

С. В. Новикова, Ю. А. Тунакова, Р. А. Шагидуллина

НОРМИРОВАНИЕ СУПЕРЭКОТОКСИКАНТОВ В ОБЪЕКТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ СОВМЕСТНОГО ПОСТУПЛЕНИЯ В ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Ключевые слова: многомерные регрессионные нелинейные модели, металлы, нормирование.

Рассматриваются результаты моделирования содержания основных загрязняющих веществ (металлов) в волосах человека в зависимости от их содержания в объектах окружающей среды. На основании построенных моделей осуществлено нормирование содержания металлов в объектах окружающей среды с учетом поступления металлов в организм и воздушным, и водным путем.

Key words: multidimensionnonlinear regression models, metals, standardization.

Results of simulation of the level of priority pollutants (metals) in hair of people depending on their level in the environment are showed. On the basis of the constructed models implemented standardization level of metals in the environment, taking into account metal input into the body by the air and water at the same time.

Суперэкоотоксикантами называют вещества с высокой токсичностью, необычайной устойчивостью к действию внешних, внутренних и временных факторов, выраженной способностью сохранять токсичность в окружающей среде. Кроме того, они способны накапливаться в живых организмах с эффектом практически необратимого увеличения уровней содержания и связанных с их действием токсических эффектов, а также переходить из окружающей среды в живые организмы и биоаккумулироваться в трофических цепях [1]. Металлы относятся к приоритетным загрязняющим веществам, наблюдения за которыми обязательны во всех средах за счет их высокой токсичности для живых организмов в относительно низких концентрациях, а также способности к биоаккумуляции и биомagnификации. С учетом указанных свойств ряд исследователей относят металлы к суперэкоотоксикантам [2-5]. Металлы поступают в организм с водой, пищевыми продуктами, вдыхаемым воздухом. Опасность постоянного поступления металлов вызвана невозможностью их самостоятельной деградации и элиминации из организма [6].

Нормирование приоритетных загрязняющих веществ должно осуществляться на основании параметров состояния биологических объектов, а не по уровням абиотических факторов, которые рассматриваются только как агенты воздействия на биоту. Нами разработана методология нормирования, основой которой явились уровни накопления металлов в организме человека-основного защищаемого объекта на урбанизированной территории, по отношению к региональным нормативам содержания в биосредах населения.

Ранее нами строились регрессионные модели содержания металла в объекте окружающей среды - содержание металла в волосах и определялось нормативное содержание металла в объекте окружающей среды. Но таким образом не учитывались все основные пути поступления металлов в организм и, следовательно, не возможно установить нормативное поступление воздушным путем (водным путем), если с питьевой водой (вдыхаемым воздухом) также поступает определенное количество металлов в организм. Поэтому, путем построения

многомерной регрессионной модели зависимости содержания конкретного металла в волосах от его содержания в объектах окружающей среды и решив обратную задачу регрессии, можно определить нормативное содержание металла для конкретной территории, учитывающее суммарное поступление металла в организм различными путями.

Нами был проведен анализ количеств поступления металлов воздушным и водно-пищевым путем по материалам, изложенным в [7]. Было установлено, что для таких металлов как железо, медь и свинец характерен и воздушный и водно-пищевой пути поступления в организм с доминированием последнего. Для остальных металлов - значительно преобладает водно-пищевой путь поступления или воздушный путь поступления не оценивается.

Основой построения моделей явились результаты многолетних экспериментальных исследований содержания металлов в волосах детей, питьевой воде (характеристика водного пути поступления), снежном и почвенном покровах (характеристика воздушного пути поступления, ввиду пространственно-временных ограничений систематических наблюдений за содержанием металлов в атмосферном воздухе) на территории г. Казани. Для моделирования применялись нелинейные методы множественной регрессии на основе критерия наименьших квадратов. Представлены результаты исследований для трех приоритетных металлов: свинца, железа и меди.

На первом этапе исследовалось содержание свинца в организме человека (волосы) при воздушном (почва) и водном (питьевая вода) путях поступления в организм. На рис. 1 показан характер зависимости, полученный по результатам экспериментальных наблюдений.

Получена линейная регрессионная модель зависимости содержания свинца в волосах от содержания свинца в почве и питьевой воде (по методу наименьших квадратов):

$$Pb_v = 2,54880 + 36,69371 * Pb_{vod} + 0,03691 * Pb_p \quad (1)$$

Коэффициент множественной корреляции $R=0,1406$; коэффициент детерминации $R^2=0,01976$

(около 2% объясняемой дисперсии). Приведенные коэффициенты регрессии: $Pb_vod = 0,022928$; $Pb_p = 0,153831$.

Модель указывает на прямую зависимость содержания свинца в волосах от его содержания в питьевой воде, и в почве. Степень влияния изменчивости содержания свинца в почве в семь раз сильнее, чем в воде. Малые значения коэффициентов множественной корреляции и детерминации говорят о малой эффективности модели. В связи с этим возникает задача построения нелинейной множественной регрессионной модели.

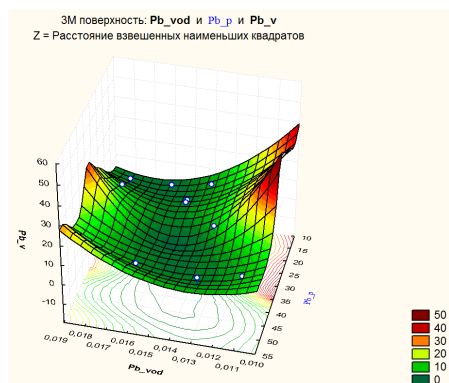


Рис. 1 - Поверхность рассеяния зависимости содержания свинца в волосах от его содержания в питьевой воде и почве

Затем была проведена серия экспериментов по моделированию нелинейной регрессионной модели зависимости Свинец в волосах – (Свинец в питьевой воде - Свинец в почве). Рассматривались полиномиальные модели:

квадратичная

$$Z = 55,49 - 7968 \cdot X + 0,61 \cdot Y + 264014 \cdot X^2 - 0,009 \cdot Y^2,$$

кубическая модель

$$Z = 39,81 - 4154 \cdot X + 0,32 \cdot Y - 6020931 \cdot X^3 - 0,0001 \cdot Y^3,$$

полиномы четвертой

$$Z = 32 - 2883,84 \cdot X + 0,23 \cdot Y + 203319032 \cdot X^4 - 0,000001 \cdot Y^4$$

и пятой степени

$$Z = 27,27 - 2252,84 \cdot X + 0,18 \cdot Y + 8144045245 \cdot X^5 - 2,39 \cdot Y^5;$$

а также параболическая

$$Z = 194,78 + 14809 \cdot X - 1,11 \cdot Y - 3627 \cdot \sqrt{X} + 11,99 \cdot \sqrt{Y},$$

логарифмическая

$$Z = -590,466 + 7190,986 \cdot X - 0,539 \cdot Y - 107,638 \cdot \ln(X) + 15,188 \cdot \ln(Y)$$

и гиперболическая

$$Z = -81,98 + 3361 \cdot X - 0,251 \cdot Y + 0,748 \cdot \frac{1}{X} - 178,273 \cdot \frac{1}{Y}$$

модели (здесь Z - содержание свинца в волосах Pb_v ; X - содержание свинца в питьевой воде Pb_vod ; Y - содержание свинца в почве Pb_p).

Полиномиальные модели продемонстрировали близкие между собой результаты (коэффициенты множественной корреляции порядка 0,47 и коэффициенты детерминации порядка 0,22), и позволили повысить коэффициент детерминации более чем в десять раз по сравнению с линейной моделью. При этом эффективными оказались только модели, включающие в себя максимальные степени независимых переменных (кроме линейных членов). Среди рас-

смотренных моделей наиболее адекватной следует считать квадратичную полиномиальную модель множественной регрессии с коэффициентом детерминации 0,235.

Эффективность построенных неполиномиальных моделей сравнима с эффективностью полиномиальных: максимальный коэффициент детерминации (0,236597) параболической модели не на много превосходит лучший результат для квадратичной полиномиальной модели (0,234906).

Далее была проведена серия экспериментов по построению множественных регрессионных моделей с различным составом нелинейных функций: кубическо- гиперболическая модель (к-т детерминации 0,231261)

$$Z = -6,04 - 1344,46 \cdot X + 0,12 \cdot Y + 3790787,98 \cdot X^3 -$$

$$- 0,000066 \cdot Y^3 + 0,28 \cdot \frac{1}{X} - 67,769 \cdot \frac{1}{Y}$$

квадратично-логарифмическая модель (к-т детерминации 0,235711)

$$Z = -284,97 + 125490,01 \cdot X^2 - 0,005 \cdot Y^2 - 56,6 \cdot \ln(X) + 8,16 \cdot \ln(Y)$$

квадратично-параболическая модель (к-т детерминации 0,236)

$$Z = 104,1 + 171775,11 \cdot X^2 - 0,006 \cdot Y^2 - 1269,67 \cdot \sqrt{X} + 4,27 \cdot \sqrt{Y}$$

логарифмическо-параболическая модель (к-т детерминации 0,231)

$$Z = -1329 - 208 \cdot \ln(X) + 29,25 \cdot \ln(Y) + 3417 \cdot \sqrt{X} - 11,17 \cdot \sqrt{Y}$$

Модели, содержащие три и более различных элементарных функции в своем составе, имели значение F-статистики меньше уровня значимости, что говорит об их заведомой неэффективности.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов нами установлено, что все нелинейные (полиномиальные, неполиномиальные и смешанные) модели показали примерно равную эффективность, однако наиболее адекватной следует считать параболическую нелинейную модель, позволившую достигнуть максимального значения коэффициента детерминации 0,236597:

$$Pb_v = 194,78 + 14809,24 \cdot Pb_vod - 1,11 \cdot Pb_p - 3627,04 \cdot \sqrt{Pb_vod} + 11,99 \cdot \sqrt{Pb_p} \quad (2)$$

На основании полученной наиболее адекватной модели установлены экологические нормативы содержания свинца в объектах окружающей среды. Региональный норматив содержания свинца в волосах составляет 10 мкг/г [8]. Установленное нами нормативное содержание свинца в почве составляет 27,5 мг/кг [9].

Таким образом, уравнение для определения максимального предельного уровня содержания свинца в питьевой воде принимает вид:

$$10 = 194,78 + 14809,24 \cdot Pb_vod - 1,11 \cdot 27,5 - 3627,04 \cdot \sqrt{Pb_vod} + 11,99 \cdot \sqrt{27,5} \quad (3)$$

Решение данного уравнения получено численно. Для решения применялся двухэтапный алгоритм определения интервалов графическим методом и уточнения корней методом Больцано. В результате получены два действительных положительных корня:

$Pb_{vod1} = 0,0110 \text{ мг/л}$, $Pb_{vod2} = 0,0200 \text{ мг/л}$.

Таким образом, согласно модели (2), содержание свинца в питьевой водопроводной воде не должно превышать значения 0,02 мг/л при условии, что свинец также поступает в организм и воздушным путем.

Далее исследовалось содержание железа в организме человека (волосы) при воздушном (снежный покров) и водном (питьевая вода) путях поступления в организм. На рис. 2 показан характер зависимости, полученный по результатам экспериментальных наблюдений.

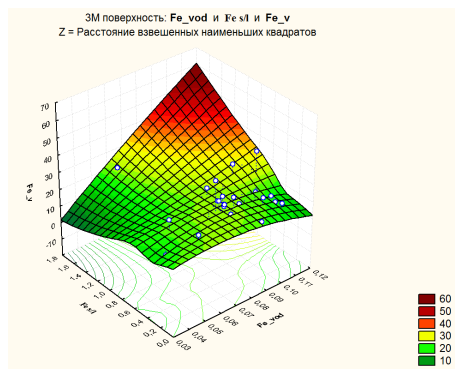


Рис. 2 - Поверхность рассеяния зависимости содержания железа в волосах от содержания в воде и снежном покрове

Поверхность рассеяния визуально указывают на прямо пропорциональную зависимость содержания железа в волосах от его содержания в питьевой воде и снежном покрове. Также предварительно можно оценить характер зависимости как нелинейный.

Для проверки гипотезы об отсутствии линейной связи между содержанием железа в волосах и его содержанием в питьевой воде и снеге (о нулевых значениях коэффициентов регрессии) использовалась F-статистика Фишера. Значение F-статистики = 0,65641 при уровне значимости $p < 0,52535$, т.е. гипотеза об отсутствии линейной связи отклоняется.

Нами получена линейная регрессионная модель зависимости содержания железа в волосах от содержания железа в снежном покрове и питьевой воде (по методу наименьших квадратов):

$$Fe_v = 18,9401 + 12,75608 * Fe_{vod} + 4,37879 * Fe_{sl} \quad (3)$$

Коэффициент множественной корреляции $R = 0,195$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,04$ (4% объясняемой дисперсии). Приведенные коэффициенты регрессии: $Fe_{vod} = 0,04$; $Fe_{sl} = 0,2$.

Таким образом, выявлено прямое влияние содержания железа в снежном покрове на накопление железа в волосах детей. Степень влияния изменчивости содержания железа в снежном покрове сильнее, чем в питьевой воде в пять раз. Малые значения коэффициентов множественной корреляции и детерминации говорят о малой эффективности модели. В связи с этим возникает задача построения не-

линейной множественной регрессионной модели. Была проведена серия экспериментов по моделированию нелинейной регрессионной модели зависимости Железо в волосах – (Железо в питьевой воде - Железо в снежном покрове). Сводные результаты приведены в табл. 1. (Z - Содержание железа в волосах (Fe_v); X - Содержание железа в питьевой воде (Fe_{vod}); Y - Содержание железа в снежном покрове (Fe_{sl})).

Таблица 1 - Результаты моделирования для железа

	Модель	Коэф-т детермина-
Квадратичная модель	$Z = 12,48 + 110,2 * X + 15,3 * Y - 688,58 * X^2 - 6,64 * Y^2$	0,071
Кубическая модель	$Z = 15,37 + 37,31 * X + 11,65 * Y - 2001,18 * X^3 - 2,84 * Y^3$	0,073
Полином четвертой степени	$Z = -60,8 + 3152,7 * X - 5,3 * Y - 31948,7 * X^2 + 838375,7 * X^4 + 18,4 * Y^2 - 5,6 * Y^4$	0,157
Полином пятой степени	$Z = -26 + 1295 * X + 0 * Y - 152968 * X^3 + 6812171 * X^5 + 14 * Y^3 - 5 * Y^5$	0,162
Параболическая	$Z = -12,531 - 310 * X - 8,685 * Y + 175,990 * \sqrt{X} + 21,004 * \sqrt{Y}$	0,064
Логарифмическая	$Z = 72,832 - 167,392 * X - 0,997 * Y + 13,4 * \ln(X) + 3,1 * \ln(Y)$	0,061
Показательная	$Z = 1298 + 1384 * X + 18,73 * Y - 1279 * e^X - 5,76 * e^Y$	0,073
Гиперболическая	$Z = 36,96 - 92,36 * X + 2,41 * Y - 0,57 \frac{1}{X} - 0,41 \frac{1}{Y}$	0,059
Полиномиально-параболическая модель третьей степени	$Z = -359,94 - 8176 * X + 35,93 * Y + 91118 * X^3 - 6,18 * Y^3 + 3512 * \sqrt{X} - 28,95 * \sqrt{Y}$	0,148
Полиномиально-параболическая модель пятой степени	$Z = -242 - 4772 * X + 25 * Y + 2624639 * X^5 - 2 * Y^5 + 2262 * \sqrt{X} - 20 * \sqrt{Y}$	0,156
Полиномиально-логарифмическая модель	$Z = 528 - 2352 * X + 16 * Y + 2294509 * X^5 - 1 * Y^5 + 132 * \ln(X) - 3 * \ln(Y)$	0,154
Полиномиально-гиперболическая модель	$Z = 166,2 - 1395,6 * X + 12,7 * Y + 276475,7 * X^4 - 2,3 * Y^4 - 4,0 * \frac{1}{X} + 0,3 * \frac{1}{Y}$	0,147

Полиномиальные модели позволили увеличить коэффициент детерминации до четырех раз по сравнению с линейной регрессионной моделью. Наиболее эффективной следует признать модель «полином пятой степени» с коэффициентом множественной корреляции 0,402374 и коэффициентом детерминации 0,161905. Также можно отметить, что все, за исключением квадратичной, полиномиальные модели оказались эффективными (имели значе-

ние F-статистики выше уровня значимости) при наличии нулевых коэффициентов в составе полинома (для кубической модели – квадратичные коэффициенты; для полинома четвертой степени – кубические; для полинома пятой степени – кубические и четвертой степени).

Смешанные модели, содержащие три и более различных элементарных функции в своем составе, имели значение F-статистики меньше уровня значимости, что говорит об их заведомой неэффективности. Все нелинейные смешанные модели имеют схожие характеристики (коэффициент множественной корреляции на уровне 0,38-0,4 и коэффициент детерминации на уровне 0,14-0,16). Наиболее эффективной моделью регрессии является полиномиально-параболическая модель пятой степени с коэффициентом детерминации 0,156. Однако максимальную множественную корреляцию и, как следствие, детерминацию, обеспечивает полиномиальная модель пятой степени, которую и следует использовать для нормирования содержания железа в объектах окружающей среды.

По результатам проведенных экспериментов наиболее эффективной оказалась нелинейная смешанная полиномиальная модель регрессии вида:

$$Fe_v = -26 + 1295 * Fe_{vod} - 15968 * Fe_{vod}^3 + 6812171 * Fe_{vod}^5 + 14 * Fe_{s/l} / l^3 - 5 * Fe_{s/l} / l^5 \quad (4)$$

с коэффициентом детерминации 0,16. Модель можно рекомендовать к использованию в целях нормирования содержания железа в окружающей среде.

Региональный норматив содержания железа в волосах составляет 55 мкг/г [8]. Полученное нами ранее нормативное содержание железа в питьевой воде составляет 0,56 мг/л [9].

Таким образом, уравнение для определения максимального предельного уровня содержания железа в снежном покрове принимает вид:

$$55 = -26 + 1295 * 0,56 + 152968 * 0,56^3 + 6812171 * 0,56^5 + 14 * Fe_{s/l} / l^3 - 5 * Fe_{s/l} / l^5 \quad (5)$$

Уравнение решалось численно в два этапа на основе преобразования уравнения (5) к задаче минимизации квадратичной функции: определение интервалов нахождения корней графическим методом, и уточнение корней методом Больцано. В результате получен единственный корень уравнения (5):

$$Fe_{s/l} = 9,357 \text{ мг/л,}$$

Следовательно, согласно модели (4), содержание железа в снежном покрове не должно превышать значения 9,357 мг/л при условии, что железо также поступает в организм с питьевой водой.

Высокое значение полученного показателя можно интерпретировать как слабое влияние содержания железа в снежном покрове на его накопление в волосах. Эту же позицию иллюстрируют абсолютные значения приведенных коэффициентов регрессии для полиномиально-параболической модели: $Fe_{vod} = 3,94778$; $Fe_{s/l} = 0,01735$.

Очевидно, что влияние поступления железа водным путем на его накопление в волосах более чем в 200 раз выше, чем влияние содержания железа в снежном покрове.

Далее исследовалось содержание меди в организме человека (волосы) при воздушном (снежный покров) и водном (питьевая вода) путях поступления в организм. На рис. 1 показан характер зависимости, полученный по результатам экспериментальных наблюдений.

Диаграмма и поверхность рассеяния визуально указывают на прямо пропорциональную зависимость содержания меди в волосах от ее содержания в питьевой воде и снежном покрове. Также предварительно можно оценить характер зависимости как нелинейный.

Для проверки гипотезы об отсутствии линейной связи между содержанием меди в волосах и его содержанием в питьевой воде и снеге (о нулевых значениях коэффициентов регрессии) использовалась F-статистика Фишера. Значение F-статистики = 1,9197 при уровне значимости $p < 0,15821$, т.е. гипотеза об отсутствии линейной связи отклоняется.

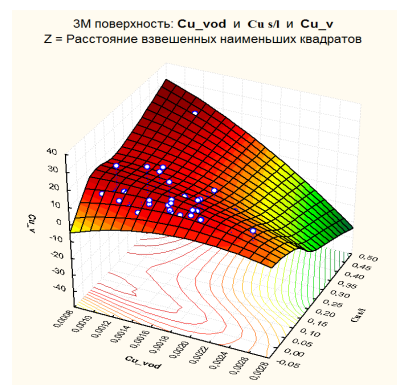


Рис. 3 - Поверхность рассеяния зависимости содержания меди в волосах от содержания в воде и снежном покрове

Была получена линейная регрессионная модель зависимости содержания меди в волосах от содержания меди в снежном покрове и питьевой воде (по методу наименьших квадратов).

$$Cu_v = 19,85 - 4408,27 * Cu_{vod} + 1,32 * Cu_{s/l} \quad (6)$$

Коэффициент множественной корреляции $R = 0,277555$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,077037$ (около 8% объясняемой дисперсии); Приведенные коэффициенты регрессии:

$$Cu_{vod} = -0,274142; Cu_{s/l} = 0,0178092.$$

Таким образом, нами установлено прямое влияние поступления меди воздушным путем на накопление меди в волосах детей. Степень влияния изменчивости содержания меди в питьевой воде на содержание меди в волосах отрицательная. Также малые значения коэффициентов множественной корреляции и детерминации говорят о малой эффективности модели. В связи с этим возникает задача построения нелинейной множественной регрессионной модели.

Была проведена серия экспериментов по моделированию нелинейной регрессионной модели зависимости Медь в волосах – (Медь в питьевой воде - Медь в снежном покрове). Сводные результаты

приведены в табл. 2. (Z- Содержание меди в волосах (Cu_v); X- содержание меди в питьевой воде

(Cu_vod); Y- Содержание меди в снежном покрове (Cu_s/l)).

Таблица 2 - Результаты моделирования для меди

	Модель	Коэф-т детерминации
Квадратичная модель	$Z=8+12060*X-26*Y-4946586*X^2-77*Y^2$	0,116
Кубическая модель	$Z=12+3488*X-18*Y-910344854*X^3+144*Y^3$	0,123
Полином четвертой степени	$Z=-45,673+96010,14*X+75,66*Y-4,22E+07*X^2+1,97E+12*X^4-69,02*Y^2+2186,72*Y^4$	0,177
Полином пятой степени	$Z=-38,4+80317,82*X+65,05*Y-3,21E+07*X^2+4,68E+14*X^5-465,13*Y^2+3985,8*Y^5$	0,177
Параболическая	$Z=-32,3-29878,5*X-70*Y++2236,2*\sqrt{X}+29,8*\sqrt{Y}$	0,121
Логарифмическая	$Z=203,3-17162,8*X-43,1*Y+55,6*\log(X)+4,2*\log(Y)$	0,128
Показательная	$Z=870,8-851*10^X-4,639*10^Y$	0,077
Гиперболическая	$Z=43,63-10281*X-26,54*Y-0,02\frac{1}{X}-0,03047\frac{1}{Y}$	0,130
Полиномиально-логарифмическая модель четвертой степени	$Z=382-32395*X-141*Y+1,015+11*X^4+8724*Y^4+105*\log(X)+11,72*\log(Y)$	0,205
Полиномиально-логарифмическая модель пятой степени	$Z=389,380286-32889*X-126*Y+4,01E+13*X^5+39131*Y^5+108*\log(X)+10,9*\log(Y)$	0,212
Полиномиально-гиперболическая модель	$Z=49,29-11170*X-57,59*Y-4,7E+12*X^5-0,024*Y^5-0,024*\frac{1}{X}-0,024*\frac{1}{Y}$	0,174
Полиномиально-параболическая модель	$Z=-99,80-72106*X-261,60*Y+6,49E+13*X^5+49416,88*Y^5+5434,97*\sqrt{X}+106,46*\sqrt{Y}$	0,226

Полиномиальные модели позволили увеличить коэффициент детерминации на порядок по сравнению с линейной регрессионной моделью. Наиболее эффективной следует признать модель «полином четвертой степени» с коэффициентом множественной корреляции 0,421484 и коэффициентом детерминации 0,177648. Также можно отметить, что все, за исключением квадратичной, полиномиальные модели оказались эффективными (имели значение F-статистики выше уровня значимости) при наличии нулевых коэффициентов в составе полинома (для кубической модели – квадратичные коэффициенты; для полинома четвертой степени – кубические; для полинома пятой степени – кубические и четвертой степени).

Однако полученные значения все же недостаточны для рекомендации полиномиальных моделей к практическому применению. К сожалению, неполиномиальные регрессионные модели не позволили повысить коэффициент детерминации. Поэтому было принято решение строить смешанные нелинейные регрессионные модели. В табл.4 приведены лишь модели, коэффициент детерминации которых превысил коэффициент детерминации полиномиальной модели четвертой степени (0,177).

Смешанные модели, содержащие три и более различных элементарных функции в своем составе, имели значение F-статистики меньше уровня значимости, что говорит об их заведомой неэффективности. Все 4 нелинейные смешанные модели имеют схожие характеристики (коэффициент множественной корреляции на уровне 0,41-0,47 и коэффициент детерминации на уровне 0,17-0,23). Наиболее эффективной моделью регрессии является полиномиально-параболическая модель. Именно эту модель можно рекомендовать для практического применения.

По результатам проведенных экспериментов наиболее эффективной оказалась нелинейная смешанная полиномиально-параболическая модель регрессии вида:

$$Cu_v = -99,81 - 72106,43 * Cu_vod - 261,60 * Cu_s/l + (6,5E+13) * Cu_vod^5 + 49416,9 * Cu_s/l^5 + 5434,97 * \sqrt{Cu_vod} + 106,5 * \sqrt{Cu_s/l} \quad (7)$$

с коэффициентами детерминации 0,226555. Модель можно рекомендовать к использованию в целях нормирования содержания меди в окружающей среде.

Региональный норматив содержания меди в волосах составил 25 мкг/г [8]. Нормативное содержание меди в снежном покрове, определенное нами, составило 0,154 мг/л [9].

Таким образом, уравнение для определения нормативного содержания меди в снежном покрове принимает вид:

$$25 = -99,81 - 72106,43 * Cu_vod - 261,60 * 0,154 + \\ + (6,5E + 13) * Cu_vod^5 + 49416,9 * 0,154^5 + \\ + 5434,97 * \sqrt{Cu_vod} + 106,5 * \sqrt{0,154} \quad (8)$$

Уравнение решалось численно в два этапа на основе преобразования уравнения (8) к задаче минимизации квадратичной функции: определение интервалов нахождения корней графическим методом, и уточнение корней методом Больцано. В результате получен единственный корень уравнения (7): $Cu_vod = 0,314$ мг/л.

Следовательно, согласно модели (8), содержание меди в питьевой воде не должно превышать значения 0,314 мг/л при условии, что медь также поступает в организм и воздушным путем.

Таким образом, нами установлены количественные характеристики межсредового распределения металлов в сопряженных факторах среды внешней и внутренней (снег - почва – питьевая вода – волосы человека) и получены научно обоснованные нормативы качества (содержания металлов в объектах окружающей среды), учитывающие совме-

стное поступление металлов в организм воздушным и водным путем.

Литература

1. Румак В.С., Умнова Н.В., Бродский Е.С., Шелепчиков А.А. / "Экология и жизнь", 8,12-15 (2012).
2. Мудрый И.В., Короленко Т.К., Никула Р.Г. и др. Лікарська справа, 5-6, С. 6-10 (2002).
3. Ю.П. Колмогоров, Г.А. Леонова, О.В. Сафронова, Л.П. Волкотруб, VII конф. «Аналитика Сибири и Дальнего Востока – 2004» (Новосибирск, 11-16 октября, 2004). 2004. С. 187.
4. Левич А. П., Булгаков Н. Г., Максимов В. Н. *Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга*. РЭФИА, Москва, 2004. 271 с.
5. Maximov V.N., Bulgakov N.G., and Levich A.P. *Environmental indices: Systems Analysis Approach*. London: EOL SS Publishers, 363-381(1999).
6. Тунакова Ю.А., Файзуллина Р.А., Шмакова Ю.А. *Вестник Казанского технологического университета*, 16, 12, 71-73(2012).
7. Скальный А.В. *Химические элементы в физиологии и экологии человека* М., Мир, 2004, 215 с.
8. Тунакова Ю.А., Шагидуллина Р.А., Валиев В.С. *Вестник Казанского технологического университета*, 16, 23, 147-151(2013).
9. Мальцев С.В., Валиев В.С., Зигангареева Г.Г. Валиев В.С., Ганеева Л.А. I Международный симпозиум «Современные проблемы геохимической экологии болезней» материалы и тез. докл. первого международного симпозиума (Чебоксары, 17-20 сент. 2001 г.) Чебоксары, 2001. С. 71.

© С. В. Новикова к.т.н., доц. каф. прикладной математики и информатики КНИТУ им. А.Н. Туполева-КАИ; Ю. А. Тунакова – д-р хим. наук, проф. каф. технологии пластических масс КНИТУ, juliaprof@mail.ru; Р. А. Шагидуллина – канд. хим. наук, нач. управления госуд. экологической экспертизы и нормирования воздействия на окружающую среду Мин-ва экологии и природных ресурсов РТ, Raisa.Shagidullina@tatar.ru.