

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271

ОДНОФАЗОВАЯ ЛОКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПОСТАВОК ИЗВЕСТНЯКА ИЗ КАРЬЕРОВ СЕРБИИ ТЕПЛОВЫМ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМ

**М. Радосавлевич¹, С. Вуйич¹, Т. Бошевски²,
Ж. Праштало¹, Б. Йованович¹**

¹Горный институт, г. Белград, Сербия, E-mail: slobodan.vujic@ribeograd.ac.rs

²Рудпроект, г. Скопле, Сербия, E-mail: tb@rudproekt.com

Согласование работы теплоэнергетических предприятий с правовыми и нормативными требованиями для защиты воздуха от выбросов загрязняющих веществ включает в себя анализ возможностей обеспечения предприятий известняком, который используется как восстановитель в процессе очистки дымовых газов от серы. Задача снабжения теплоэлектростанций известняком без учета качества минерального сырья сводится к определению их местоположения, т. е. выбору карьера с наименьшими транспортными затратами. Представлена однофазовая локальная модель для обоснования принятия решений при управлении доставкой известняка предприятиям теплоэнергетического комплекса Сербии.

Однофазовая локальная модель, управление снабжением, известняк, теплоэлектростанция, карьер

Известно, что для окисления серы в дымовых газах, возникающих при сгорании каменного угля на теплоэнергетических предприятиях, используется известняк, стабильное и рациональное снабжение которым зависит от местоположения производства и объектов потребления. Эффективное управление снабжением включает в себя обеспечение необходимого количества известняка соответствующего качества, минимизацию негативных экологических последствий его использования, а также сведение суммарных затрат на его добычу и транспортировку к минимуму.

Известняк как распространенное многоцелевое аккумулятивное минеральное сырье добывается открытым способом из залежей, имеющих различное качество сырья и различные производственные возможности. Карьеры и потребители известняка в Сербии чаще всего неравномерно распределены по территории, поэтому расстояния между ними, условия и затраты на транспортировку неодинаковые. Влияние воздействия эксплуатации известняка на окружающую среду и экологические ограничения также различны в разных местностях [1, 2].

От вышеперечисленного зависит выбор модели планирования и основных условий, которые должны быть удовлетворены. Рассмотрим модель оптимизационного типа, которая позволяет представлять структуру, особенности и размещение на местности всех составляющих системы и обеспечивать руководство предприятия надежной количественной информацией для управления и принятия решений в виде оптимального плана производства и расходования известняка. Цель математического моделирования — выбор карьера, который будет снабжать известняком теплоэнергетические объекты с минимальными затратами. Исходными служат следующие предпосылки: в одном месте располагается только один карьер; модель включает все активные карьеры

и незадействованные залежи с известными запасами известняка удовлетворительного качества, на которых можно начать производство. При этом необязательно точно знать местоположение потенциальных карьеров, достаточно представлять их примерные границы [3].

Условием формирования модели является знание местоположения всех составляющих рассматриваемой системы, ее производственных потенциальных потребностей, транспортных связей между карьером и теплоэнергетическим предприятием, а также экологических ограничений.

Структура оптимизационной модели включает целевую функцию и ограничения. Целевая функция определяет цель и направление процесса оптимизации [4]. В локальных моделях критерий оптимальности отражает не отдельную, а общую цель всех участников производства и потребления. В качестве критерия оптимальности в моделях может фигурировать минимальная удаленность между составляющими системы, в нашем случае — между рудником и теплоэнергетическими предприятиями. Это означает, что общее количество известняка необходимо транспортировать кратчайшим путем. В качестве критерия может выступать и самое короткое время перевозки. Однако на практике в качестве критерия оптимальности рассматриваются эконометрические показатели: минимальные затраты на транспортировку, минимальные суммарные затраты на производство и транспортировку или комбинация минимальных затрат и максимальных доходов [2, 5].

В модели имеются два множества условий с взаимно уравновешенным отношением: одно отражает ограничения, которые относятся к производственным возможностям карьера, другое — потребности теплоэнергетических предприятий в известняке. В зависимости от изменения параметров в процессе оптимизации локальная модель считается статической, если изменений нет, и динамической — в противном случае. Локальные модели являются однофазовыми, если в процессе оптимизации возможно введение новых производственных единиц, и двухфазовыми, если вводятся новые единицы обеих категорий — производства и потребления.

В исследовании операций существуют несколько оптимизационных методов для решения задач локализации (определения местоположения). Для решения транспортных задач широко применяется линейное программирование с такими процедурами, как Simplex метод [4, 6]. Используются также специальные модели транспортных задач, в частности транзитная с межфазовым потреблением, и обобщенная модель. В некоторых ситуациях вид целевой функции требует применения моделей нелинейного программирования, а для решения задач определения местоположения — динамического программирования [7].

СТАТИЧЕСКАЯ ОДНОФАЗОВАЯ ЛОКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Цель данной работы — решение локальной задачи управления снабжением теплоэлектростанций Сербии известняком из существующих и потенциально возможных карьеров, т. е. статической однофазовой локальной задачи на основе математического моделирования.

Ограничения в модели определяются производственными возможностями карьера (1) и необходимым количеством известняка для теплоэнергетических предприятий (2) в рассматриваемом периоде времени. Эти два множества ограничений в совокупности с условием неотрицательного значения переменных (3) представляют основу модели [1]:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \dots, m+h, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \dots, m+h, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где x_{ij} — количество известняка, которое i -й карьер поставляет j -й теплоэлектростанции; a_i — производственная мощность i -го карьера; b_j — количество известняка, необходимое j -й теплоэлектростанции.

Поскольку потребности теплоэлектростанций должны быть полностью удовлетворены, рудники обязаны обеспечить поставку известняка в количестве не менее заданного [1]. Введем величину

$$a = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i \geq 0. \quad (4)$$

В (4) могут возникнуть две ситуации: первая — $a = 0$, когда существует баланс между производством и потреблением известняка, карьеры удовлетворяют потребности теплоэлектростанций существующим объемом производства; вторая $a > 0$, когда потребности теплоэлектростанций больше, чем имеющиеся производственные мощности рудника, дефицит известняка можно восполнить увеличением производства существующих активных карьеров или открытием новых.

Удовлетворение потребностей теплоэлектростанций, согласно (4), в ситуации, когда невозможно увеличить мощность существующих карьеров, требует начать добычу известняка на h новых местах:

$$0 < h \leq k \quad (5)$$

из k потенциальных мест. Определение мест h для открытия новых карьеров зависит от запасов и качества известняка, преимущества местоположения известняка для открытия карьера, транспортных условий и др. Постепенно увеличивая число новых карьеров h начиная от $h = 1$, устанавливается ситуация, которая удовлетворяет условию [1]:

$$\sum_{i=m+1}^{m+h} a_i \geq \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i. \quad (6)$$

Как уже указывалось, вид и направление целевой функции зависит от выбора цели оптимизации. При решении такого рода локальных задач в основном в качестве целевых используются функции, которые содержат суммарные затраты на транспортировку от карьера до теплоэнергетических объектов, отдельно или вместе с затратами на производство в каждом руднике. В оптимизационном процессе целевая функция может быть направлена к максимуму или минимуму. В нашем случае эта функция имеет затратный характер, поэтому оптимизационный процесс направлен к минимуму [8, 9]. Противоположное направление к максимальному значению функции критерия относится к модели, где целью является максимизация прибыли, содержания полезного компонента в руде и т. п. [3, 10].

Целевая функция, которая содержит только затраты на транспорт, имеет вид

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{m+h} \sum_{j=1}^{n+1} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где c_{ij} — удельные затраты на транспортировку 1 т известняка от i -го карьера до j -й теплоэлектростанции.

Целевая функция, сочетающая затраты на транспортировку с затратами на производство известняка, записывается в виде

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{m+h} \sum_{j=1}^{n+1} (d_i + c_{ij}) x_{ij} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где d_i — расходы на закупку 1 т известняка из j -го карьера.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние годы электроиндустрия Сербии активно занимается приведением работы теплоэнергетических предприятий в соответствие с правовыми предписаниями и стандартами с целью уменьшения выбросов загрязняющих веществ в дымовых газах, возникающих при сгорании угля. В [11] положено начало применению локального моделирования к решению данной проблемы.

С учетом того, что на территории Сербии имеются большие запасы известняка и зарегистрировано около 150 месторождений, проблема обеспечения им теплоэлектростанций сводится к проблеме выбора потенциальных поставщиков. В начальный период анализа предпочтения отдаются активным карьерам, чья удаленность от теплоэнергетических объектов не превышает 150 км, а известняк по качеству соответствует следующим условиям: мин. 94 % CaCO_3 , макс. 3 % MgCO_3 , макс. 3 % SiO_2 , макс. 0.8 % Fe_2O_3 и т. д. [11].

Кроме этих условий, на выбор рудника влияет техническая оснащенность и технологическая готовность к надежному и безопасному производству известняка, наличие сертификата ISO на систему управления качеством (SRPS ISO 9001), на систему управления защиты окружающей среды (SRPS ISO 14001), на систему управления качеством безопасности и здоровья на производстве (SRPS ISO 18001).

В соответствии с таким подходом выделено 19 карьеров — потенциальных поставщиков теплоэнергетических объектов электроиндустрии Сербии. На рис. 1 показано местоположение карьеров и теплоэлектростанций. Названия карьеров заменены числами 1–19, а названия пяти теплоэлектростанций — буквами А, В, С, D и Е.

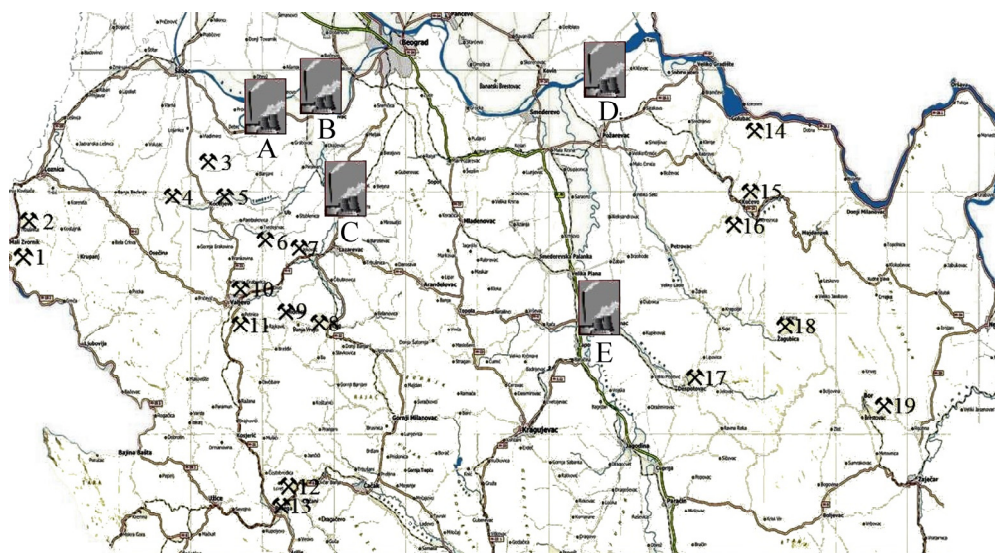


Рис. 1. Местоположение карьеров (1, 2, 3, ... 19) — потенциальных поставщиков известняка теплоэлектростанциям А, В, С, D, Е

ЛОКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СНАБЖЕНИЯ ИЗВЕСТНЯКОМ

Определив все составляющие структуры системы, мы выполнили начальное условие для формирования локальной модели снабжения известняком. Важным исходным условием модели является отсутствие привилегированных поставщиков, т.е. любой карьер может быть поставщиком известняка любой теплоэлектростанции.

Определяющее значение для решения задачи имеют затраты на транспортировку c_{ij} и расходы на закупку 1 т известняка из карьера d_j . Модель не включает затраты на производство известняка из практических соображений, поскольку их различия для разных карьеров настолько малы, что не влияют на конечное решение.

Исходная модель формируется в виде задачи по определению количества известняка x_{ij} , которое карьеры при минимальных затратах будут поставлять теплоэлектростанциям. Согласно (4), потребности теплоэлектростанций в известняке должны быть полностью удовлетворены, а значит, общая годовая поставка известняка не должна быть меньше 844 000 т. Учитывая, что суммарная годовая мощность всех рудников составляет 7 170 000 т, это условие выполнено [11].

Затраты на транспортировку 1 т известняка от карьера до теплоэлектростанции рассчитаны с учетом вида транспорта и длины транспортного пути. Транспортировка грузовиками предусмотрена на всех направлениях, кроме следующих: направление карьер 3 – теплоэлектростанция D, где как более дешевый вариант предлагается комбинированная автомобильная и речная перевозка, и направление карьер 14 – теплоэлектростанции А, В и D, где используется только речная перевозка. Исходные данные представлены в табл. 1, где x_{ij} — количество известняка, которое карьер i поставляет теплоэлектростанции j ; c_{ij} — затраты на транспортировку 1 т известняка от i -го карьера до j -й теплоэлектростанции.

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные модели снабжения теплоэлектростанций известняком

Карьер	Мощность карьера, т/год	Теплоэлектростанция									
		А		В		С		D		Е	
1	100 000	x_{11}	1.32	x_{12}	1.44	x_{13}	1.47	x_{14}	2.68	x_{15}	2.88
2	1 000 000	x_{21}	1.22	x_{22}	1.34	x_{23}	1.41	x_{24}	2.58	x_{25}	2.78
3	350 000	x_{31}	0.34	x_{32}	0.51	x_{33}	0.46	x_{34}	0.99**	x_{35}	1.70
4	300 000	x_{41}	0.58	x_{42}	0.70	x_{43}	0.66	x_{44}	1.84	x_{45}	2.04
5	80 000	x_{51}	0.60	x_{52}	0.48	x_{53}	0.48	x_{54}	1.49	x_{55}	1.69
6	320 000	x_{61}	0.57	x_{62}	0.45	x_{63}	0.25	x_{64}	1.28	x_{65}	1.48
7	210 000	x_{71}	0.54	x_{72}	0.42	x_{73}	0.19	x_{74}	1.23	x_{75}	1.42
8	200 000	x_{81}	0.77	x_{82}	0.65	x_{83}	0.37	x_{84}	1.32	x_{85}	1.07
9	200 000	x_{91}	0.67	x_{92}	0.55	x_{93}	0.38	x_{94}	1.41	x_{95}	1.25
10	500 000	$x_{10.1}$	0.72	$x_{10.2}$	0.60	$x_{10.3}$	0.46	$x_{10.4}$	1.55	$x_{10.5}$	1.69
11	160 000	$x_{11.1}$	0.75	$x_{11.2}$	0.63	$x_{11.3}$	0.48	$x_{11.4}$	1.57	$x_{11.5}$	1.72
12	750 000	$x_{12.1}$	1.47	$x_{12.2}$	1.35	$x_{12.3}$	1.24	$x_{12.4}$	1.85	$x_{12.5}$	1.24
13	900 000	$x_{13.1}$	1.49	$x_{13.2}$	1.37	$x_{13.3}$	1.26	$x_{13.4}$	1.87	$x_{13.5}$	1.26
14	300 000	$x_{14.1}$	0.97*	$x_{14.2}$	0.87*	$x_{14.3}$	1.43	$x_{14.4}$	0.30*	$x_{14.5}$	1.02
15	250 000	$x_{15.1}$	1.68	$x_{15.2}$	1.56	$x_{15.3}$	1.44	$x_{15.4}$	0.67	$x_{15.5}$	0.59
16	300 000	$x_{16.1}$	1.67	$x_{16.2}$	1.55	$x_{16.3}$	1.43	$x_{16.4}$	0.66	$x_{16.5}$	0.58
17	800 000	$x_{17.1}$	1.71	$x_{17.2}$	1.59	$x_{17.3}$	1.46	$x_{17.4}$	1.03	$x_{17.5}$	0.29
18	50 000	$x_{18.1}$	2.03	$x_{18.2}$	1.96	$x_{18.3}$	1.83	$x_{18.4}$	1.06	$x_{18.5}$	0.77
19	400 000	$x_{19.1}$	2.94	$x_{19.2}$	2.82	$x_{19.3}$	2.80	$x_{19.4}$	2.35	$x_{19.5}$	1.74
Потребность теплоэлектростанции, т		240 000		325 000		54 000		200 000		25 000	

*Речной транспорт; **комбинированный автомобильный и речной транспорт.

В структуре модели целевая функция (9) содержит затраты на транспортировку с направлением критерия к минимуму, а множество ограничений составляют два подмножества. Подмножество с пятью ограничениями (10) определяет потребности теплоэлектростанций, подмножество (11) — производственные возможности или мощности карьеров. Компьютерная обработка проведена с помощью Excel Solver, конечный результат анализа представлен в табл. 2.

Целевая функция:

$$z_1 = \sum_{i=1}^{19} \sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min . \quad (9)$$

Ограничения:

— потребности теплоэлектростанций

$$\sum_{i=1}^{19} x_{ij} = b_j, \quad j = \overline{1,5}; \quad (10)$$

— производственные возможности карьера

$$\sum_{j=1}^5 x_{ij} \leq a_i, \quad i = \overline{1,19}. \quad (11)$$

ТАБЛИЦА 2. Оптимальное решение снабжения теплоэлектростанций известняком

Карьер	Мощность карьера, т/год	Теплоэлектростанция									
		А		В		С		D		E	
1	100 000	0	1.32	0	1.44	0	1.47	0	2.68	0	2.88
2	1 000 000	0	1.22	0	1.34	0	1.41	0	2.58	0	2.78
3	350 000	240 000	0.34	0	0.51	0	0.46	0	0.99	0	1.70
4	300 000	0	0.58	0	0.70	0	0.66	0	1.84	0	2.04
5	80 000	0	0.60	0	0.48	0	0.48	0	1.49	0	1.69
6	320 000	0	0.57	169 000	0.45	0	0.25	0	1.28	0	1.48
7	210 000	0	0.54	156 000	0.42	54 000	0.19	0	1.23	0	1.42
8	200 000	0	0.77	0	0.65	0	0.37	0	1.32	0	1.07
9	200 000	0	0.67	0	0.55	0	0.38	0	1.41	0	1.25
10	500 000	0	0.72	0	0.60	0	0.46	0	1.55	0	1.69
11	160 000	0	0.75	0	0.63	0	0.48	0	1.57	0	1.72
12	750 000	0	1.47	0	1.35	0	1.24	0	1.85	0	1.24
13	900 000	0	1.49	0	1.37	0	1.26	0	1.87	0	1.26
14	300 000	0	0.97	0	0.87	0	1.43	200 000	0.30	0	1.02
15	250 000	0	1.68	0	1.56	0	1.44	0	0.67	0	0.59
16	300 000	0	1.67	0	1.55	0	1.43	0	0.66	0	0.58
17	800 000	0	1.71	0	1.59	0	1.46	0	1.03	25 000	0.29
18	50 000	0	2.03	0	1.96	0	1.83	0	1.06	0	0.77
19	400 000	0	2.94	0	2.82	0	2.80	0	2.35	0	1.74
Потребности теплоэлектростанции, т		240 000		325 000		54 000		200 000		25 000	
Общие затраты на транспортировку известняка 300 680 €				Затраты на транспортировку 1 т известняка 0.356 €							

В соответствии с оптимальным решением, приведенным в табл. 2, план снабжения теплоэлектростанций известняком (рис. 2) предполагает задействовать 5 из 19 карьеров. Карьеры 3, 6, 7, 14 и 17 должны ежегодно поставлять 844 000 т известняка: карьер 3 — 240 000 т теплоэлектростанции А, карьер 6 — 169 000 т теплоэлектростанции В, карьер 7 — 156 000 т теплоэлектростанции В и 54 000 т — теплоэлектростанции С, карьер 14 — 200 000 т теплоэлектростанции D (речным транспортом, используя течение Дуная), карьер 17 — 25 000 т теплоэлектростанции E на уровне ее годовых потребностей. При реализации этого плана суммарные затраты на транспортировку составят 300 680 € или 0.356 € за 1 т известняка. В такой производственно-потребительской структуре технологического комплекса это самые низкие показатели затрат на транспортировку.

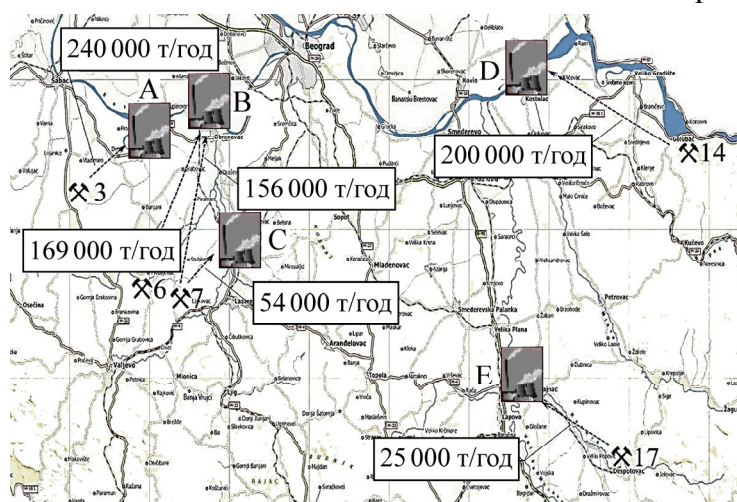


Рис. 2. План оптимального распределения карьеров для добычи известняка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня трудно представить долгосрочное или оперативное планирование развития и функционирования рудника без адекватной математической модели. В нашем распоряжении имеются многочисленные возможности эконометрического, межсекторного, оптимизационного, одно- и многокритериального, параметрического, нечеткого логического и других модельных подходов.

Локальные модели, как часть большого класса математических инструментов исследования операций, обеспечивают объективную и надежную количественную основу для принятия решений, а в процессе управления производственно-деловыми системами — для выбора направления оптимального структурирования, развития и функционирования. Все составляющие системы занимают равноправное положение в модели. Их функциональную долю определяют условия совместного функционирования и цель оптимизации.

При условии, что алгоритмическая процедура соблюдена и в модели используются верные данные, математические модели надежно определяют решение проблемы, которая задается целевой функцией. Сопоставление результатов, изложенных в данной работе, с результатами многокритериального анализа, это подтверждает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Станоевич Р.** Оптимизационные макроэкономические модели. — Белград: Велатра, 2001. — 512 с. (на серб. яз.).
2. **Стрекачинский Г. А., Ордин А. А., Федорин В. А.** Оптимальное размещение транспортных сетей на поверхности шахт. — Новосибирск: Наука, 1981. — 85 с.
3. **Vujić S., Miljanović I., Kuzmanović M., et al.**, The deterministic and fuzzy linear approach in planning the production of mine system with several open pits, Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences, Krakow, 2011, Vol. 56, No. 3. — P. 489–497.
4. **Канторович Л. В., Горстко А. Б.** Оптимальные решения в экономике. — М.: Наука, 1972.
5. **Вуйич С.** Методы оптимизации — применение линейного программирования при открытом способе разработки // Белградский ун-т, горно-геол. фак. — Белград, 1977. — 85 с. (на серб. яз.).
6. **Reay-Chen Wang.** Tien-Fu Liangb, Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning, Int. J. Production Economics, 2005. — P. 328–341.
7. **Стрекачинский Г. А., Ордин А. А., Федорин В. А.** Совершенствование метода динамического программирования при проектировании подъездных путей горнодобывающих предприятий // ФТПРПИ. — 1981. — № 2. — С. 87–91.
8. **Ahmet Yucekaya, Kadir Has.** Cost minimizing coal logistics for power plants considering transportation constraints, Journal of Traffic and Logistics Engineering, 2013, Vol. 1, No. 2. — P. 122–127.
9. **Бодон П., Фрике К., Сандеман Т., Стэнфорд С.** Моделирование системы поставок руды от карьера до порта: комбинированный оптимизационно-моделирующий подход // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 68–77.
10. **Vujić S., Benović T., Miljanović, et al.**, Fuzzy linear model of production optimization of mining systems with multiple entities, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, University of Science and Technology Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, Vol. 18, No. 6. — P. 633–637.
11. **Изучение** возможностей снабжения известняком для очистки дымовых газов от серы для ТЭС Костолац, ТЭС Никола Тесла и новых теплоэлектростанций. — Белград: Горный ин-т и Текон, 2014. — 228 с. (на серб. яз.).

Поступила в редакцию 10/III 2016