

РЕГИОНАЛЬНЫЕ  
ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 911.2:550.4(470.64)

**ФАКТОРЫ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ  
В ПОЧВАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА**

© 2001 г. А. В. Хорошев

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Поступила в редакцию 06.11.1998 г.

На основе применения статистических методов предлагается методика снижения размерности геохимической системы регионального масштаба для исследования факторов дифференциации микроэлементов в почвах. Установлена чувствительность микроэлементов к каждому из основных факторов дифференциации: литогеохимическому фону, высотному поясу, генетическому горизонту.

Процессы, определяющие дифференциацию химических элементов в почвах, находятся в центре внимания геохимии ландшафтов. Ставятся задачи: объяснить причины, определяющие наблюдаемую концентрацию каждого элемента в конкретной ландшафтно-геохимической позиции, измерить параметры их концентраций и миграции в зависимости от широкого диапазона условий, предсказать их ожидаемые концентрации [7]. В данной работе предпринята попытка определить параметры, связывающие концентрации микроэлементов в почвах, с широким диапазоном ландшафтно-геохимических условий Центрального Кавказа. Определение этих параметров требует измерения вклада в распределение микроэлементов в почве исходной литогеохимической дифференциации и разнообразных ландшафтно-геохимических процессов, прежде всего биогенеза и гидрогенеза [3], интегральным отображением которых можно считать высотную поясность. В такой региональной постановке задачи создаются значительные методические трудности, так как требуется рассмотреть вклад в перераспределение микроэлементов в почве процессов как локального, так и регионального уровней. Ее решение возможно только с применением адекватных количественных методов анализа многомерных явлений. Для решения задачи, типичной для всех областей науки, разрабатывается широкий арсенал статистических методов [2]. Один из возможных подходов к ее решению при ландшафтно-геохимических исследованиях на равнинных территориях был продемонстрирован на примере анализа содержания микроэлементов в почвах Мордовии [5].

Применение количественных методов позволяет свести исходное многообразие факторов дифференциации к ограниченному набору переменных, с высокой достоверностью описывающих поведение групп микроэлементов с близкими геохимическими свойствами.

Полевые исследования, положенные в основу настоящего сообщения, проведены в летние сезоны 1992–1994 годов в верхней части бассейна р. Баксан (Центральный Кавказ) на абсолютных высотах 1000–3000 м. Они охватили ландшафты нескольких высотных поясов: горно-луговые, горно-лесные и горно-степные. Отбор образцов почв проводился в каждом высотном поясе, с максимально возможным охватом литогеохимических вариантов ландшафтов, с учетом положения в катене. В анализ включены 356 образцов горизонтов А1, А1В, ВС из 151 почвенного разреза, с примерно равным представительством горно-луговых, горно-лесных бурых, горно-лугово-степных, горно-степных, горно-каштановидных почв. Их мощность обычно не превышает 30–40 см, а количество генетических горизонтов до почвообразующей породы варьирует от 1 до 4. Определение валовых содержаний 25 микроэлементов и фосфора проводилось методом полуколичественного спектрального анализа в лаборатории Бронницкой геолого-геохимической экспедиции ИМГРЭ.

**Методы анализа данных.** В соответствии с поставленной задачей методы анализа должны обеспечить определение размерности исследуемой системы, т.е. определение числа факторов, достаточного для однозначного отображения положения всех ее элементов в многомерном пространстве; концентраций элементов при любом сочетании значений факторов (параметры концентраций); физического смысла факторов.

Результаты статистического анализа весьма чувствительны к распределению данных и к типу отношений элементов к факторам. Распределения концентраций элементов обычно близки к логнормальным [5] и при соответствующем преобразовании данных легко нормализуются. Однако низкая точность полуколичественного метода анализа может приводить к существенным иска-

жениям результатов, особенно для элементов с низкими средними концентрациями.

Подготовка исходных количественных данных к анализу заключалась в приближении их к нормальному распределению. Для этого они логарифмированы, стандартизованы и нормированы по чувствительности метода по формуле

$$Y = \log(y + s) - \log(s),$$

где  $y$  – измеренная концентрация, мг/кг,  $s$  – чувствительность метода, в данном случае – полуколичественного спектрального анализа [5].

С.пределение размерности осуществляется с помощью нескольких методов.

1. Метод кластерного анализа позволяет объединить элементы в классы по подобию их концентраций в образцах. Число классов с четко различимыми элементами определяет возможную размерность системы.

2. Размерность системы может быть приблизительно определена по числу взаимонезависимых элементов [8]. Очевидно, что для каждого из таких элементов должен существовать свой ведущий фактор, не зависимый от остальных.

3. Размерность может быть определена с помощью факторного анализа, в основе которого лежит корреляционная матрица всех элементов. Этот метод применим при строго линейных отношениях в системе.

Определение параметров, связывающих выявленные факторы с концентрациями, может быть получено методом многомерной пошаговой регрессии. Коэффициент детерминации  $R^2$  показывает полноту описания концентрации от рассматриваемого набора факторов, а коэффициенты при факторах являются параметрами в уравнении.

Определение физического смысла факторов осуществлялось с помощью дискриминантного анализа, находящего такую линейную комбинацию переменных, которая дает максимально возможное различие между заранее определенными группами наблюдений – состояниями независимо измеренных переменных [4]. В нашем случае это почвообразующая порода, высотный пояс, положение в катене, сложность почвенного профиля, генетический горизонт, щебнистость, глубина карбонатного горизонта, pH, уровень загрязнения.

**Результаты.** Строгое определение размерности системы по числу взаимонезависимых элементов с помощью статистики Кендалла-Стьюарта показало, что количество значимых факторов скорее всего не превышает трех, так как выявлено три абсолютно независимых друг от друга элемента – Pb, Zr, Mo. Каждый из них может рассматриваться как типичный по закономерностям дифференциации в почвах представитель целой

группы элементов. Анализ графика связи собственных чисел с порядковым номером факторов, рекомендуемый руководствами по статистическим методам [4], также показывает перегиб кривой при переходе от третьего к четвертому фактору (рис. 1). Суммарный вклад трех первых факторов в дисперсию составляет 41% (табл. 1), и, безусловно, они не могут описывать массив данных с исчерпывающей полнотой; однако дополнительные факторы могут отражать нелинейность отношений в системе или ошибки в измерениях. Выделенные факторы представляют собой линейные комбинации исходных переменных (содержаний микроэлементов в почвах) и могут быть отождествлены с какими-либо характеристиками ландшафта.

Для количественной оценки соотношения вкладов каждого фактора в дифференциацию содержаний рассчитаны коэффициенты детерминации, отражающие доли объясняемой фактором общей дисперсии, и факторные нагрузки, показывающие чувствительность элементов к факторам (см. табл. 1). Анализ таблицы позволяет утверждать, что дифференциация содержаний в одних случаях с достаточно высокой точностью описывается одним фактором (например, Cr, Cu, Ga – I фактор; Y, Zr, Nb – II фактор; Mo, W, Sn, B – III фактор), в других необходим учет двух примерно равносильных факторов (например, Co, Zn – I и III факторы), а в третьих – сложность поведения элемента в ландшафте не позволяет ограничиться даже тремя факторами (Ba, Sr, Mn, Ag, P). Сравнение полученных результатов с данными А.В. Кирюшина, Ю.Г. Пузаченко, Ю.К. Стульцева и А.А. Ямашкина [5] показывает, что суммарный вклад значимых факторов в объяснение дифференциации содержаний каждого элемента существенно ниже в горных ландшафтах, чем в равнинных, что объясняется большей сложностью геохимической структуры.

Интерпретация физического смысла выделенных факторов проводилась с применением дискриминантного анализа. Проверялась гипотеза о существовании геохимических различий по содержанию микроэлементов между грациями почвенных и ландшафтно-геохимических параметров, которые могут быть вероятными объяснениями факторов. Наиболее точно дискриминантные функции различают степень химического загрязнения (точность классификации 79%) и почвообразующие породы (точность 76%). С точностью 60–66% различаются степени щебнистости почв, генетический горизонт, положение ландшафта в катене и глубина карбонатного горизонта. С наименьшей точностью классифицируются наблюдения по принадлежности к высотному поясу и сложности почвенного профиля (50–51%). По уровням содержания микроэлементов оказались неразличимы горно-каштановидные почвы

под сухими степями и горно-степные почвы под типичными степями, горно-лугово-степные почвы под луговыми степями и горно-луговые почвы под вторичными среднегорными лугами. Отсутствуют геохимические различия между третьим и четвертым от поверхности горизонтами (обычно это горизонты В и ВС), а также между почвами трансаккумулятивных и супераккумулятивных ландшафтов. Это позволило уменьшить количество градаций и увеличить точность классификации наблюдений.

Методом пошаговой регрессии обнаружена множественность возможных интерпретаций каждого из трех факторов (табл. 2). Это может объясняться изначальной закоррелированностью выбранных параметров, что позволяет снизить их число без ущерба для содержания. Так, например, очевидны связи между глубиной карбонатного горизонта почв и высотным поясом, щебнистостью и составом почвообразующих пород. Таблица факторных нагрузок (табл. 1) дает количественную оценку чувствительности конкретных микроэлементов к выделенным факторам. Сопоставление деления элементов на группы, с одной стороны, методом кластерного анализа (рис. 2), с другой – по факторным нагрузкам доказывает некоторое родство элементов, для которых ведущим является I или III факторы. Так, для Sr, Ni, Co, Cu, Zn первое место по значимости занимает I фактор, а второе место – III, что сближает их с Mo, W, Bi, Mn, Ag, B – элементами с высокой чувствительностью к III фактору. Видимо, существуют некоторые условия, при которых перечисленные элементы ведут себя сходным образом, что и отражается объединением их в один кластер высокого порядка (см. рис. 2). При этом, однако, Pb, Ga, V, имеющие максимальные нагрузки по I фактору, но отрицательные по III, попадают в другой кластер, представленный в основном элементами, наиболее чувствительными ко II фактору. II фактор контролирует малоподвижные в большинстве геохимических обстановок [7] микроэлементы – Y, Zr, Nb, Li, Ge, Sn, Ti, Ba, Be – и определяет некоторые жесткие условия, в которых их поведение становится своеобразным.

Помимо констатации связи факторов с тем или иным параметром дискриминантный анализ позволяет представить взаиморасположение микроэлементов на прямой дискриминантной функции, связывающей концентрации со значениями того или иного параметра. Их близость или удаленность может наряду со значениями факторных нагрузок служить доказательством однонаправленности или разнонаправленности действия факторов на микроэлементы. Таким образом, среди ряда возможных интерпретаций каждого фактора выделяется наиболее вероятная.

Собственные числа факторов

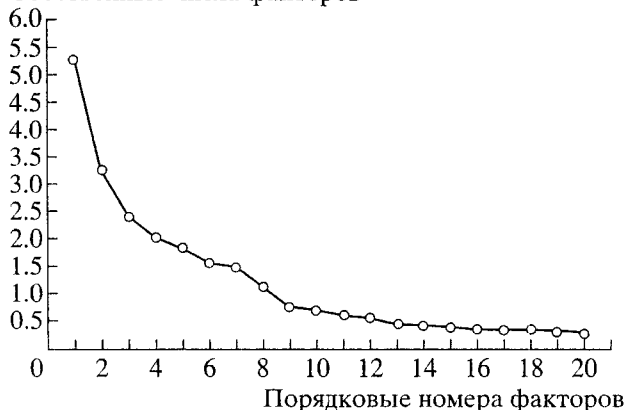


Рис. 1. Связь собственных чисел факторов дифференциации микроэлементов в почвах с порядковым номером фактора.

Дистанция

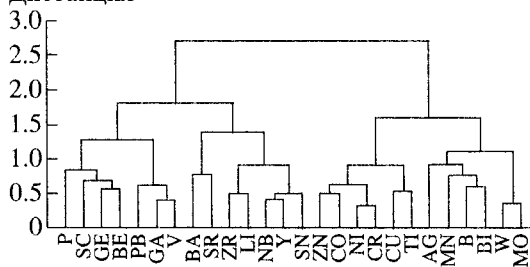


Рис. 2. Классификация микроэлементов по валовым содержаниям в почвах бассейна р. Баксан методом Варда по метрике Пирсона.

Уравнения дискриминантных функций, связывающих концентрации элементов с почвообразующими породами, отделяют Li, Sr, имеющие отрицательные нагрузки по I фактору, от Cu, Ni, V, Sc, P, B, имеющих положительные по знаку нагрузки, что доказывает особую чувствительность элементов, контролируемых I фактором, к составу почвообразующих пород, т.е. к литогеохимическому фону. Дискриминантные функции связи концентраций элементов с высотным поясом, глубиной карбонатного горизонта, сложностью почвенного профиля подтверждают связь с этими ландшафтно-геохимическими параметрами II фактора. При этом четко отделяются чувствительные ко II фактору Nb, Li, Be от B и Sc – элементов слабо с ним связанных.

Среди ряда возможных интерпретаций III фактора (см. табл. 2) следует выделить фактор генетического горизонта. Mo и B, несмотря на очень близкие факторные нагрузки по III фактору, разводятся на разные полюса дискриминантной функцией химического загрязнения, поэтому загрязнение не может служить причиной одновременного накопления и Mo, и B. Однако так как

Таблица 1. Чувствительность микроэлементов к трем ведущим факторам дифференциации в почвах

Элементы	Фактор					
	I		II		III	
	<i>a</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>
Mo	-0.03	0.00	-0.01	0.00	0.55	0.30
W	0.14	0.02	0.26	0.09	0.50	0.34
Bi	0.06	0.00	0.77	0.60	0.12	0.62
Sn	-0.06	0.00	0.09	0.01	0.75	0.58
Li	-0.17	0.03	0.55	0.33	0.23	0.38
Sr	-0.42	0.18	-0.03	0.18	-0.18	0.21
Ba	0.07	0.00	0.25	0.07	-0.35	0.19
Ti	0.33	0.11	-0.48	0.34	0.26	0.41
Mn	0.30	0.09	0.01	0.09	0.37	0.23
Cr	0.73	0.53	-0.08	0.54	0.30	0.63
V	0.69	0.48	0.16	0.51	-0.32	0.61
Ni	0.67	0.44	-0.24	0.51	0.37	0.64
Co	0.49	0.24	0.18	0.27	0.38	0.42
Cu	0.67	0.44	-0.31	0.54	0.11	0.56
Ag	0.01	0.00	0.16	0.02	0.31	0.12
Zn	0.51	0.27	0.26	0.33	0.46	0.55
Pb	0.55	0.30	0.19	0.34	-0.08	0.34
Be	0.27	0.07	0.48	0.30	0.22	0.35
Ga	0.68	0.47	0.25	0.53	-0.27	0.61
Ge	0.24	0.06	0.51	0.32	0.27	0.39
P	0.25	0.06	0.05	0.06	0.05	0.07
Sc	0.46	0.21	0.24	0.27	-0.05	0.27
Y	0.33	0.11	0.68	0.58	-0.13	0.60
Zr	-0.03	0.00	0.69	0.47	0.05	0.48
Nb	0.24	0.06	0.73	0.59	-0.03	0.59
B	0.30	0.09	-0.02	0.09	0.58	0.42
Прор.		16		14		11

*a* – факторные нагрузки; *r*<sup>2</sup> – накопленный коэффициент детерминации; Прор. – доля объясняемого варьирования, %.

химическое загрязнение обычно приурочено к поверхностным горизонтам почв, то, видимо, и В способен к поверхностной аккумуляции, но иного происхождения.

**Обсуждение результатов.** Проведенный анализ показал наличие двух групп параметров, управляющих дифференциацией микроэлементов в почвах Центрального Кавказа: литогеохимических и ландшафтно-геохимических. Разделение микроэлементов на две большие группы кластерным анализом, подтверждаемое результатами факторного анализа, по всей видимости, следует связывать со II фактором. Он различает результаты почвенных процессов, с одной стороны, в ландшафтах степных и мелколиственно-лесного

поясов, с другой – в ландшафтах хвойно-лесного и луговых поясов. Принципиальное различие этих ландшафтов заключается в степени увлажнения и, соответственно, в водном режиме почв. II фактор имеет наиболее высокие значения в ландшафтах с избыточным увлажнением, т.е. в луговых и лесных. Горно-луговые и горно-лесные бурые почвы отличаются активными процессами кислого выщелачивания, отсутствием карбонатного горизонта. Высокая степень закрепленности поверхности растительностью благоприятствует формированию развитого почвенного профиля с высокой степенью выветрелости почвообразующей породы, из которого вынесены наиболее подвижные элементы. Группа элементов, контролируемых II фактором – Sn, Li, Ba, Be, Ge, Y, Zr,

**Таблица 2.** Вероятность ошибочного определения связи факторов дифференциации микроэлементов в почвах Центрального Кавказа с почвенными и ландшафтно-геохимическими параметрами методом прямого выбора при  $F = 4$  ( $p$ -level)

Факторы	Параметры								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	0.66	0.029	0.211	0.128	0.032	0.090	0.001	0.000	0.005
II	0.000	0.002	0.785	0.000	0.943	0.112	0.000	0.000	0.000
III	0.014	0.000	0.000	0.019	0.000	0.000	0.070	0.000	0.001

Параметры: 1 – глубина карбонатного горизонта; 2 – степень химического загрязнения; 3 – щебнистость почвы; 4 – сложность почвенного профиля  $H = \sum p \log p$ , где  $p$  – доля генетического горизонта по мощности в почвенном профиле; 5 – положение ландшафта в геохимическом сопряжении; 6 – генетический горизонт; 7 – высотный пояс; 8 – почвообразующая порода; 9 – pH почв.

Nb – совпадает с набором элементов, которые, по данным А.Г. Назарова [6], при выветривании наиболее распространенных в высокогорье Центрального Кавказа пород – кристаллических сланцев – концентрируются в мелкоземе и не переходят в растворимые формы, а следовательно слабо мигрируют. Недифференцированное их распределение в почвенном профиле может нарушаться остаточным обогащением гумусовых горизонтов лишь при высокой степени выветрелости почвообразующей породы и лишь в хорошо развитых почвах со сложным профилем (значения меры сложности профиля  $H$  превышают 1.9). В то же время противоположная закономерность характерна для Ti, Cu, Ni – элементов, часть дисперсии которых также объясняется II фактором. Они накапливаются в горно-степных почвах при непромывном водном режиме и рассеиваются в горно-лесных и горно-луговых, где условия миграции благоприятны для выноса их из почвенного профиля. Это свидетельствует о значительной роли миграционных процессов в дифференциации содержания Cu, Ni. Труднообъяснимо нахождение в этой группе обычно малоподвижного Ti.

I и III факторы выделяют элементы более близкие друг к другу, чем к элементам, контролируемым II фактором. Это объясняется их общей более низкой чувствительностью к условиям увлажнения, что выражается в близких к нулю значениях нагрузок по II фактору. I фактор с очень высокой степенью достоверности чувствителен только к составу почвообразующих пород (табл. 2). Высокие положительные факторные нагрузки имеют элементы, накапливающиеся в метаморфических (протерозойские кристаллические сланцы), магматических интрузивных (палеозойские граниты) и осадочных терригенных (юрские песчаники и глинистые сланцы) породах и рассеивающиеся в осадочных биогенных (юрские известняки) и магматических эффузивных породах (плейстоценовые андезитодациты и туфы). К ним относятся Ti, Cr, V, Ni, Co, Cu, Zn, Pb, Sc, Ga. I фактор по сравнению со II и III объясняет также зна-

чительную долю дисперсии Sr, который имеет отрицательную факторную нагрузку, так как накапливается в магматических эффузивных породах. Различия концентраций, обусловленные ландшафтно-геохимическими процессами, менее значительны и не превосходят по амплитуде литогеохимические контрасты.

III фактор более сложен для интерпретации ввиду достоверности связей его со многими параметрами. Он очень четко выделяет с положительными нагрузками элементы, для которых характерно накопление в поверхностном горизонте почв. Причины же такого радиального распределения неодинаковы. Для Mo, W, Bi это осаждение на поверхности почвы из аэральных потоков рассеяния в результате деятельности Тырнаузского вольфрамо-молибденового комбината [1], что и объясняет высокую вероятность связи фактора с химическим загрязнением. Иная причина обуславливает высокие нагрузки по III фактору для Mn, Ag, B. Для них характерно биогенное (по крайней мере, для Mn и B) накопление в гумусовых горизонтах почв под березовыми лесами, что объясняет своеобразное положение этих элементов в классификации (рис. 2). Таким образом, литогеохимические и ландшафтно-геохимические различия концентраций элементов, контролируемых III фактором, маскируются ярко выраженной способностью к радиальному перераспределению с аккумуляцией в поверхностных горизонтах почв биогенным или аэральным путем. Отсутствие способности к поверхностной аккумуляции обуславливает отрицательные факторные нагрузки для V, Ba и Ga.

Таким образом, из трех значимых и независимых друг от друга факторов дифференциации содержания микроэлементов в почвах один связывается с исходным литогеохимическим фоном, а два других – с разнообразными ландшафтно-геохимическими процессами, приводящими к перераспределению вещества в почвенном профиле по сравнению с исходной породой. Роль ландшафтно-геохимических процессов в дифферен-

циации микроэлементов, особо чувствительных к литогеохимическому фону, видимо, может быть ведущей лишь в локальном масштабе, что требует постановки специальных крупномасштабных исследований на фациальном уровне.

**Выводы.** 1. Дифференциация микроэлементов в почвах бассейна р. Баксан описывается с высокой достоверностью в пространстве трех факторов.

2. Факторы, контролирующие распределение микроэлементов в почвах, могут быть интерпретированы следующим образом: I фактор – (контролирует Sr, Ti, Mn, Cr, V, Ni, Co, Cu, Zn, Pb, Ga, Sc) литогеохимический фон; II фактор (Sn, Li, Ba, Ti, Be, Ge, Y, Zr, Nb) – высотный пояс; III фактор (Mo, W, Bi, Ba, Mn, Co, Ag, Zn, B) – генетический горизонт. На дифференциацию большинства микроэлементов с разным весом и знаком влияют несколько факторов.

3. Дифференциация абсолютного большинства микроэлементов в почвах определяется исходными литогеохимическими различиями, ландшафтно-геохимические процессы играют подчиненную роль.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авессаломова И.А., Петрушина М.Н., Хорошев А.В. Экологическая оценка состояния пастбищ Центрального Кавказа // География и природные ресурсы. 1997. № 4. С. 183–186.
2. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С. и др. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 608 с.
3. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высш. шк., 1988. 328 с.
4. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. Т. 2. М.: Недра, 1990. 427 с.
5. Кирюшин А.В., Пузаченко Ю.Г., Стульцев Ю.К. и др. Многомерное отображение структуры региональных геохимических полей (факторный анализ) // Изв. РАН. Сер. геогр., 1996. № 4. С. 24–45.
6. Назаров А.Г. Геохимия высокогорных ландшафтов. М.: Наука, 1974. 200 с.
7. Перельман А.И. Геохимия ландшафта М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
8. Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С., Роговин К.А. Анализ пространственной структуры многовидовых сообществ животных // Общие проблемы биогеоценологии. М.: Наука, 1990. С. 55–100.

## Factors of Differentiation of Microelements in Soils of the Central Caucasus

A. V. Khoroshev

Moscow State University

The methodics of dimensionality reduction for the regional geochemical system based on statistical methods is applied for research of factors of differentiation of microelements in soils. Sensibility of microelements to each of the main factors of differentiation is defined, namely – to lithogeochemical background, altitudinal belt, genetic horizon.