

БИОГЕННОЕ НАКОПЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСТЕНИЯМИ В СУХОСТЕПНОЙ И ПОЛУПУСТЫННОЙ ЗОНАХ ЮГА РУССКОЙ РАВНИНЫ

Кудреватых И.Ю., Калинин П.И., Алексеев А.О.

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук,
г. Пущино, Российская Федерация, averkieva25@rambler.ru*

Исследовали степные и полупустынные ландшафты республики Калмыкия и Ростовской области (всего 12) в различных эколого-геохимических условиях (количество осадков, температура, засоление почв, положение в мезо- и макро- рельефе и т.п.). На выбранных участках отбирали образцы растительности и почвы, в которых измеряли P_2O_5 , MgO, Al_2O_3 , K_2O , CaO, TiO_2 , MnO, Fe_2O_3 , S, Sr, Ba, Zn и Ni рентгено-флуоресцентным методом. Для оценки поглощения и биогенной аккумуляции химических элементов растительностью рассчитывали коэффициент биологического поглощения (КБП). Для интерпретации и визуализации полученных данных использовали метод неметрического многомерного шкалирования. Выявлено, что в изученных растениях при варьировании экологических условий содержание элементов убывает в следующем ряду: Ca>Al>Fe>K>S>P>Mg>Ti>Mn>Sr>Ba>Zn>Ni. Наибольшее содержание Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Ba, Zn, Sr показано для растений рода Poaceae Barnhart, Ca, K, P, S – рода Artemisia L. Для изученных видов растений коэффициент биологического поглощения химических элементов >1 выявлен для S (1.1-12.7), Zn (0.2-6.5), K (0.1-3.9), Ca (0.1-3.5), Sr (0.1-3.0) и P (0.2-1.3).

Ключевые слова: химические элементы; степная растительность; полупустыня, коэффициент биологического поглощения

BIOGENIC ACCUMULATION OF CHEMICAL ELEMENTS BY PLANTS IN THE DRY-STEPPE AND SEMI-DUSTY ZONES OF THE SOUTH RUSSIAN PLAIN

Kudrevatykh I. Y., Kalinin P. I., Alekseev A. O.

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science Russian Academy of Sciences,
Pushchino, Russia Federation, averkieva25@rambler.ru*

The steppe and semi-desert landscapes of the Republic of Kalmykia and the Rostov Region (12 in total) in various ecological and geochemical conditions (rainfall, temperature, soil salinization, position in meso- and macro- relief, etc.) were studied. In selected areas samples of vegetation and soil were taken, in which P_2O_5 , MgO, Al_2O_3 , K_2O , CaO, TiO_2 , MnO, Fe_2O_3 , S, Sr, Ba, Zn and Ni by X-ray fluorescence were measured. To assess the absorption and biogenic accumulation of chemical elements by vegetation the coefficient of biological uptake (CBU) was calculated. For interpretation and visualization of the obtained data, the method of nonmetric multidimensional scaling was used. It was revealed that in the studied plants with varying environmental conditions the content of elements decreases in the following: Ca>Al>Fe>K>S>P>Mg>Ti>Mn>Sr>Ba>Zn>Ni. It is shown that, according to aggregate characteristics, the concentrations of the studied elements in vegetation reliably differ in the above-ground part of Poaceae Barnhart, the above-ground and underground part of Artemisia L. and the underground part of Poaceae Barnhart. The highest content of Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Ba, Zn, Sr were in plants of the Poaceae Barnhart, Ca, K, P, S — Artemisia L. For the studied plant species, the coefficient of biological uptake of chemical elements above 1 was at S (1.1-12.7), Zn (0.2-6.5), K (0.1-3.9), Ca (0.1-3.5), Sr (0.1-3.0) and P (0.2-1.3).

Key words: chemical elements; steppe vegetation; semi-desert; coefficient of biological uptake.

Современный этап развития биосферы характеризуется сильным антропогенным преобразованием и изменчивостью климата, что ведет к уменьшению доли природных систем в пространственной структуре ландшафтов [1, с. 90-97]. Сущность данного процесса состоит в уменьшении биологического и ландшафтного разнообразия, а также в понижении равновесия и устойчивости самих природных комплексов, которые отражаются в том числе на продуктивности самих биогеоценозов. Степные ландшафты по уровню самоорганизации и устойчивости из-за небольшого уровня накопления биомассы уступают многим другим природным зонам, что при изменении эколого-геохимических параметров приводит к нарушению и достаточно трудному

восстановлению их стационарного состояния. Реакция естественных экосистем, и в первую очередь их автотрофной части (фитоценозов), на изменение экологических условий, намного опережают накопление знаний о структуре растительного покрова и его ценотическом разнообразии. Однако прогнозирование тенденций изменения природных систем невозможно без знания о поведении растительного вещества в экосистемах различного динамического состояния.

Последние широкомасштабные биогеохимические исследования степных территорий проводились в 60-80 гг. прошлого века [2, с. 34-40; 3, с. 94-106]. В настоящее время геохимией степной растительности занимаются в основном с целью оценки аккумуляции в ней тяжёлых металлов [4., с. 450–465] и ее лекарственной значимости [5, с. 210–217]. Все это определяет отсутствие современных данных о роли растительности в круговороте основных макро и микроэлементов (не тяжелых металлов) в условиях степных и полупустынных ландшафтов. В этой связи данное исследование было нацелено на сравнительный анализ содержания и накопления химических элементов основными видами-эдфикаторами (родов *Artemisia* L. и *Roaseae* Barnhart) степных и полупустынных ландшафтов при сочетании различных эколого-геохимических условий.

Объекты и методы. Исследовали степные и полупустынные ландшафты республики Калмыкия и Ростовской области, $n = 12$. При выборе точек опробования для оценки вариативности содержания химических элементов и их аккумуляции в растительности степей и полупустынь старались максимально учесть факторы, определяющие их поглощение растительностью. Критериями выбора точек опробования стали: разность среднегодовой температуры, количество осадков, коэффициент биологической эффективности климата, положение в макро- и микрорельефе, тип почв и их физико-химические параметры (содержание карбонатов, рН, гранулометрический состав).

Полевые исследования проводили в июле 2011-2015 гг., которые включали отбор преобладающих видов растительности (виды родов *Artemisia* L. и *Roaseae* Barnhart) в период фенофазы плодоношения и почв из основного корнеобитаемого слоя (0-15 см, А1 до солонцового горизонта). Растения вместе с корневыми системами отбирали с площадок 20 см² вместе с почвой под ней. Все виды растений укладывали на пергаментную бумагу, поверхностное загрязнение образцов убирали щеткой с жесткой щетиной или влажной полотняной тканью и при воздушно-сухом состоянии измельчали в муку [6, с. 97-108]. Почвенные образцы высушивали на воздухе, доставляли в лабораторию, просеивали (ячейки 1 мм) и использовали для определения их химических и физических свойств.

В образцах растений и почвы измеряли концентрацию P_2O_5 , MgO, Al_2O_3 , K_2O , CaO, TiO_2 , MnO, Fe_2O_3 , S, Sr, Ba, Zn и Ni на рентгеновском аппарате «СПЕКТРОСКАН МАКС – GV» по методике измерения массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах методом рентгено-флуоресцентного анализа.

Для оценки биогенной аккумуляции химических элементов растительностью использовали коэффициент биологического поглощения (КБП), который представляет частное от деления количества элемента в золе растений на его количество в почве или горной породе [7, с. 36-37]. В нашем исследовании КБП рассчитан как отношение содержания химического элемента в растительности (без озоления пробы) к его содержанию в почве под ней.

Характер распределения элементов в растительности и особенности их накопления разными видами и составными частями изучали при помощи метода неметрического многомерного шкалирования (NMS). С целью интерпретации зависимостей между химическим составом изученной растительности и эколого-геохимическими условиями объектов исследования проводили анализ главных

компонент (Principal Component Analysis, PCA). Статистический анализ проводили в программной среде PCord 4.27 и Статистика 10.0.

Результаты и выводы. В изученных степных и полупустынных ландшафтах при варьировании экологических условий (количество осадков, температура, засоление почв, положение в мезо- и макрорельефе и т.п.) характерно достаточно высокое содержание в растениях как полыни, так и злаков Ca, Al, Fe и K. В разных типах исследованной растительности и их составных частей содержание других макроэлементов (S, P и Mg) в среднем было в 4-6 раз ниже. Среди микроэлементов самое высокое содержание в растительности показано для Ti и Mn (с минимумом в надземной и максимумом в подземной части злаков). Содержание Sr и Ba в изученной растительности было в среднем в 3 раза, Zn в 6 раз, а Ni в 10 раз ниже по сравнению с таковым Ti и Mn.

На основе метода неметрического многомерного шкалирования (NMS) был изучен характер накопления элементов надземной и подземной частями полыней и злаков. Показано, что по совокупным признакам концентрации изученных элементов в растительности выделяются 3 группы, достоверно отличающиеся друг от друга (106 значений): 1. надземная часть злаков 2. надземная и подземная часть полыней 3. подземная часть злаков. Это указывает на разность поглощения элементов растениями родов *Artemisia L.* и *Poaceae Barnhart*. Так полыни накапливают изученные элементы в равных количествах подземной и надземной частями, а аккумуляция элементов злаками идет по акропетальному типу (то есть элементы накапливаются в большей степени корневой системой).

Статистическим анализом так же были оценены стратегии накопления элементов подземной и надземной частями полыней и злаков ($n = 23, 26, 32$ и 25 соответственно). Выявлено, что накопление Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Ba, Zn, Sr в исследуемой растительности идет по стратегии 1: подземная часть злаков > подземная часть полыней > надземная часть полыней > надземная часть злаков; Ca, K, P, S по стратегии 2: надземная часть полыней > подземная часть полыней > подземная часть злаков > надземная часть злаков.

Для изученных видов растений КБП химических элементов можно расположить в ряд: S ($1.1-12.7$) > Zn ($0.2-6.5$) > K ($0.1-3.9$) > Ca ($0.1-3.5$) > Sr ($0.1-3.0$) > P ($0.2-1.3$). Наиболее низкие значения КБП (0-1.0) отмечены для Al, Fe, Mn, Ti, Mg и Ba. Выявлено, что КБП элементов S, Zn и K наиболее высокий у полыней, а Fe, Mn, Ti, Mg, Al и Ba – у злаков. Элементы P, Ca и Sr имеют одинаковые значения КБП для всех исследованных составных частей и видов растительности. На основе метода неметрического многомерного шкалирования показано, достоверных различий между группами: надземная и подземная части злаков и полыней не выявлено.

Взаимосвязь между содержанием элементов в изученной растительности и эколого-геохимическими условиями сухих степей и полупустынь была оценена анализом главных компонент. Вклад первого фактора (наиболее значимого) в общую дисперсию экспериментальных данных составил 44%, а второго – 18%. Показано, что факторы эколого-геохимических условий (температура, осадки, засоление почв, рельеф) не коррелируют с осями двух главных факторов. Элементы Zn, Fe, Mn, Al, Mg, Sr, Ba Ti характеризуются высокой корреляцией ($r = 0.72-0.97$) с осью первого фактора. Ось второго фактора значимо и отрицательно коррелирует ($r = -0.75-0.85$) с S, P и K. Отмечено, что вдоль оси первого фактора (увеличение содержания большинства элементов) распределяются точки подземной части злаков, а ось второго фактора составляют - надземная и подземная часть полыней, что согласуется и с данными NMS анализа. Следует отметить, что направление в сторону увеличения количества осадков совпадает с концентрацией точек надземной части злаков, а засоление почв - с содержанием Ca в растительности (однонаправленные процессы).

Первая и вторая оси анализа главных компонент для КБП элементов и эколого-геохимическими условиями изученных объектов исследования воспроизводят 41 и 20 % вариации экспериментальных данных. Наиболее высокий и значимый коэффициент корреляции с первой осью ($r = -0.88 - 0.93$) выявлен для элементов Mg, Al, Fe, Ti, Mn, Sr и Ba, с которой совпадает распределение точек подземной части злаков. Со второй осью коррелировали слабее, но значимо P, S и K. Зависимость между изученными эколого-геохимическими условиями и КБП растений анализ главных компонент не выявил.

Таким образом, выявлено, что не зависимо от варьирования экологических условий, в изученных растениях наибольшее содержание показано для Ca, Al, Fe и K. Полыни все изученные элементы накапливают в равных количествах подземной и надземной частями, а злаки - преимущественно корневой системой, что связано с неблагоприятными для их произрастания геохимическими условиями сухих степей (высокое засоление и засушливый режим увлажнения). Элементы Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Ba, Zn, Sr большее содержание показали в растениях рода *Poaceae* Barnhart, а Ca, K, P, S – рода *Artemisia* L, что определяется разной специализацией этих видов в поглощении элементов (катионная или анионная форма). В целом для растений исследуемой территории элементы разделились на аккумулирующиеся в растительности (КПБ>1) – S, Zn, K, Ca, Sr, P и слабо накапливающиеся (КПБ<1) - Al, Fe, Mn, Ti, Mg, Ba, что, с одной стороны, зависит от высокого содержания в почве P и S, а, с другой стороны, от интенсификации накопления анионогенных элементов в ландшафтах аридного и гумиаридного климата.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №№18-05-00869А, 18-04-00800А.

Библиографические ссылки

1. Гаврилкина С. В. Реакция пространственной структуры ландшафта высокогорного массива Монгун – Тайга (западная Тува) на изменение климата. Дисс. к.г.н. СПб, 2015. С. 102.
2. Родин Л. Е., Базилевич Н. И., Мирошниченко Ю. М. Продуктивность и биохимия полынных Средиземноморья. Проблемы биогеоценологии. М., 1973. С. 197-202.
3. Мордкович В. Г., Шатохина Н. Г., Титлянова А. А. Степные катены. Новосибирск: Наука. 1985. С. 118.
4. Уфимцева М. Д. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях. Геохимия. 2015. № 5. С. 450–465.
5. Sheded M. G., Pulford I. D., Hamed A. I. Presence of major and trace elements in seven medicinal plants growing in the South-Eastern Desert, Egypt // Journal of Arid Environments. 2006. № 66. P. 210–217.
6. Kalra Y. P., Maynard D. G. Methods manual for forest soil and plant analysis. Inf. Rep. NOR-X-319. Minister of Supply and Services Canada. 1991. p.116.
7. Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: "Высшая школа". 1966. С. 392.