

## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ В ФАКТОРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СНЕГОВОГО ПОКРОВА ГОРОДА ТОМСКА

Михальчук А.А.<sup>1</sup>, Язиков Е.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: aamih@tpu.ru

Проведен многомерный статистический (корреляционный, кластерный, факторный и дисперсионный) анализ результатов эколого-геохимических измерений твердого осадка снега города Томска (ЭГХИСТ). Выявлена высоко значимая корреляция между микроэлементами. Построена 4-факторная модель ЭГХИСТ, объясняющая  $\approx 84,5\%$  от общей дисперсии: {Cs–Rb– Sc} – фактор редких микроэлементов, {Cr–Sb– Fe} – фактор тяжелых металлов, {Co– Na} и {Ba– Ca} – факторы, смешанные из тяжелых металлов и макроэлементов. В 4-мерном факторном пространстве построена 6-кластерная модель 20 наблюдений, высокое качество которой по каждому фактору оценено  $F$ -критерием в рамках параметрического дисперсионного анализа (на уровне сильной значимости  $p < 0,005$ ) и подтверждено непараметрическим критерием Краскела-Уоллиса в смягченной форме (на уровне слабой значимости  $0,05 < p < 0,10$ ). Для каждого фактора на основании критериев множественных сравнений проведена классификация кластеров наблюдений в порядковой шкале стандартизированных факторных измерений. Результаты проведенного статистического анализа могут быть учтены в принятии управленческих решений и планировании градостроительных мероприятий на территории района города.

Ключевые слова: многомерный статистический (корреляционный, кластерный, факторный и дисперсионный) анализ, эколого-геохимическое измерение, микроэлементы и макроэлементы.

## CLUSTERING OBSERVATIONS IN FACTOR SPACE OF EKOLOGO-GEOCHEMICAL MEASUREMENTS OF THE SNOW COVER OF THE CITY OF TOMSK

Mihalchuk A.A.<sup>1</sup>, Yazikov E.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin's avenue, 30), e-mail: aamih@tpu.ru

It is spent many-dimensional statistical (correlative, cluster, factor and dispersing) the analysis of outcomes of ekologo-geochemical measurements of snow of a city of Tomsk (EGChMST). Highly significant correlation between microcells is revealed. 4 factor model EGChMST, explaining  $\approx 84,5\%$  % from the general variance is constructed: {Cs-Rb - Sc} - the factor of rare microcells, {Cr - Sb - Fe} - the factor of heavy metals, {Co - Na} and {Ba - Ca} - factors mixed from heavy metal and a macrocell. In 4 measured factor space 6 cluster model 20 observations which high quality under each factor is estimated by F-criterion within the limits of a parametrical analysis of variance (at level of the strong importance  $p < 0,005$ ) is constructed and is confirmed by nonparametric criterion of Kraskel-Willis in the softened form (at level of the weak importance  $0,05 < p < 0,10$ ). For each factor on the basis of criteria of plural comparisons classification of clusters of observations in an ordinal dial of the standardised factor measurements is spent. Outcomes of the spent statistical analysis can be considered in the organisation of local monitoring in ecologically unsuccessful areas.

Keywords: Many-dimensional statistical (correlative, cluster, factor and dispersing) the analysis, ekologo-geochemical measurement, microcells.

Проблемная экологическая ситуация наблюдается во многих городах России и зарубежных странах. Наиболее сильно техногенное геохимическое воздействие на природную среду и население проявляется в крупных промышленных центрах. Анализ ранее проведенных эколого-геохимических исследований твердого осадка снега и почв урбанизированных территорий в городах России и других стран показывает [5-10], что требуется анализ полученных результатов с использованием многомерного статистического анализа (МСА) для

получения наиболее объективной информации [1-4]. Данные результаты позволят наиболее корректно подходить к принятию управленческих решений.

В связи с этим представляет интерес статистический анализ результатов эколого-геохимических измерений в твердом осадке снега на территории Кировского района г. Томска (СНЕГ\_Т), где сосредоточены промышленные предприятия в селитебной зоне (табл. 1).

Таблица 1 - Содержание макро- и микроэлементов в твердом осадке снега на территории г. Томска (Na, Ca, Fe в %, остальные в мг/кг)

Данные: СНЕГ_Т															
	1 нп	2 Na	3 Ca	4 Fe	5 Co	6 Cr	7 Sc	8 Sb	9 Ba	10 Rb	11 Cs	12 Φ1	13 Φ2	14 Φ3	15 Φ4
1	пл.Южная	0,9	4,5	4,3	19	184	12	5,8	1500	100	4,2	0,03	0,05	0,23	0,68
2	Томск-1	0,8	5,2	4,9	22	126	15	5,5	1500	70	5,3	0,22	-0,15	0,36	1,33
3	трансagen.	0,8	4,8	5,2	22	120	14	5,8	1300	100	4,8	0,56	-0,07	0,18	0,77
4	мкр Зонал.	0,9	2,8	4,1	18	111	14	5	1300	90	5,3	0,65	-0,64	0,16	-0,00
5	мкр Зонал.	1	3,1	4	20	126	14	5,8	1200	80	4,1	-0,01	-0,42	0,65	0,24
6	Бот.сад	0,6	2,6	4,4	12	61	17	2,3	2400	90	5,9	0,80	-1,20	-1,36	1,23
7	Бот.сад	0,6	2	5,7	13	66	16	3,3	2500	100	6,3	1,09	-0,85	-1,51	1,00
8	"СЭМ"	0,52	3,94	9,6	19,9	265	10,6	10,9	717	154	5,8	1,85	1,87	-1,24	-0,68
9	"СЭМ"	0,51	0,02	10,5	17,3	255	8,9	15,2	685	53	3,3	-0,87	2,22	-1,56	-0,79
10	ТПУ-3	0,57	1,4	3,4	18,6	155	10,6	5,6	1010	90	4,8	0,44	-0,29	-0,71	-0,84
11	ТПУ_3	1,1	1,5	3,3	20,2	168	10,7	5	940	72	5,2	0,29	-0,51	1,00	-0,99
12	ТПУ_3	0,96	2	4,2	22,4	171	12,7	7,4	810	58	5,5	0,30	-0,04	0,89	-0,57
13	Лag.сад_3	0,73	1,8	3,7	18,4	145	13,2	4,2	660	62	6,2	0,85	-0,65	-0,03	-0,93
14	Лag.сад_4	0,86	1,4	1,9	8,2	69	7	5,1	460	37	2,6	-1,66	-1,44	-0,59	-1,14
15	ТПУ_4	0,64	1,1	2,4	10,5	132	6,7	9,9	740	39	2,8	-1,78	-0,38	-1,01	-0,80
16	ТЭЛЗ	0,81	4,7	3,4	19,1	131	10,7	8,1	2340	35	4	-1,70	-0,06	0,15	2,19
17	ГРЭС	0,89	1,8	6,2	17,4	220	8,8	7,3	620	38	2,6	-1,37	0,53	-0,02	-0,53
18	ТИЗ	1	1,9	3,7	27,8	164	13,1	10,1	900	70	5,5	0,44	0,29	1,47	-0,49
19	Кир.завод	1,3	2,1	3,5	22,2	129	11,3	8,5	770	86	4,8	0,26	-0,34	1,70	-0,92
20	ТЭМЗ	1	2,4	7,2	29,3	287	13,7	14,6	2070	63	4,9	-0,39	2,08	1,23	1,25

Наиболее значимыми по загрязнению территориями являются промышленные предприятия: СЭМ – «Сибэлектромотор», ТЭЛЗ – Томский электроламповый завод, ТИЗ – Томский инструментальный завод, Кир. завод – кирпичный завод, ТЭМЗ – Томский электро-механический завод и ГРЭС – городская районная электростанция. Кроме промышленных предприятий, на территории района расположены участки парковой зоны (Лag. сад – Лагерный сад), территория университета (ТПУ – Томский политехнический университет), жилые районы (мкр. Зональный – микрорайон Зональный) и экспериментального хозяйства Сибирского ботанического сада (Бот. сад). Опробование снегового покрова на территории района проведено по сетке. Получено 20 проб снега, из которых после определенной подготовки

выделен твердый осадок снега. Данная твердая фаза подвергалась инструментальному нейтронно-активационному анализу (ИНАА) в ядерно-геохимической лаборатории (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511901) кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ.

Корреляция между результатами содержаний двух химических элементов может приближенно характеризоваться коэффициентом парной корреляции Пирсона  $r$  (табл. 2).

Таблица 2 - Корреляционная матрица химических элементов СНЕГ\_Т

Корреляции (СНЕГ_Т) Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05000$ N=20 (Построчное удаление ПД)										
Перем	Na	Ca	Fe	Co	Cr	Sc	Sb	Ba	Rb	Cs
Na	1,000	0,075	-0,413	<b>0,489</b>	-0,015	0,046	-0,011	-0,140	-0,198	-0,041
Ca	0,075	1,000	-0,011	0,281	-0,106	0,430	-0,238	0,432	0,382	0,239
Fe	-0,413	-0,011	1,000	0,238	<b>0,698</b>	0,050	<b>0,593</b>	0,022	0,354	0,080
Co	<b>0,489</b>	0,281	0,238	1,000	<b>0,545</b>	0,326	0,430	0,033	0,170	0,355
Cr	-0,015	-0,106	<b>0,698</b>	<b>0,545</b>	1,000	-0,293	<b>0,797</b>	-0,276	0,074	-0,130
Sc	0,046	0,430	0,050	0,326	-0,293	1,000	-0,405	<b>0,658</b>	<b>0,445</b>	<b>0,785</b>
Sb	-0,011	-0,238	<b>0,593</b>	0,430	<b>0,797</b>	-0,405	1,000	-0,227	-0,151	-0,311
Ba	-0,140	0,432	0,022	0,033	-0,276	<b>0,658</b>	-0,227	1,000	0,150	0,376
Rb	-0,198	0,382	0,354	0,170	0,074	<b>0,445</b>	-0,151	0,150	1,000	<b>0,608</b>
Cs	-0,041	0,239	0,080	0,355	-0,130	<b>0,785</b>	-0,311	0,376	<b>0,608</b>	1,000

Результаты кластер-анализа СНЕГ\_Т изображены в виде дендрограммы (рис. 1), в которой по оси абсцисс располагаются символические обозначения химических элементов, а по оси ординат значение  $1 - r$ , соответствующее каждому иерархическому уровню группирования. Как следует из рис. 1, значимыми (на уровне значимости  $p < 0,10$ ) геохимическими ассоциациями элементов в снеговом покрове являются 4 составных кластера, которые отражают специфику производства промышленных предприятий:

{Sc–Cs–Rb} – ассоциация редких элементов,

{Cr– Sb– Fe} – ассоциация тяжелых металлов,

{Ba– Ca} – ассоциация тяжелого металла Ba с макроэлементом Ca,

{Co– Na} – ассоциация тяжелого металла Co с макроэлементом Na.

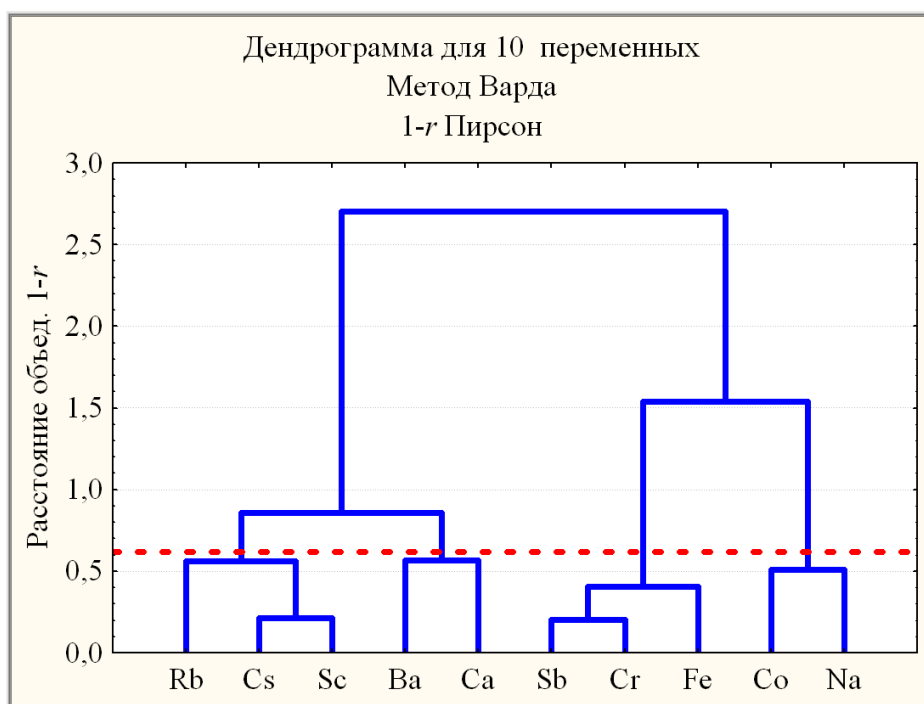


Рис. 1. Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра микроэлементов СНЕГ\_Г (пунктирная прямая критического уровня:  $1-r_{0,10} = 0,62$ ;  $n = 20$ )

Наличие корреляционной зависимости элементов допускает использование факторного анализа, основанного на оценках корреляций (факторных нагрузок) между исходными элементами и факторами, образованными группами корреляционно связанных исходных элементов. На основании факторного анализа проведено сокращение числа рассматриваемых элементов и определена структура взаимосвязей между элементами, т.е. классификация элементов. Самую важную информацию, на которой базируется интерпретация факторов, содержат факторные нагрузки, которые могут интерпретироваться как корреляции между факторами и переменными (табл. 3). Согласно табл. 3, высокие факторные нагрузки элементов распределились по факторам следующим образом.

Фактор Ф1 – фактор редких элементов {**Cs–Rb– Sc**}, связанных с Ф1 положительной корреляционной связью.

Фактор Ф2 – фактор тяжелых металлов {**Cr– Sb– Fe**}, связанных с Ф2 положительной корреляционной связью.

Фактор Ф3 – фактор смешанный {**Na– Co**} макроэлемента Na с тяжелым металлом Co, связанных с Ф3 положительной корреляционной связью.

Фактор Ф4 – фактор смешанный {**Ba– Ca**} тяжелого металла Ba с макроэлементом Ca, связанных с Ф4 положительной корреляционной связью.

Таблица 3 - Вращаемые факторные нагрузки в выбранной 4-факторной модели ЭГХИСТ

Перемен.	Фактор. нагрузки (Варим. исх.) (СНЕГ_Т Выделение: Главные компоненты (Отмечены нагрузки > ,670000)			
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Na	-0,106	-0,157	<b>0,922</b>	-0,080
Ca	0,232	-0,027	0,190	<b>0,690</b>
Fe	0,240	<b>0,844</b>	-0,343	0,066
Co	0,297	0,525	<b>0,742</b>	0,164
Cr	-0,024	<b>0,931</b>	0,134	-0,176
Sc	<b>0,673</b>	-0,182	0,146	0,592
Sb	-0,291	<b>0,880</b>	0,099	-0,129
Ba	0,141	-0,115	-0,120	<b>0,902</b>
Rb	<b>0,856</b>	0,138	-0,157	0,057
Cs	<b>0,889</b>	-0,096	0,109	0,212
Общ.дис.	2,292	2,729	1,654	1,773
Доля общ.	0,229	0,273	0,165	0,177

Для проведения дальнейшего статистического анализа ЭГХИСТ в рамках построенной 4-факторной модели вычислены значения наблюдений в новой системе факторных координат {Ф1, Ф2, Ф3, Ф4} (табл. 1).

В построенном 4-мерном факторном пространстве {Ф1, Ф2, Ф3, Ф4} проведена кластеризация наблюдений (рис. 2).

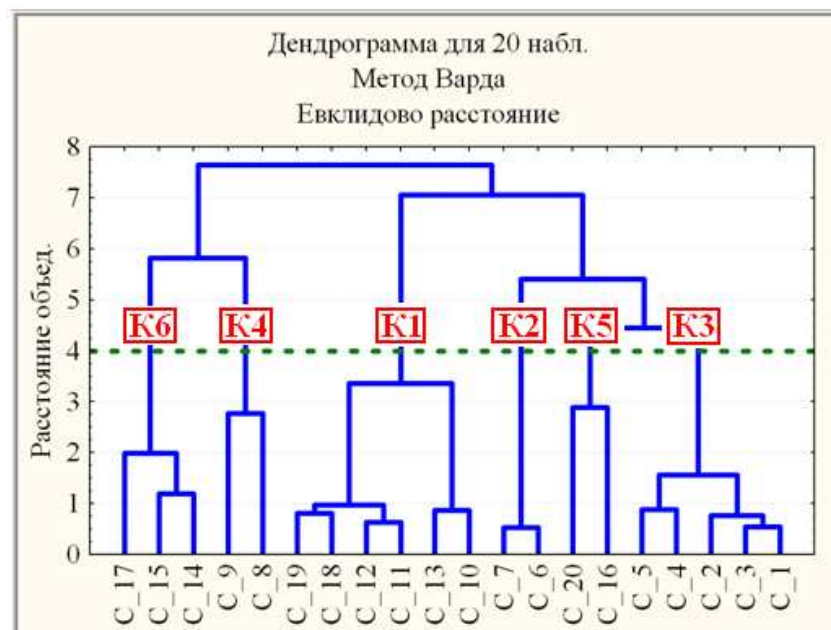


Рис. 2. Дендрограмма наблюдений в пространстве {Ф1, Ф2, Ф3, Ф4}

При этом в качестве меры близости выбрано расстояние Евклида, а в качестве правила объединения двух кластеров использован дисперсионный анализ, по сути метод Варда.

Методом древовидной кластеризации построено иерархическое дерево (рис. 2). В зависимости от выбора расстояния объединения можно получить соответствующее число кластеров. Так, например, расстоянию объединения, равному 4 (пунктирная горизонтальная прямая), соответствует 6 кластеров. Увеличивая расстояния объединения, можно отслеживать динамику объединения кластеров по мере уменьшения степени их однородности. В данном случае выделенные кластеры соответствуют как территориальному признаку, так и специфике производств промышленных предприятий. Из выделенных кластеров наиболее четко соответствуют территориальному признаку расположения: К1 – учебное заведение (ТПУ) и парковая зона (Луг. сад), К2 – экспериментальное хозяйство Сибирского ботанического сада и К3 – жилая застройка. Тогда как из кластеров, соответствующих специфике производства промышленных предприятий, следует выделить К4, характеризующий территорию промышленного предприятия «Сибэлектромотор», а К5 – Томский электромеханический и Томский электроламповый заводы. Для кластера К6 не наблюдается выше указанной особенности.

Наряду с методом древовидной кластеризации применяется также метод *K*-средних, проводящий классификацию объектов (наблюдений) по заданному количеству кластеров. Алгоритм метода *K*-средних, перемещая объекты в разные кластеры с целью минимизации изменчивости внутри кластеров и максимизации изменчивости между кластерами, оценивает качество кластеризации наблюдений по каждому фактору посредством параметрического дисперсионного анализа (табл. 4).

Таблица 4 - Результаты дисперсионного анализа кластеризации наблюдений по факторам ЭГХИСТ

перемен.	Дисперсионный анализ (СНЕГ_Т)					
	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. р
Φ1	13,688	5	5,312	14	7,214	<b>0,001562</b>
Φ2	13,749	5	5,251	14	7,332	<b>0,001448</b>
Φ3	13,472	5	5,528	14	6,824	<b>0,002023</b>
Φ4	17,056	5	1,944	14	24,564	<b>0,000002</b>

Признаком хорошей классификации является малость изменчивости внутри кластера в сравнении с изменчивостью вне кластера, что осуществляется путём стандартного межгруппового дисперсионного анализа для каждого фактора. Результаты дисперсионного анализа, приведенные в таблице 4, свидетельствуют о высоком качестве (на уровне значимости  $p < 0,005$ ) разбиения 20 наблюдений на 6 кластеров по каждому фактору. Графики факторных средних для каждого кластера приведены на рисунке 3.

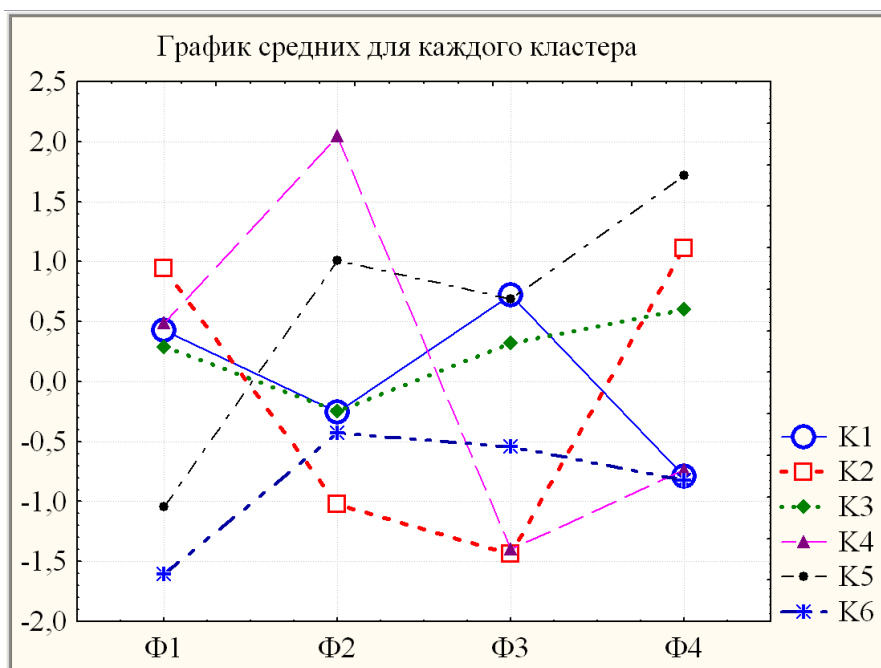


Рис. 3. Линейные графики факторных (стандартизированных) средних для каждого кластера

Полученные результаты кластеризации наблюдений методом  $K$ -средних в полной мере соответствуют иерархическому дереву (рис. 2), построенному методом древовидной кластеризации. В данном случае в качестве меры близости выбрано евклидово расстояние, а в качестве правила объединения двух кластеров использован метод Варда.

По критерию Фишера НЗР можно оформить результаты множественных сравнений кластерных средних для каждого фактора:

Ф1: {K2, K4, K1, K3}, {K5, K6} так, что K3 ( $m_{K3} \approx 0,29$ ) отличается от K5 ( $m_{K5} \approx -1,046$ ) статистически значимо (на уровне значимости  $p \approx 0,022$ ).

Ф2: {K4, K5}, {K3, K1, K6, K2} так, что K5 ( $m_{K5} \approx 1,01$ ) отличается от K3 ( $m_{K3} \approx -0,25$ ) статистически значимо (на уровне значимости  $p \approx 0,028$ ).

Ф3: {K1, K5, K3}, {K3, K6}, {K6, K4, K2} так, что K5 ( $m_{K5} \approx 0,67$ ) отличается от K6 ( $m_{K6} \approx -0,54$ ) слабо значимо (на уровне значимости  $p \approx 0,051$ ), а K3 ( $m_{K3} \approx 0,32$ ) отличается от K4 ( $m_{K4} \approx -1,40$ ) статистически значимо (на уровне значимости  $p \approx 0,006$ ).

Ф4: {K5, K2}, {K2, K3}, {K4, K1, K6} так, что K3 ( $m_{K3} \approx 0,60$ ) отличается сильно значимо (на уровне значимости  $0,0005 < p < 0,005$ ) как от K5 ( $m_{K5} \approx 1,72$ ), так и от K4 ( $m_{K4} \approx -0,74$ ).

Результаты кластерного анализа наблюдений по совокупности факторов с учетом результатов сравнений кластерных средних для каждого фактора позволяют провести классификацию наблюдений в порядковой шкале стандартизированных измерений, полагая в качестве уровня «Средний+» – стандартизированный интервал (0,0; +1,25) наблюдений, «Выше среднего» – ( $> +1,25$ ) наблюдений, «Средний–» – стандартизированный интервал (-1,25; -0,0) наблюдений, «Ниже среднего» – ( $< -1,5$ ).

Таблица 5 - Классификация наблюдений по совокупности факторов в порядковой шкале стандартизированных измерений

Клас- тер	Уровень кластера на фоне среднего по фактору				Состав кластера
	Ф1 {Cs-Rb- Sc}	Ф2 {Cr- Sb- Fe}	Ф3 {Na- Co}	Ф4 {Ba- Ca}	
К1	Средний+	Средний-	Средний+	Средний-	C_10-13,18,19
К2	Средний+	Средний-	Ниже среднего	Средний+	C_6, 7
К3	Средний+	Средний-	Средний+	Средний+	C_1-5
К4	Средний+	Выше среднего	Ниже среднего	Средний-	C_8, 9
К5	Средний-	Средний+	Средний+	Выше средне- го	C_16, 20
К6	Ниже среднего	Средний-	Средний-	Средний-	C_14, 15, 17

Для достоверности полученных результатов дисперсионного анализа необходимо проверить предположения о нормальном распределении сравниваемых кластеров и об однородности дисперсий в них. Но в данном случае достаточно замечания о малочисленности состава кластеров, чтобы обратиться к непараметрическому однофакторному дисперсионному анализу на основе критерия Краскела-Уоллиса, по которому 6 кластеров различаются слабо значимо в случае Ф2 (на уровне значимости  $p \approx 0,08$ ) и статистически значимо (на уровне значимости  $0,005 < p < 0,05$ ) в случае Ф1, Ф3 и Ф4. По критерию Краскела-Уоллиса результаты множественных сравнений кластерных средних для каждого фактора можно оформить в следующем виде:

Ф1: {К2, К4, К1, К3, К5}, { К4, К1, К3, К5, К6} так, что К2 отличается от К6 слабо значимо (на уровне значимости  $p \approx 0,07$ ).

Ф2: {К4, К5, К3, К1, К6}, { К5, К3, К1, К6, К2} так, что К4 отличается от К2 слабо значимо (на уровне значимости  $p \approx 0,08$ ).

Ф3: {К1, К5, К3, К6}, { К3, К6, К4, К2} так, что К1 отличается от К2 статистически значимо (на уровне значимости  $p \approx 0,046$ ).

Ф4: {К5, К2, К3}, { К2, К3, К4, К1, К6} так, что К5 отличается от К6 слабо значимо (на уровне значимости  $p \approx 0,08$ ).

Таким образом, непараметрический дисперсионный анализ подтверждает (в смягченной форме) результаты параметрического дисперсионного анализа (табл. 4) о значимой кластеризации наблюдений ЭГХИСТ. В силу расхождения результатов непараметрического и параметрического однофакторного дисперсионного анализа в связи с малочисленностью



состава кластеров более корректными признаются результаты непараметрического дисперсионного анализа.

Результаты исследований, приведенных в статье, согласуются с известными результатами исследований проведенного эколого-геохимического зонирования всей территории г. Томска по факту загрязнения компонентов природной среды и позволяют с учетом доказательной базы, основанной на результатах статистического анализа, провести управленческие решения. В данном случае рекомендуется в первую очередь вывод за пределы территории города промышленных предприятий – «Сибэлектромотор» и Томского инструментального завода.

### **Выводы**

1. Как следует из таблицы 2, в твердом осадке снега г. Томска наиболее значимые корреляционные связи в ассоциациях имеют две пары {Cs– Sc} и {Cr– Sb}. Для первой пары значимая корреляция трудно объяснима, тогда как для второй пары характерна специфика производства промышленного предприятия «Сибэлектромотор».
2. Построена 4-факторная модель ЭГХИСТ: Ф1 – фактор редких микроэлементов {Cs– Rb– Sc}, Ф2 – фактор тяжелых металлов {Cr– Sb– Fe}, Ф3 – фактор смешанный {Na– Co} макроэлемента Na с тяжелым металлом Co и Ф4 – фактор смешанный {Ba– Ca} тяжелого металла Ba с макроэлементом Ca, объясняющая  $\approx 84,5\%$  от общей дисперсии.
3. На основе 4-мерного факторного пространства {Ф1, Ф2, Ф3, Ф4} построена 6-кластерная модель наблюдений, высокое качество которой по каждому фактору оценено  $F$ -критерием в рамках параметрического дисперсионного анализа (на уровне сильной значимости  $p < 0,005$ ) и подтверждено непараметрическим критерием Краскела-Уоллиса в смягченной форме (на уровне слабой значимости  $0,05 < p < 0,10$ ). В данном случае наблюдается четко выраженная кластеризация от жилых районов менее загрязненных к территориям промышленных предприятий, где преимущественно сосредоточены повышенные концентрации тяжелых металлов.
4. Для каждого фактора на основании критериев множественных сравнений проведена классификация кластеров наблюдений в порядковой шкале стандартизированных факторных измерений. Например, по фактору тяжелых металлов Ф2 самый низкий уровень имеет кластер К2 (территория экспериментального Сибирского ботанического сада), затем уровень чуть выше, однородный с К2, имеют кластеры К6 (район Лагерного сада), К1 (район учебных корпусов университета) и К3 (жилой район), далее повышенный уровень, значимо отличающийся от К2, имеет К5 (заводы ТЭЛЗ и ТЭМЗ) и самый высокий уровень – у К4 (завод «Сибэлектромотор»).

## Список литературы

1. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с.
2. Бортникова С.Б., Рапута В.Ф., Девятова А.Ю., Юдахин Ф.Н. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий (на примере г. Новосибирска) // Геоэкология. - 2009. – № 6. – С. 515–525.
3. Михальчук А.А., Язиков Е.Г. Методы статистической обработки эколого-геохимических материалов в случае малых выборок / Современные методы эколого-геохимической оценки состояния и изменений окружающей среды : докл. Межд. школы. Новороссийск, 15–20 сентября 2003 г. / Научно-исследовательский институт Геохимии биосферы РГУ. – Новороссийск, 2003. – С. 163–179.
4. Михальчук А.А., Язиков Е.Г. Особенности применения статистического анализа при обработке материалов геоэкологических исследований в случае малых выборок // Вестник ТГУ. Проблемы геологии и географии Сибири. Приложение. – 2003. - № 3 (V), апрель. – С. 182–184.
5. Рапута В.Ф. Таловская А.В. Коковкин В.В., Язиков Е.Г. Анализ данных наблюдений аэрозольного загрязнения снегового покрова в окрестностях Томска и Северска / Институт оптики атмосферы и океана СО РАН // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 1. – С. 74–78.
6. Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С. Геохимия окружающей среды. – М. : Недра, 1990. – 335 с.
7. Таловская А.В., Язиков Е.Г., Панченко М.В., Козлов В.С. Мониторинг потоков аэрозольных выпадений в фоновых районах Томской области в зимний период 2006 и 2007 гг. / Институт оптики атмосферы и океана СО РАН // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – № 6. – С. 498–503.
8. Филимоненко Е.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Чумак Ю.В., Ильенко С.С. Минералогия пылевых аэрозолей в зоне воздействия промышленных предприятий г. Томска // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8-3. – С. 760–765.
9. Язиков Е.Г. Экогеохимия территорий Западной Сибири : монография / Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany. 2011. – 360 с.
10. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.

**Рецензенты:**

Трифонов А.Ю., д.ф.-м.н., профессор кафедры высшей математики и математической физики, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Савичев О.Г., д.г.н., профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.