

М.П. Базилевский¹, А.Б. Ойдопова²

¹ *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

² *Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Чита, Российская Федерация*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

Аннотация. Статья посвящена проблеме построения регрессионных моделей влияния численности поголовья скота и птицы, а также объемов промышленного производства, на уровень загрязнения атмосферного воздуха в Забайкальском крае. С помощью метода наименьших квадратов построена традиционная модель множественной линейной регрессии. Предложена модель множественной модульной линейной регрессии. Для неё показано, как находятся области определения параметров, содержащихся под знаком модуля. На основе этого разработан алгоритм приближенного оценивания модульной регрессии с помощью метода наименьших квадратов. Этот алгоритм был реализован в виде скрипта для эконометрического пакета Gretl. С помощью разработанной программы была построена модель модульной линейной регрессии, оказавшаяся по величине коэффициента детерминации лучше, чем множественная регрессия. Дана интерпретация множественной и модульной регрессий.

Ключевые слова: регрессионная модель, метод наименьших квадратов, модульная регрессия, загрязнение атмосферного воздуха, экологическая ситуация.

М.Р. Bazilevskiy¹, A.B. Oydopova²

¹ *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

² *Zabaikalsky institute of railway transport – the branch of Irkutsk State Transport University, Chita, Russian Federation*

MODELING OF EMISSIONS OF POLLUTANTS INTO THE ATMOSPHERE OF THE ZABAİKALSKY KRAY

Abstract. The article is devoted to the problem of constructing regression models of the influence of the number of livestock and poultry, as well as the volume of industrial production, on the level of atmospheric air pollution in the Zabaikalsky kray. The traditional model of multiple linear regression is constructed using the least squares method. A model of multiple modular linear regression is proposed. It shows how the areas of definition of parameters contained under the module sign are located. Based on this, an algorithm for approximate estimation of modular regression using the least squares method has been developed. This algorithm was implemented as a script for the Gretl econometric package. With the help of the developed program, a model of modular linear regression was built, which turned out to be better in terms of the coefficient of determination than multiple regression. The interpretation of multiple and modular regressions is given.

Keywords: regression model, least squares method, modular regression, atmospheric air pollution, environmental situation.

Введение.

В настоящее время весь мир движется к самой основной цели экологии – сократить влияние глобального экологического кризиса и выйти на путь устойчивого развития человечества, при котором будет достигнуто удовлетворение всех жизненных потребностей для будущего поколения, сохранения ресурсов и природного биоразнообразия.

Ни для кого не секрет, что сейчас с нами соседствуют и оказывают значительное влияние на нашу планету большое количество экологических проблем, начиная от загрязнения Мирового океана, роста населения планеты, усиления парникового эффекта, заканчивая лесными пожарами, опустыниванием плодородных земель, исчезновением различных видов флоры и фауны и т.д.

Одной из самых распространенных и опасных проблем было, есть и остается загрязнение воздуха. Целью данной работы является исследование влияния экологических факторов на выбросы загрязняющих веществ в атмосферу Забайкальского края.

1. Стационарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу

Загрязнение окружающего воздуха происходит тогда, когда в атмосферу попадает избыточное количество различных веществ, например:

- газы (диоксид углерода, монооксид углерода, диоксид серы и т.д.);
- различные частицы (как органические, так и неорганические);
- биологические молекулы.

Несомненно, что загрязнение воздуха негативно влияет на здоровье людей. Оно может вызывать различные заболевания, опасную аллергию и в некоторых случаях приводить к летальному исходу. Негативное воздействие проявляется не только на человеческом организме. Вредный воздух может также нанести вред другим живым организмам и продовольственным культурам, а также нанести ущерб естественной или искусственной экосистеме (среде).

Согласно отчету Всемирной организации здравоохранения за 2021 год уже 99% населения планеты дышит воздухом, который абсолютно не соответствует требованиям безопасности. По оценкам организации, загрязнение окружающей среды стало причиной около 462 миллиона преждевременных смертей [1].

По данным ученых Техасского университета в Остине (США) глобальное загрязнение воздуха сокращает продолжительность жизни человека в среднем на один год [2].

Количество смертей, связанных с загрязнением атмосферного воздуха представлено на рисунке 1.

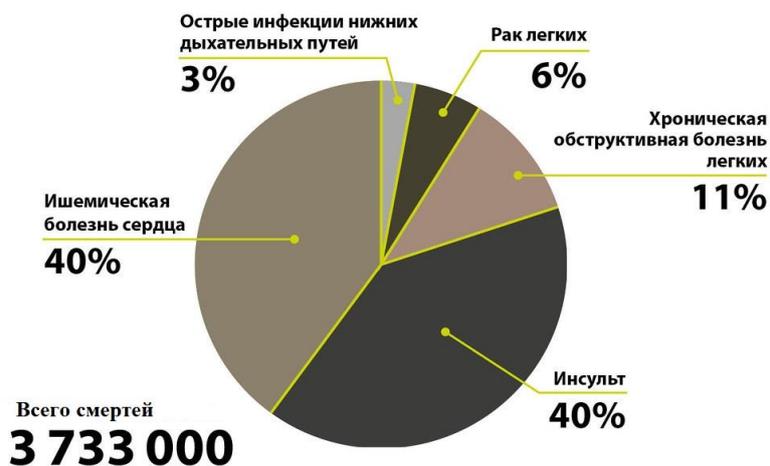


Рис. 1. Количество смертей, связанных с загрязнением атмосферного воздуха

Основные источники загрязнения атмосферы представлены в Таблице 1 [3].

Таблица 1

Основные источники загрязнения атмосферы	
Источники	Проявление
1	2
Природные (естественные)	загрязнители минерального, растительного или микробиологического происхождения, к которым относят извержения вулканов, лесные и степные пожары, пыль, пыльцу растений, выделения животных, парниковый эффект и др.

1	2
	- транспортные: загрязнители, образующиеся при работе автомобильного, железнодорожного, воздушного, морского и речного транспорта
	- производственные: загрязнители, образующиеся как выбросы при технологических процессах, отоплении
	- бытовые: загрязнители, обусловленные сжиганием топлива в жилище и переработкой бытовых отходов
	- механические: пыль цементных заводов, пыль от сгорания угля в котельных, топках и печах, сажа от сгорания нефти и мазута, стирающиеся автопокрышки и т.д.
	- химические: пылевидные или газообразные вещества, способные вступать в химические реакции
	- радиоактивные

Рассмотрим экологическую ситуацию в Забайкальском крае.

По итогам 2020 года Забайкальский край оказался на 3 месте среди регионов Российской Федерации по концентрации вредных веществ и загрязнения атмосферного воздуха [4].

Климат в крае резко континентальный, также на него влияет и высота – в среднем 650 метров над уровнем моря, а среднегодовая влажность воздуха составляет 65%. Всё это приводит к накоплению загрязняющих веществ в нижнем слое атмосферы и, следовательно, метеорологические условия становятся неблагоприятными.

В Забайкальском крае расположены крупные месторождения урана, помимо этого имеются и другие полезные ископаемые такие как: олово, золото, серебро, полиметаллические руды и др. Следовательно, деятельность подобных промышленных предприятий добывающей и обрабатывающей отрасли является основной причиной загрязнения воздуха. Кое-какая довольно-таки существенная часть выбросов вредных веществ приходится на котельные, которые работают на мазуте [5].

Кроме того, в крае сильно развита сельскохозяйственная промышленность и ни для кого ни секрет, что животноводство крайне негативно отражается на состоянии окружающей среды. Так, например, 31% парниковых газов выбрасывают животноводческие и рыболовные фермы. Бактерии в их желудках помогают переварить пищу, а следствие этой работы — один из основных парниковых газов — метан. Он выделяется в атмосферу через отрыжку, (еще небольшая его часть вырабатывается и в кишечнике), поэтому первенство по количеству парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу, занимает говядина, баранина и молочные продукты [6].

Таким образом, одними из главных причин загрязнения атмосферного воздуха в Забайкалье являются:

- поголовье скота;
- химическое производство.

2. Моделирование выбросов в атмосферу Забайкальского края с помощью множественной регрессии

Модель множественной линейной регрессии [7,8] имеет вид:

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где n – объем выборки; l – количество объясняющих переменных; $y_i, i = \overline{1, n}$ – значения объясняемой переменной y ; $x_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l}$ – значения объясняющих переменных x_1, x_2, \dots, x_l ; $\alpha_j, j = \overline{0, l}$ – неизвестные параметры; $\varepsilon_i, i = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации.

Для оценки неизвестных параметров модели (1) разработан широкий арсенал различных математических методов. Самым простым и известным из них является метод наименьших квадратов (МНК) [7]. Не менее эффективными являются метод наименьших модулей (МНМ) и антиробастного оценивания, подробно рассмотренные в [7,8]. Помимо этого, в последнее время ведутся разработки новых методов и алгоритмов оценивания регрессионных моделей. Так, в [9,10] предложен метод смешанного оценивания, в [11] описано МНМ-оценивание с учётом критерия согласованности поведения, а в [12-16] предложена технология МНК-оценивания регрессий с помощью аппарата частично-булевого линейного программирования.

Для нахождения МНК-оценок множественной регрессии (1) требуется решить оптимизационную задачу:

$$S(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_l) = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \alpha_0 - \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{ij} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Используя необходимое условие экстремума для задачи (2), можно получить систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n x_{i1}^2 \right) \alpha_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_{i2} x_{i1} \right) \alpha_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_{il} x_{i1} \right) \alpha_l + \alpha_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} = \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i, \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} \right) \alpha_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_{i2}^2 \right) \alpha_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_{il} x_{i2} \right) \alpha_l + \alpha_0 \sum_{i=1}^n x_{i2} = \sum_{i=1}^n x_{i2} y_i, \\ \dots \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{i1} x_{il} \right) \alpha_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_{i2} x_{il} \right) \alpha_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_{il}^2 \right) \alpha_l + \alpha_0 \sum_{i=1}^n x_{il} = \sum_{i=1}^n x_{il} y_i, \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{i1} \right) \alpha_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_{i2} \right) \alpha_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_{il} \right) \alpha_l + \alpha_0 n = \sum_{i=1}^n y_i, \end{cases}$$

решение которой представимо в матричной форме:

$$\alpha = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3)$$

где $X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1l} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nl} \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, T$ – операция транспонирования.

Для построения множественной регрессии выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Забайкальского края использовались статистические данные [17-19], представленные в таблице 2, по следующим переменным:

- y – стационарные выбросы загрязняющих веществ, тыс.тонн;
- x_1 – поголовье скота и птицы, тыс.голов;
- x_2 – промышленное производство, тыс.тонн.

Найденные по этим данным коэффициенты корреляции объясняющих переменных с y оказались положительными и составили $r_{yx_1} = 0,665$ и $r_{yx_2} = 0,768$. Это подтверждает гипотезу о том, что в Забайкальском крае на стационарные выбросы загрязняющих веществ довольно сильно влияет и поголовье скота и птицы, и промышленное производство. Причем, с ростом переменных x_1 и x_2 происходит рост и переменной y .

Таблица 2

Статистические данные

Год	y	x_1	x_2
2000	162,3	2111,3	1601,6
2001	161,6	2090,9	1512
2002	151,2	2194,3	1422,4
2003	153,8	2112,4	1332,8
2004	134,64	2015,6	1243,2
2005	139,97	1950,6	1160
2006	143,2	2052	1186
2007	136,9	2412	798
2008	139,7	2028,6	846
2009	146,3	1892,8	882
2010	138,2	1929,5	904
2011	130,9	1940,5	925
2012	127,2	1907,9	805
2013	127,1	1881	815
2014	124,5	1862,3	831
2015	119,2	1792,3	841
2016	121,7	1751,8	871
2017	134,2	1738,3	807
2018	103,9	1567,4	827
2019	111,3	1552,2	822,3
2020	137,2	1498,6	818

Далее по данным из таблицы 2 были найдены характеристики

$$(X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 3,840735985 & -0,002082661 & 0,000199476 \\ -0,002082661 & 1,41729 \cdot 10^{-6} & -6,28507 \cdot 10^{-7} \\ 0,000199476 & -6,28507 \cdot 10^{-7} & 9,94278 \cdot 10^{-7} \end{pmatrix}, X^T Y = \begin{pmatrix} 2845,01 \\ 5501607,236 \\ 2940065,738 \end{pmatrix},$$

по которым с использованием (3) были определены МНК-оценки множественной регрессии:

$$\tilde{y} = 55,43 + \underset{(2,288)}{0,0243} x_1 + \underset{(3,699)}{0,0329} x_2, \quad (4)$$

где в скобках под коэффициентами указаны значения t-критерия Стьюдента.

Коэффициент детерминации модели (4) $R^2 = 0,682839$, что говорит о её удовлетворительном качестве. Другими словами, 68,28% вариации переменной y объясняется переменными x_1 и x_2 . Остальные 31,72% приходятся на долю неучтенных факторов.

Установлено, что коэффициенты множественной регрессии (4) значимы по t-критерию Стьюдента для уровня значимости 5%.

Модель (4) можно интерпретировать следующим образом: с ростом в Забайкальском крае поголовья скота и птицы x_1 на 1 тыс. голов, выбросы загрязняющих веществ в атмосферу увеличиваются в среднем на 0,0243 тыс. тонн; с ростом промышленного

производства x_2 на 1 тыс. тонн, выбросы загрязняющих веществ увеличиваются в среднем на 0,0329 тыс. тонн. Причем, переменная x_2 сильнее влияет на y , чем переменная x_1 .

3. Моделирование выбросов в атмосферу Забайкальского края с помощью модульной регрессии

Введем в рассмотрение модель множественной модульной линейной регрессии:

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j |x_{ij} - \lambda_j| + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где λ_j , $j = \overline{1, l}$ – новые неизвестные параметры. Будем считать, что в (5) $x_{ij} \geq 0$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, l}$.

Для простоты будем называть модель (5) модульной регрессией.

Очевидно, что если все значения объясняющих переменных x_1 , x_2 , ..., x_l неотрицательны, а $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_l = 0$, то модульная регрессия (5) трансформируется во множественную регрессию (1).

Модульная регрессия (5) является нелинейной по оцениваемым параметрам, поэтому применить формулу (3) для неё не представляется возможным.

Рассмотрим парную модульную регрессию вида

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 |x_i - \lambda| + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Введем переменную z со значениями $z_i = |x_i - \lambda|$, $i = \overline{1, n}$. Тогда модульная регрессия (6) станет линейной по параметрам и примет вид

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 z_i + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Пусть минимальное и максимальное по выборке значение переменной x составляет x_{\min} и x_{\max} соответственно. Тогда очевидно, что:

- если $\lambda \leq x_{\min}$, то $x_i - \lambda \geq 0$, следовательно, коэффициент корреляции $r_{yz} = r_{yx}$, поэтому при МНК-оценивании модели (7) сумма квадратов её остатков будет равна сумме квадратов остатков оцененной с помощью МНК парной регрессии $y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \varepsilon$ (в этом случае МНК-оценки регрессии (7) $\tilde{\alpha}_0 = \tilde{\alpha}_0^{\text{МНК}} + \tilde{\alpha}_1^{\text{МНК}} \lambda$, $\tilde{\alpha}_1 = \tilde{\alpha}_1^{\text{МНК}}$, где $\tilde{\alpha}_0^{\text{МНК}}$, $\tilde{\alpha}_1^{\text{МНК}}$ – МНК-оценки регрессии $y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \varepsilon$);
- если $\lambda \geq x_{\max}$, то $x_i - \lambda \leq 0$, следовательно, коэффициент корреляции $r_{yz} = -r_{yx}$, поэтому сумма квадратов остатков для (7) равна сумме квадратов остатков для регрессии $y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \varepsilon$ (в этом случае МНК-оценки регрессии (7) $\tilde{\alpha}_0 = \tilde{\alpha}_0^{\text{МНК}} + \tilde{\alpha}_1^{\text{МНК}} \lambda$, $\tilde{\alpha}_1 = -\tilde{\alpha}_1^{\text{МНК}}$, где $\tilde{\alpha}_0^{\text{МНК}}$, $\tilde{\alpha}_1^{\text{МНК}}$ – МНК-оценки регрессии $y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \varepsilon$).

Из вышесказанного следует, что имеет смысл оценивать модульную регрессию (6) с помощью МНК только тогда, когда параметр $\lambda \in [x_{\min}, x_{\max}]$. Это утверждение можно распространить и на множественную модульную регрессию (5).

Тогда можно сформулировать следующий алгоритм приближенного МНК-оценивания модульной регрессии (5).

1. Находятся области определения параметра $\lambda_j \in [x_{\min}^j, x_{\max}^j]$, $j = \overline{1, l}$.
2. На каждом отрезке $[x_{\min}^j, x_{\max}^j]$ равномерно выбираются p точек.
3. Перебирая значения параметров λ_j на каждом отрезке, с помощью МНК оцениваются линейные регрессии (7), общее число которых p^l .
4. Выбирается та модель, у которой сумма квадратов остатков минимальна.

Предложенный алгоритм был реализован в виде скрипта на языке программирования `hansl` эконометрического пакета `Gretl`. Полученная с помощью этого скрипта (при $p = 300$) по данным из таблицы 2 модульная регрессия имеет вид:

$$\tilde{y} = 119,038 + \underset{(2,516)}{0,028|x_1 - 1568,39|} + \underset{(3,684)}{0,033|x_2 - 827,367|}. \quad (8)$$

Коэффициент детерминации модульной регрессии (8) $R^2 = 0,710053$, следовательно, качество её аппроксимации выше, чем у множественной регрессии (4). Оба коэффициента в (8) значимы по t -критерию Стьюдента.

Модель (8) можно интерпретировать следующим образом: с ростом в Забайкальском крае абсолютного отклонения $|x_1 - 1568,39|$ на 1 тыс. голов, выбросы загрязняющих веществ в атмосферу увеличиваются в среднем на 0,028 тыс. тонн; с ростом абсолютного отклонения $|x_2 - 827,367|$ на 1 тыс. тонн, выбросы загрязняющих веществ увеличиваются в среднем на 0,033 тыс. тонн.

Заключение. В статье был проведен регрессионный анализ и построена множественная и модульная математическая модель влияния численности поголовья скота и птицы, а также промышленного производства, на состояние атмосферного воздуха в Забайкальском крае. Подтверждена гипотеза о существенном влиянии переменных x_1 и x_2 на стационарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. На протяжении 20 лет наблюдается тенденция снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха, что не может не радовать. Дальнейшее движение к устойчивому развитию должно планомерно реализовываться не только в каком-то отдельном регионе или стране, а во всем мире.

К сожалению, антропогенный след с каждым годом возрастает, человеческие технологии доминируют над биологическим разнообразием, что, в свою очередь, и приводит к развитию новых болезней, природным катаклизмам, стихийным бедствиям. Наиболее вероятно, что если бы человечество не изменяло течение рек, не загрязняло природу (воздух, землю, воду), не истребляло флору и фауну, то удалось бы избежать те экологические проблемы, которые сейчас нас окружают и оказывают негативное влияние на состояние всей планеты.

Стоит и дальше ставить перед собой задачи:

- создавать возможности для оценки состояния экосистемы;
- проводить исследования для сохранения тех или иных видов популяций;
- контролировать работу промышленных предприятий и переходить на «зелёные» технологии;
- сокращать сельскохозяйственное производство и внедрять новое оборудование;
- заниматься экопросветительской деятельностью и работать с населением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мурая Ольга Уже 99% населения планеты дышит опасным для здоровья воздухом // «Смотрим» 08.04.2022 URL: <https://smotrim.ru/article/2700786>
2. Джошуа С. Апте, Майкл Брауэр, Аарон Дж. Коэн, Маджид Эззати и К. Арден Поуп III, Окружающая среда снижает ожидаемую продолжительность жизни во всем мире и в регионе, August 22, 2018 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.8b00360>
3. Оценка воздействия выбросов вредных веществ на атмосферный воздух : учеб. пособие / Ю. Г. Кирсанов ; [науч. ред. М. Г. Шишов] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 110 с.
4. А. Г. Ганул, И. Г. Орлова. Нормирование выбросов: вопросов больше, чем ответов. // Экология производства, № 3, 31 марта 2021, с.66-77, Москва, Россия
5. Шамбер О.Ю., Голубничий А.А. Динамика загрязнения атмосферного воздуха Забайкальского края (г. Чита) // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 2

[Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/02/64459> (дата обращения: 13.04.2022).

6. Шурупов Д.В. Почему и как животноводство вредит экологии. 14.09.2015 <http://ecobeing.ru/articles/livestock-farming-harms-ecology/>

7. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. – Иркутск: Облформпечать, 1996. – 321 с.

8. Носков С.И., Базилевский М.П. Построение регрессионных моделей с использованием аппарата линейно-булевого программирования. – Иркутск: ИрГУПС, 2018. – 176 с.

9. Носков С.И. Метод смешанного оценивания параметров линейной регрессии: особенности применения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 1. – С. 126-132.

10. Носков С.И., Перфильева К.С. Моделирование объема погрузки на железнодорожном транспорте методом смешанного оценивания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 148-153.

11. Базилевский М.П., Носков С.И. Программный комплекс построения линейной регрессионной модели с учетом критерия согласованности поведения фактической и расчетной траекторий изменения значений объясняемой переменной // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 9 (128). – С. 37-44.

12. Базилевский М.П. Сведение задачи отбора информативных регрессоров при оценивании линейной регрессионной модели по методу наименьших квадратов к задаче частично-булевого линейного программирования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6. – № 1 (20). – С. 108-117.

13. Базилевский М.П. Отбор информативных регрессоров с учетом мультиколлинеарности между ними в регрессионных моделях как задача частично-булевого линейного программирования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6. – № 2 (21). – С. 104-118.

14. Базилевский М.П. Отбор оптимального числа информативных регрессоров по скорректированному коэффициенту детерминации в регрессионных моделях как задача частично целочисленного линейного программирования // Прикладная математика и вопросы управления. – 2020. – № 2. – С. 41-54.

15. Базилевский М.П. Отбор значимых по критерию Стьюдента информативных регрессоров в оцениваемых с помощью МНК регрессионных моделях как задача частично-булевого линейного программирования // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 5-16.

16. Базилевский М.П. Способ определения параметра M в задаче частично-булевого линейного программирования для отбора регрессоров в линейной регрессии // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 2. – С. 62-66.

17. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ имени М.В.Ломоносова, 2021. — 864 с.

18. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ имени М.В.Ломоносова, 2020. — 1000 с.

19. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа. – 2017. – 760 с.

REFERENCES

1. Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data: 04.04.2022 URL <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
2. Joshua S. Apte*, Michael Brauer, Aaron J. Cohen, Majid Ezzati, and C. Arden Pope III, Ambient PM2.5 Reduces Global and Regional Life Expectancy, August 22, 2018 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.8b00360>
3. *Otsenka vozdeistvia vrednykh vechestv na atmosferniy vozdukh* [Assessment of the impact of emissions of harmful substances on atmospheric air : studies. Manual] / Yu. G. Kirsanov ; [scientific ed. M. G. Shishov] ; Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Federation, Ural. feder. un-T. — Yekaterinburg : Ural Publishing House. un-ta, 2018. — 110 p.
4. A. G. Ganul, I. G. Orlova. *Normirovanie vybrosov: voprosov bolshe chem otvetov* [Emissions rationing: there are more questions than answers] // Ecology of Production, No. 3, March 31, 2021, pp.66-77, Moscow, Russia
5. Shamber O.Yu., Golubnichy A.A. *Dinamika zagryaznenia atmosfernogo vozdukha Zabaikaskogo kraya* [Dynamics of atmospheric air pollution in the Trans-Baikal Territory (Chita)] // Modern scientific research and innovations. 2016. No. 2 [Electronic resource]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/02/64459> (accessed: 04/13/2022).
6. Shurupov D.V. *Pochemu i kak zhivotnovodstvo vredit ekologii* [Why and how animal husbandry harms the environment] 14.09.2015 <http://ecobeing.ru/articles/livestock-farming-harms-ecology/>
7. Noskov S.I. *Tehnologiya modelirovaniya ob'ektov s nestabil'nym funkcionirovaniem i neopredelennost'ju v dannyh* [Modeling technology for objects with unstable operation and data uncertainty]. Irkutsk, RIC GP «Oblinformpechat» Publ., 1996. 321 p.
8. Noskov S.I., Bazilevskiy M.P. *Postroenie regressionnykh modeley s ispol'zovaniem apparata lineynno-bulevogo programmirovaniya* [Constructing regression models using the linear Boolean programming apparatus]. Irkutsk, IrGUPS, 2018. 176 p.
9. Noskov S.I. *Metod smeshannogo otsenivaniya parametrov lineynoy regressii: osobennosti primeneniya* [Method of mixed estimation of linear regression parameters: application features]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: system analysis and information technologies]. 2021, no. 1, pp. 126-132.
10. Noskov S.I., Perfileva K.S. *Modelirovanie ob"ema pogruzki na zheleznodorozhnom transporte metodom smeshannogo otsenivaniya* [Application of the mixed estimation method in modeling the loading volume in railway transport]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical sciences]. 2021, no. 2, pp. 148-153.
11. Bazilevskiy M.P., Noskov S.I. *Programmnyy kompleks postroeniya lineynoy regressionnoy modeli s uchetom kriteriya soglasovannosti povedeniya fakticheskoy i raschetnoy traektoriy izmeneniya znacheniy ob"yasnyayemoy peremennoy* [Program complex for linear regression model construction considering behavior consistency criterion of actual and calculated trajectories of explained variable value change]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [iPolytech Journal]. 2017, vol. 21, no. 9 (128), pp. 37-44.
12. Bazilevskiy M.P. *Svedenie zadachi otbora informativnykh regressorov pri otsenivanii lineynoy regressionnoy modeli po metodu naimen'shikh kvadratov k zadache chastichno-bulevogo lineynogo programmirovaniya* [Reduction the problem of selecting informative regressors when estimating a linear regression model by the method of least squares to the problem of partial-Boolean linear programming]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies]. 2018, vol. 6, no. 1 (20), pp. 108-117.
13. Bazilevskiy M.P. *Otbor informativnykh regressorov s uchetom mul'tikollinearnosti mezhdur nimi v regressionnykh modelyakh kak zadacha chastichno-bulevogo lineynogo programmirovaniya* [Subset selection in regression models with considering multicollinearity as a

task of mixed 0-1 integer linear programming]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies]. 2018, vol. 6, no. 2 (21), pp. 104-118.

14. Bazilevskiy M.P. *Otbor optimal'nogo chisla informativnykh regressorov po skorrektirovannomu koeffitsientu determinatsii v regressionnykh modelyakh kak zadacha chastichno tselochislennogo lineynogo programmirovaniya* [Selection an optimal number of variables in regression models using adjusted coefficient of determination as a mixed integer linear programming problem]. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya* [Applied Mathematics and Control Sciences]. 2020, no. 2, pp. 41-54.

15. Bazilevskiy M.P. *Otbor znachimyykh po kriteriyu St'yudenta informativnykh regressorov v otsenivaemykh s pomoshch'yu MNK regressionnykh modelyakh kak zadacha chastichno-bulevogo lineynogo programmirovaniya* [Selection of informative regressors significant by Student's t-test in regression models estimated using OLS as a partial Boolean linear programming problem]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: system analysis and information technologies]. 2021, no. 3, pp. 5-16.

16. Bazilevskiy M.P. *Sposob opredeleniya parametra M v zadache chastichno-bulevogo lineynogo programmirovaniya dlya otbora regressorov v lineynoy regressii* [Method for the M parameter determination in 0-1 mixed-integer linear programming problem for subset selection in linear regression]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University]. 2022, vol. 25, no. 2, pp. 62-66.

17. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhauchei sredy Rossiskoy Federatsii v 2020 gody* [On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2020. State report]. — Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2021. — 864 p.

18. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhauchei sredy Rossiskoy Federatsii v 2019 gody* [On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2019. State report]. - Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2020. — 1000 p.

19. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhauchei sredy Rossiskoy Federatsii v 2016 gody* [State report "On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2016"]. – Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; NIA-Nature. – 2017. – 760 p.

Информация об авторах

Михаил Павлович Базилевский – к. т. н., доцент, доцент кафедры «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: mik2178@yandex.ru

Аяна Батоевна Ойдопова – студентка 5 курса специальности «Эксплуатация железных дорог», факультета очного обучения Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «ИрГУПС», г. Чита, e-mail: aoydopova11@mail.ru

Authors

Mikhail Pavlovich Bazilevskiy – Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: mik2178@yandex.ru

Ayana Batoevna Oydopova – 5th year student of the specialty "Operation with railways", faculty of full-time study of the Zabaikasky institute of railway transport - branch of the Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: aoydopova11@mail.ru

Для цитирования

Базилевский М.П., Ойдопова А.Б. Моделирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Забайкальского края // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2022. – №2(14). – С.8-18 – DOI: 10.26731/2658-3704.2022.2(14).8-18 – Режим доступа: <http://ismm->

For citations

Bazilevskiy M.P., Oydopova A.B. Modeling of emissions of pollutants into the atmosphere of the Zabaikalsky kray // *Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2022. No. 2(14). P. 8-18. DOI: 10.26731/2658-3704.2022.2(14).8-18 [Accessed 24/06/22]