of “controlled cluster analysis”. The main recommendation for ferrous metallurgy enterprises to choose one of several alternative technological modes is as follows: the choice of technological mode should be based on a comparison of sizes of the areas of ecological zones. In this case, the technological mode with the smallest dimensions of the area is selected. Assessment of the damage caused by

the chemical pollution of the plant to forest areas was determined by the area of ecological zones and the volume of biomass loss in forest areas in comparison with the background areas. The boundaries of ecological zones can be determined according to the “dose-effect” dependencies typical for the considered region.

**Keywords:** ferrous metallurgy enterprise, control pixels, forests, clusters, ecological zones, chemical pollution, biomass

**For citation:** Meshalkin V.P., Butusov O.B., Dovi V.G., Belozerskii A.Yu., Chelnokov V.V. Assessment of the impact of chemical pollution of ferrous metallurgy enterprises on forests using satellite photographs. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 11, pp. 839–845. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-839-845>

## ВВЕДЕНИЕ

Лесные массивы (ЛМ) – универсальные индикаторы состояния биосферы, поэтому управление и регулирование воздействием на них предприятий черной металлургии (ПЧМ) является важной эколого-экономической задачей, которая позволяет повысить уровень экологической безопасности.

Рассмотрим следующую эколого-технологическую задачу обеспечения экологической безопасности ПЧМ на примере ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК), которое по различным технологическим режимам производит сталь с разным количественным составом химических загрязнений, выбрасываемых в атмосферу. Требуется выбрать оптимальный технологический режим с минимальным воздействием на лесные массивы, окружающие ПЧМ. В качестве оценки уровня экологической безопасности при выборе технологического режима выбраны площади экологических зон состояния растительности и объемы биомассы различных зон лесных массивов. В работе [1] показано, что метод «доза-эффект» зависимостей позволяет осуществлять количественные оценки ущерба, нанесенных ЛМ химическими загрязнениями ПЧМ. Для определения этих показателей в работах [1 – 3] предложено использовать функции «доза-эффект» зависимостей, интегральные коэффициенты сохранности лесных массивов как универсальные комплексные показатели «эффекта», а также среднегодовые суммарные концентрации химических загрязнений как универсальные комплексные показатели «дозы».

В работе [4] воздействие химических загрязнений на лесные массивы предложено разделять на три класса:

– слабое воздействие при малых концентрациях химических загрязнений, при котором ЛМ выступают в роли эффективного очистителя атмосферы от химических загрязнений;

– средний уровень воздействия загрязнений на ЛМ, при котором происходят физиологические нарушения растительности, имеющие физиономический характер и уменьшение таких важных показателей экологического состояния растительности ЛМ, как биомасса, проективное покрытие, видовое разнообразие и пр. При этом в результате ослабления защитных функций ЛМ под воздействием химических загрязнений возможны заболевания отдельных групп деревьев и размножение насекомых вредителей;

– высокий уровень воздействия, который характеризуется заболеванием и смертностью деревьев, в результате чего происходит изреживание древостоя и обезлесивание территорий.

Перечисленные классы состояния растительности соответствуют трем экологическим зонам ЛМ: импактной, буферной и фоновой [1 – 3].

Для практической оценки площадей экологических зон ЛМ предложено использовать кластерный анализ спутниковых пиксельных фотоизображений [5 – 8]. Методы кластерного анализа широко применяются в задачах поиска скрытой информации и распознавания образов. В работах [9 – 12] методы кластерного анализа спутниковых пиксельных фотоизображений использованы в алгоритмах оценки деградации ЛМ под воздействием химических загрязнений, что имеет важное значение при разработке научно-обоснованных мероприятий по повышению экологической безопасности ПЧМ.

Для проведения процедуры кластерного анализа исходных спутниковых пиксельных фотоизображений использован оригинальный алгоритм управляемого кластерного анализа, отличающийся использованием контрольных пикселей на фотоизображениях, которые идентифицируют пиксельные кластеры состояния ЛМ и их принадлежность к конкретным экологическим зонам ЛМ.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРЕДПРИЯТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Рассмотрим задачу оценки выбора технологических режимов для ПЧМ ММК. Основными источниками атмосферного загрязнения ЛМ являются две заводские трубы большой высоты (рис. 1).

Известно, что высокие трубы предназначены для повышения эффективности рассеяния химических загрязнений до малых концентраций. На рис. 2 представлено спутниковое пиксельное фотоизображение ландшафтов в районе ММК. Как следует из рис. 2, химические загрязнения из высоких труб в зависимости от погодных условий могут загрязнять ЛМ, расположенные приблизительно на расстоянии 12 км к востоку от ММК.

Оценка технологических режимов производства стали на ПЧМ должна включать выбросы из основных источников атмосферного загрязнения ММК: агло-



Рис. 1. Заводские трубы Магнитогорского металлургического комбината

Fig. 1. Factory pipes of the Magnitogorsk Iron and Steel Works

мерационного цеха, доменного цеха, электростанций и коксохимического производства. Основными загрязняющими веществами, выбрасываемыми в атмосферу в результате производственной деятельности ММК, являются твердые вещества (пыль), диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, фенол.

В табл. 1 приведены данные о мощности выбросов химических загрязнений в атмосферу за 2019 и 2020 гг.<sup>1</sup>

Следует отметить, что в используемом оригинальном алгоритме управляемого кластерного анализа учитывался нечеткий характер мозаики пикселей спутниковых пиксельных фотоизображений, при котором возможна принадлежность пикселей нескольким экологическим зонам с разной степенью принадлежности [11 – 19].

Использованный адаптивный алгоритм управляемого кластерного анализа пиксельных фотоизображений [11, 12] ЛМ отличается применением при кластеризации специальных контрольных пикселей, принадлежность которых конкретным кластерам известна заранее, что позволяет выбрать оптимальный технологический режим производства стали на ММК.



Рис. 2. Спутниковое изображение ландшафтов в районе Магнитогорского металлургического комбината

Fig. 2. Satellite image of landscapes in the area of the Magnitogorsk Iron and Steel Works

Таблица 1

**Мощность выбросов основных загрязняющих веществ за два года**

*Table 1. Mass of emissions of the main pollutants for two years*

Загрязняющее вещество	Мощность выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, т/год	
	за 2019 г.	за 2020 г.
Твердые взвешенные частицы	22171,0	16031,2
Диоксид серы	9549,6	5645,5
Оксиды азота	13727	16335
Валовые выбросы парниковых газов	27,2·10 <sup>6</sup>	26,8·10 <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский металлургический комбинат. Устойчивое развитие, экологический менеджмент. URL: <https://mmk.ru/ru/sustainability/ecology/environmental-management/>



**РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ММК С ПОМОЩЬЮ ПЛОЩАДНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗОН**

На рис. 3 показано исходное спутниковое пиксельное фотоизображение лесного массива, расположенного на расстоянии 12 км к востоку от ММК.

На рис. 4 представлены результаты кластеризации исходного спутникового фотоизображения (см. рис. 3) с использованием контрольных пикселей для трех различных технологических режимов функционирования предприятия. Оценка расположения контрольных пикселей осуществлялась с помощью функции «доза-эффект» зависимости, представленной на рис. 5.

График функции «доза-эффект», описывающий зависимость интегрального коэффициента сохранности (ИКС) растительности ЛМ («эффекта») от среднегодового средневзвешенного химического загрязнения ЛМ («дозы»), представлен на рис. 5.

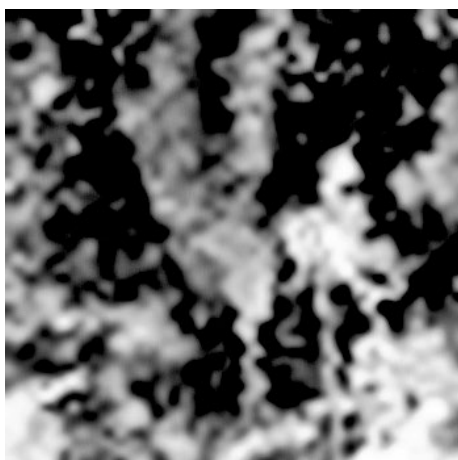


Рис. 3. Исходное спутниковое пиксельное фотоизображение лесного массива на расстоянии 12 км к востоку от ММК

Fig. 3. Initial satellite pixel photograph of a forest at a distance of 12 km to the east from the Magnitogorsk Iron and Steel Works

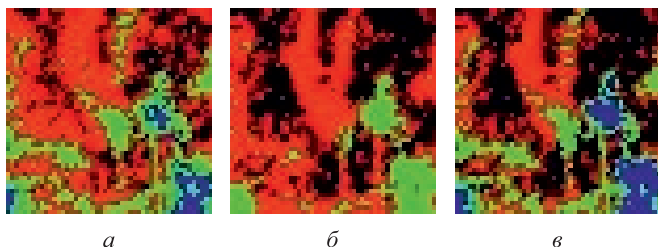


Рис. 4. Результаты кластеризации спутникового пиксельного фотоизображения с учетом контрольных пикселей для трех различных технологических режимов функционирования ММК: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3

Fig. 4. Results of clustering of satellite pixel photograph taking into account control pixels for three different technological modes of the Magnitogorsk Iron and Steel Works functioning: а – mode 1; б – mode 2; в – mode 3

График функции «доза-эффект» зависимостей позволяет выделить три экологические зоны: фоновую, буферную и импактную. Территориально импактная зона расположена ближе всего к ММК. Далее располагаются буферная, а затем фоновая зоны.

Для выделения экологических зон состояния ЛМ используются следующие граничные значения интегрального коэффициента сохранности растительности ЛМ (контрольные пиксели): для границы между буферной и импактной зонами (20 %) и для границы между буферной и фоновой зонами (50 %). Горизонтальные линии, проведенные из этих значений интегрального коэффициента сохранности до пересечения с графиком функции «доза-эффект» зависимостей, позволяют выделить интервалы дозы, соответствующие экологическим зонам.

Для определения пространственного расположения экологических зон состояния ЛМ необходимо использовать компьютерную программу, которая определяет зависимость величины «дозы» от расстояния до источника, т. е. функцию  $D(x)$ , где  $x$  – расстояние до заводской трубы ПЧМ.

В качестве наиболее простого приближения рассмотрим математическую модель экспоненциальной зависимости от расстояния до заводской трубы средневзвешенной среднегодовой концентрации химических загрязнений ПЧМ следующего вида:

$$D(x) = D_{\max} \exp\left(-\frac{x}{x_{\max}}\right);$$

$$\tilde{D} = \frac{D(x)}{D_{\max}} = \exp\left(-\frac{x}{x_{\max}}\right) = \exp(-\tilde{x}), \quad (1)$$

где  $D_{\max 1} = 1 \text{ мг/м}^3$  – масштаб загрязнения технологического режима 1;  $D_{\max 2} = 1,5 D_{\max 1} \text{ мг/м}^3$  – масштаб загряз-

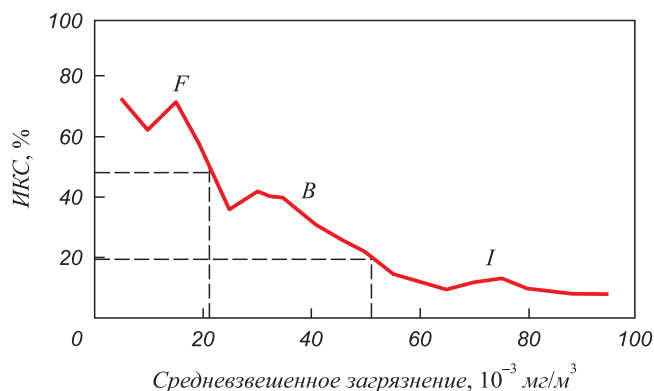


Рис. 5. График функции «доза-эффект» в виде зависимости интегрального коэффициента сохранности ЛМ («эффекта») от среднегодового средневзвешенного химического загрязнения лесных массивов («дозы»)

Fig. 5. Graph of the “dose-effect” function of dependencies in the form of dependence of the integral coefficient of forest safety (“effect”) on the average annual weighted chemical pollution (“dose”)

**Результаты расчета расстояний от заводских труб до границ экологических зон  
для различных технологических режимов**

*Table 2. Results of calculating the distances from the factory pipes to the boundaries of ecological zones  
for various technological modes*

Технологический режим	Расстояние до границ между экологическими зонами	
	граница между буферной и фоновой зоной, км	граница между буферной и импактной зоной, км
1	3,9	3,00
2	4,3	3,40
3	3,5	2,59

нения технологического режима 2;  $D_{\max 3} = \frac{D_{\max 1}}{1,5}$  мг/м<sup>3</sup> – масштаб загрязнения технологического режима 3;  $x_{\max} = 1$  км – масштаб расстояния;  $\tilde{D} = \frac{D(x)}{D_{\max}}$  – масштабированная относительная концентрация среднегодового средневзвешенного загрязнения;  $\tilde{x} = \frac{x}{x_{\max}}$  – масштабированное относительное расстояние.

Параметры  $D_{\max 1}$ ,  $D_{\max 2}$ ,  $D_{\max 3}$ , использованные при расчете в уравнении (1), описывают имитацию воздействия на ЛМ химических загрязнений трех различных технологических режимов функционирования ММК.

Преимущество экспоненциальной модели заключается в возможности простого аналитического решения обратной задачи определения функциональной зависимости расстояния до заводской трубы от величины концентрации среднегодовых химических загрязнений следующего вида:

$$\tilde{x} = \ln\left(\frac{1}{\tilde{D}}\right). \quad (2)$$

Результаты оценок расстояний от границ экологических зон до заводской трубы представлены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, наименьшие площади экологических зон ЛМ получаются для технологического режима 3. Следовательно металлургическому предприятию для работы следует рекомендовать технологический режим 3, что позволяет минимизировать эколого-экономические ущербы, нанесенные химическими загрязнениями ПЧМ лесным массивам.

### Выводы

Предприятиям черной металлургии для выбора различных технологических режимов рекомендовано использовать определение размеров площадей экологических зон состояния ЛМ.

Для определения конфигурации экологических зон предлагается применять кластерный анализ спутниковых пиксельных фотоизображений состояния ЛМ. Идентификацию экологических зон следует выполнять с использованием контрольных пикселей, определение которых осуществляется на основе анализа функции «доза-эффект» зависимости.

Оптимальный технологический режим ПЧМ рекомендовано выбирать по наименьшим размерам площадей экологических зон и максимальным значениям величины биомассы окружающих предприятие лесных массивов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### REFERENCES

1. Бутусов О.Б., Леонтьев Л.И., Мешалкин В.П. Комплексная оценка воздействия металлургического комбината на лесные массивы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 5. С. 38–44.
2. Бутусов О.Б., Леонтьев Л.И., Калинин В.Т., Мешалкин В.П. Методология построения системы интегральных индексов для оценки воздействия металлургических комбинатов на лесные массивы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 5. С. 29–35.
3. Бутусов О.Б., Леонтьев Л.И., Мешалкин В.П. Методология кластеризации и ранжирования состояния лесных массивов в районах металлургических предприятиях // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 5. С. 26–31.
1. Butusov O.B., Leont'ev L.I., Meshalkin V.P. Comprehensive assessment of metallurgical plant impact on forest areas. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 2009, no. 5, pp. 38–44. (In Russ.).
2. Butusov O.B., Leont'ev L.I., Kalinnikov V.T., Meshalkin V.P. Methodology for constructing a system of integral indices for assessing the metallurgical plants impact on forests. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 2009, no. 5, pp. 29–35. (In Russ.).
3. Butusov O.B., Leont'ev L.I., Meshalkin V.P. Methodology for clustering and ranking the state of forest areas in the regions of metallurgical enterprises. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 2009, no. 5, pp. 26–31. (In Russ.).

4. Smith W.H. *Air Pollution and Forests. Interactions between Air Contaminants and Forest Ecosystems*. New York: Springer-Verlag, 1981. 388 p.
5. Mai X., Cheng J., Wang S. Research on semi supervised K-means clustering algorithm in data mining // *Cluster Computing*. 2018. Vol. 22. P. 3513–3520. <http://doi.org/10.1007/s10586-018-2199-7>
6. Classification, Clustering, and Data Mining Applications. Proceedings of the Meeting of the Int. Federation of Classification Societies (IFCS), Illinois Institute of Technology, Chicago, 15-18 July 2004. Banks D., etc. eds. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 674 p.
7. Sajana T., Sheela Rani C.M., Narayana K.V. A survey on clustering techniques for big data mining // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9. No. 3. P. 1–12. <http://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i3/75971>
8. Abonyi J., Feil B. *Cluster Analysis for Data Mining and System Identification*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag AG, 2007. 319 p.
9. Мешалкин В.П., Бутусов О.Б., Гнаук А.Г. Основы информатизации и математического моделирования экологических систем: Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2010. 357 с.
10. Чимитдоржиев Т.Н., Ефременко В.В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // *Исследование Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 49–56.
11. Advances in Fuzzy Clustering and its Applications. Valente de Oliveira J., Pedrycz W. eds. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 457 p.
12. Miyamoto S., Ichihashi H., Honda K. Algorithms for Fuzzy Clustering. Methods in c-Means Clustering with Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 244p.
13. Borgefors G. Distance transformations in digital image // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1986. Vol. 34. No. 3. P. 344–371. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(86\)80047-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(86)80047-0)
14. Danielsson P.E. Euclidean distance mapping // *Computer Graphics and Image Processing*. 1980. Vol. 14. No. 3. P. 227–248. [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(80\)90054-4](https://doi.org/10.1016/0146-664X(80)90054-4)
15. Gao P., Li Z., Zhang H. Thermodynamics-based evaluation of various improved Shannon entropies for configurational information of gray-level images // *Entropy*. 2018. Vol. 20. No. 1. Article 19. <https://doi.org/10.3390/e20010019>
16. Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics // *Journal of Statistical Physics*. 1988. Vol. 52. No. 1–2. P. 479–487. <https://doi.org/10.1007/BF01016429>
17. Sahoo P., Wilkins C., Yeager J. Threshold selection using Rényi's entropy // *Pattern Recognition*. 1997. Vol. 30. No. 1. P. 71–84. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00065-9)
18. Sparavigna A.C. On the role of Tsallis entropy in image processing // *International Scientific Research Journal*. 2015. Vol. 1. No. 6. P. 16–24.
19. Rapaport D.C. *The Art of Molecular Dynamics Simulation*. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 564 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Валерий Павлович Мешалкин**, академик РАН, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой логистики и экономической информатики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, главный научный сотрудник, Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН  
E-mail: [vpmeshalkin@gmail.com](mailto:vpmeshalkin@gmail.com)

**Олег Борисович Бутусов**, д.ф.-м.н., профессор кафедры логистики и экономической информатики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева  
ORCID: 0000-0003-1361-2121  
E-mail: [butusov-1@mail.ru](mailto:butusov-1@mail.ru)

**Valerii P. Meshalkin**, Academician, Dr. Sci. (Chem.), Prof., Head of the Chair of Logistics and Economical Information, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Chief Researcher, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry  
E-mail: [vpmeshalkin@gmail.com](mailto:vpmeshalkin@gmail.com)

**Oleg B. Butusov**, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof. of the Chair of Logistics and Economical Information, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia  
ORCID: 0000-0003-1361-2121  
E-mail: [butusov-1@mail.ru](mailto:butusov-1@mail.ru)

**Винченцо Джорджо Дови**, д.т.н., профессор, Межвузовский исследовательский центр High Tech Recycling (HTR), Генуэзский университет (UniGE)

**E-mail:** [VGDovi.HTR@gmail.com](mailto:VGDovi.HTR@gmail.com)

**Андрей Юрьевич Белозерский**, д.э.н., профессор кафедры логистики и экономической информатики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

**E-mail:** [abelozerskiy@muctr.ru](mailto:abelozerskiy@muctr.ru)

**Виталий Вячеславович Челноков**, д.т.н., профессор кафедры логистики и экономической информатики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

**E-mail:** [chelnokov@muctr.ru](mailto:chelnokov@muctr.ru)

**Vincenzo Giorgio Dovi**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Interuniversity Research Centre of High Tech Recycling (HTR), Università degli Studi di Genova (UniGE)

**E-mail:** [VGDovi.HTR@gmail.com](mailto:VGDovi.HTR@gmail.com)

**Andrei Yu. Belozerskii**, Dr. Sci. (Economics), Prof. of the Chair of Logistics and Economical Information, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

**E-mail:** [abelozerskiy@muctr.ru](mailto:abelozerskiy@muctr.ru)

**Vitalii V. Chelnokov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Logistics and Economical Information, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

**E-mail:** [chelnokov@muctr.ru](mailto:chelnokov@muctr.ru)

---

Поступила в редакцию 20.04.2021

После доработки 06.09.2021

Принята к публикации 29.10.2021

---

Received 20.04.2021

Revised 06.09.2021

Accepted 29.10.2021

---