

Биогенное накопление химических элементов растениями родов *Poaceae* Barnhart и *Artemisia* L. в сухостепной и полупустынной зонах юга Русской равнины

И. Ю. КУДРЕВАТЫХ, П. И. КАЛИНИН, А. О. АЛЕКСЕЕВ

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290, Пушкино, ул. Институтская, 2
E-mail: averkieva.irina@yandex.ru

Статья поступила 04.04.2018

После доработки 22.09.2018

Принята к печати 04.10.2018

АННОТАЦИЯ

Исследованы степные и полупустынные ландшафты Республики Калмыкия и Ростовской обл. (всего 12) в различных эколого-геохимических условиях (количество осадков, температура, засоление почв, положение в мезо- и макрорельефе и т. п.). На выбранных участках отбирали образцы растительности и почвы, в которых измеряли концентрацию P_2O_5 , MgO , Al_2O_3 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 , S , Sr , Ba , Zn и Ni рентгенофлуоресцентным методом. В почве дополнительно определяли органический углерод ($C_{орг}$), карбонат кальция ($CaCO_3$), pH и гранулометрический состав. Для оценки поглощения и биогенной аккумуляции химических элементов растительностью рассчитывали коэффициент биологического поглощения. 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: биогеохимия, химические элементы, степная растительность, полупустыня, коэффициент биологического поглощения.

Современный этап развития биосферы характеризуется сильным антропогенным преобразованием и изменчивостью климата, что ведет к уменьшению доли природных систем в пространственной структуре ландшафтов [Родин, Базилевич, 1965; Добровольский, 2009; Гаврилкина, 2015]. Сущность данного процесса состоит в уменьшении биологического и ландшафтного разнообразия, а также в понижении равновесия и устойчивости

природных комплексов, которые отражаются в том числе на продуктивности биогеоценозов [Варлыгин, Базилевич, 1992; Исаченко, 1997]. Степные ландшафты по уровню самоорганизации и устойчивости из-за небольшого уровня накопления биомассы уступают многим другим природным зонам [Базилевич, 1993], что при изменении эколого-геохимических параметров приводит к нарушению и достаточно трудному восстановлению их ста-

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

Последние широкомасштабные биогеохимические исследования степных территорий проводились в 1960–1980 гг. [Родин, Базилевич, 1965; Перельман, 1966; Родин и др., 1973; Богданов, 1978; Мордкович и др., 1985; Перельман, Касимов, 1999]. В настоящее время геохимией степной растительности занимаются в основном с целью оценки аккумуляции в ней тяжелых металлов [Rope et al., 1988; Уфимцева, 2015; Мырзабекова, 2016; Давыдова, 2017] и ее лекарственной значимости [Shededa et al., 2006; Игамбердиева, Осинская, 2010]. Все это определяет отсутствие современных данных о роли растительности в круговороте основных макро- и микроэлементов (нетяжелых металлов) в условиях степных и полупустынных ландшафтов.

Содержание химических элементов в растениях зависит от многих факторов, которые относятся к двум основным группам: условия среды (климат и ландшафтно-геохимические особенности) и видовая специфика аккумуляции элементов растениями [Уфимцева, 2015]. Биологические свойства растений, влияющие на их химический состав, отражают приспособительные реакции, выработанные в ходе эволюции, и для степей характеризуются адаптацией к засушливым, засоленным и карбонатным условиям среды [Родин и др., 1973]. Биогеохимические условия степных и полупустынных ландшафтов определяются щелочными условиями, что влияет на увеличение подвижности анионогенных элементов и элементов-комплексобразователей. Образование растворимых комплексных соединений гидролизатов повышает доступность растениями многих элементов и приводит к поглощению их корневыми системами. В связи с тем, что в условиях щелочной окислительной среды, в которых развиваются почвы сухостепной и пустынной зон, латеральная миграция в автономных ландшаф-

тах практически отсутствует, а поглощение элементов растительностью является основной движущей силой радиальной геохимической миграции [Перельман, Касимов, 2000; Добровольский, 2009; Калинин и др., 2018]. Микрорельеф степной территории определяет различия в водно-солевом режиме, что также отражается на геохимии растений [Крайнов, Швец, 1992]. Помимо этого аккумуляция химических элементов в различных органах растений имеет свои особенности в пределах одного фитоценоза и зависит от физиологических свойств видов, а также от химического состава почв (субстрата) [Мирошниченко, 2007]. В этой связи данное исследование нацелено на сравнительный анализ содержания и накопления химических элементов основными видами-эдификаторами (родов *Artemisia* L. и *Poaceae* Barnhart) степных и полупустынных ландшафтов при сочетании различных эколого-геохимических условий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследовали степные и полупустынные ландшафты Республики Калмыкия и Ростовской обл., $n = 12$ (рис. 1). 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 средней годовой температуры, количество осадков, коэффициент биологической эффективности климата, положение в макро- и микрорельефе, тип почв и их физико-химические параметры (содержание карбонатов, pH, гранулометрический состав) (табл. 1).

Полевые исследования проводили в июле 2011–2015 гг. Они включали отбор преобладающих видов растительности (виды родов *Artemisia* L. и *Poaceae* Barnhart) в период фазы плодоношения и почв из основного корнеобитаемого слоя (0–15 см, A1 до солонцового горизонта). Растения 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

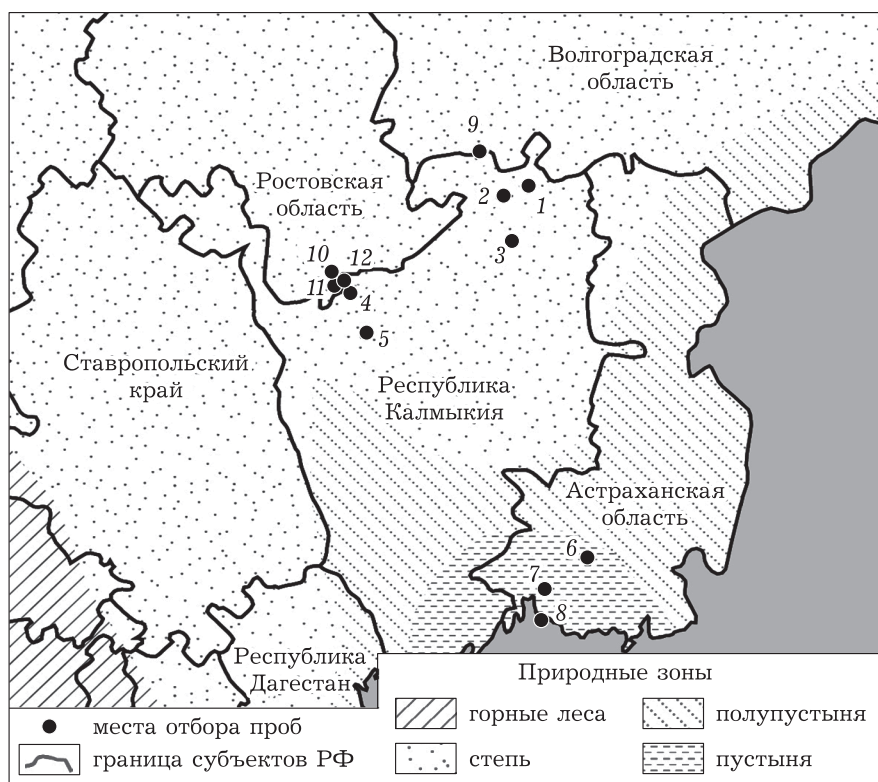


Рис. 1. Природные зоны юга Русской равнины и расположение в них объектов исследования

в муку (по методике [Karla, Maunard, 1991]). 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 их оксидов в порошковых пробах методом рентгенофлуоресцентного анализа. Содержание макроэлементов определяли расчетом их массовой доли из оксидов. Результаты по каждому определяемому элементу, полученные для образцов в двух повторностях, усредняли и проверяли на соответствие с допускаемыми расхождениями ($p = 0,95$), рассчитанными для каждого измеряемого элемента отдельно. При удовлетворительных результатах проверки среднеарифметическое значение принималось за результат измерения.

В исследуемых почвах дополнительно определяли гранулометрический состав (пи-

рофосфатным методом, ГОСТ 26483-85), pH водной вытяжки (потенциометрическим методом, ГОСТ 24104-80), содержание C_{org} по методу Тюрина (ГОСТ 23740-79), CO_3-Ca – ацидиметрическим методом (ГОСТ 26484-85).

Для оценки биогенной аккумуляции химических элементов растительностью применяется коэффициент биологического поглощения (КБП), который представляет частное от деления количества элемента в золе растений на величину его содержания в почве или горной породе [Перельман, 1966]. В данном исследовании КБП рассчитан как отношение количества 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). В его основу положен поиск и интерпретация “латентных (т. е. непосредственно не наблюдаемых) переменных”, дающих возможность пользователю объяснить сходство между объектами, задан-

Т а б л и ц а 1
Варьирование эколого-геохимических условий в изученных объектах (по данным [Ташинова Л. Н., Ташинова А. А., 2010],
<http://fr.climate-data.org/location/52369/> и результатам собственных измерений)

Климатический параметр			Положение в рельефе (позиция в ландшафте)		Почвенная характеристика			
Годовое количество осадков, мм	Средняя годовая температура, °С	Коэффициент увлажнения (по Иванову)	КБЭК*	макро-	микро-	Тип почв	рН	Физическая глина, % CO ₃ ⁻ Са, % Са, %
250–500	8,2–11,1	0,29–0,44	9,6–13,9	Элювиальная, транслювиальная, транслювиально-аккумулятивная и пераккумулятивная	Бугор, склон и низина	Светло-каштановые, бурые полупустынные несолонцеватые, солончаковые карбонатные, солончак средний, глубоко солончаковатый, сильно солонцеватые каштановые	6,2–7,8	27–40 0,25–4,25 0,64–8,4

* Коэффициент биологической эффективности климата.

ными точками в исходном пространстве признаков. На выходе алгоритма NMS получаются числовые значения координат, которые приписываются каждому объекту в некоторой новой системе координат, что позволяет интерпретировать и визуализировать данные. С целью интерпретации зависимостей между химическим составом изученной растительности и эколого-геохимическими условиями объектов исследования проводили анализ главных компонент (РСА), являющихся латентными (скрытыми) переменными, которые определяют распределение всех изученных параметров. Статистический анализ проводили в программной среде PCord 4.27 и Статистика 10.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изученных степных и полупустынных ландшафтов при варьировании экологических условий (количества осадков, температуры, засоления почв, положения в мезо- и макро-рельефе и т. п.) характерно достаточно высокое содержание в растениях как полыни, так и злаков Са, Al, Fe и К (табл. 2). В разных типах исследованной растительности и их составных частей содержание других макроэлементов (S, Р и Mg) в среднем оказалось в 4–6 раз ниже. Среди микроэлементов самое высокое содержание показано для Ti и Mn (с минимумом в надземной и максимумом в подземной частях 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) изучен характер накопления элементов надземной и подземной частями полыней и злаков (рис. 2). Показано, что по совокупным признакам концентрации изученных элементов в растительности выделяются три группы, достоверно отличающиеся друг от друга (106 значений): надземная часть злаков; надземная и подземная части полыней; 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 акропетально-

Т а б л и ц а 2
Содержание изученных элементов (размах / стандартное отклонение) в подземной и надземной частях растений родов *Artemisia* L. и *Poaeseae* Barnhart

Часть растения	Al	Ca	K	Fe	Mg	S	P	Mn	Ti	Zn	Ni	Sr	Ba
	мг/кг												
Росaceae Barnhart													
Надземная (n = 32)	0,02–2,0/ 0,3	0,2–1,3/ 0,5	0,1–2,0/ 0,7	0,02–0,9/ 0,14	0–0,31/ 0,05	0,04–0,3/ 0,08	116–1460/ 860	45–370/ 105	22–1412/ 197	13–62/ 30	1,3–29,5/ 9,0	8–166/ 36	21–166/ 47
	0,2–3,5/ 1,4	0,3–2,1/ 1,1	0,3–1,9/ 0,8	0,1–2,1/ 0,91	0–0,62/ 0,27	0,03–0,3/ 0,1	462–1781/ 794	61–761/ 345	142–3530/ 1321	24–103/ 54	6,8–128,3/ 33,5	19–200/ 95	35–329/ 149
Artemisia L.													
Надземная (n = 23)	0,04–1,3/ 0,2	0,3–2,8/ 1,0	0,4–3,3/ 1,6	0,03–0,8/ 0,14	0–0,52/ 0,12	0,08–0,4/ 0,2	646–3146/ 1607	52–221/ 102	40–987/ 187	21–84/ 37	0,7–25 / 8,5	23–283/ 75	15–107/ 36
	0,11–2,3/ 0,5	0,4–2,6/ 1,1	0,2–2,0/ 1,1	0,04–1,6/ 0,31	0–0,42/ 0,15	0,06–0,4/ 0,2	308–2708/ 1309	46–328/ 138	52–2245/ 414	21–78/ 45	1,7–33,4/ 10,9	19–149/ 78	13–229/ 64

му типу (т. е. элементы накапливаются в большей степени корневой системой).

Статистическим анализом также 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 (рис. 3); Ca, K, P, S по стратегии 2: надземная часть полыней > подземная часть полыней > подземная часть злаков > надземная часть злаков (рис. 4).

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 (табл. 3). 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. Методом неметрического многомерного шкалирования показано распределение КБП в надземной и подземной частях полыней и злаков (рис. 5). По совокупным признакам КБП изученных элементов не показал достоверных различий между надземной и подземной частями злаков и полыней.

Взаимосвязь между содержанием элементов в изученной растительности и эколого-геохимическими условиями сухих степей и полупустынь оценена анализом главных компонент. Вклад первого фактора (наиболее значимого) в общую дисперсию экспериментальных данных составил 44 %, а второго – 18 % (рис. 6). 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 – значимо и отрицательно коррелирует с S, P и K ($r = -0,75–0,85$). Отмечено, что вдоль оси первого фактора (увеличение содержания большинства элементов) распределяются точки подземной части злаков, а ось второго фактора составляют над-

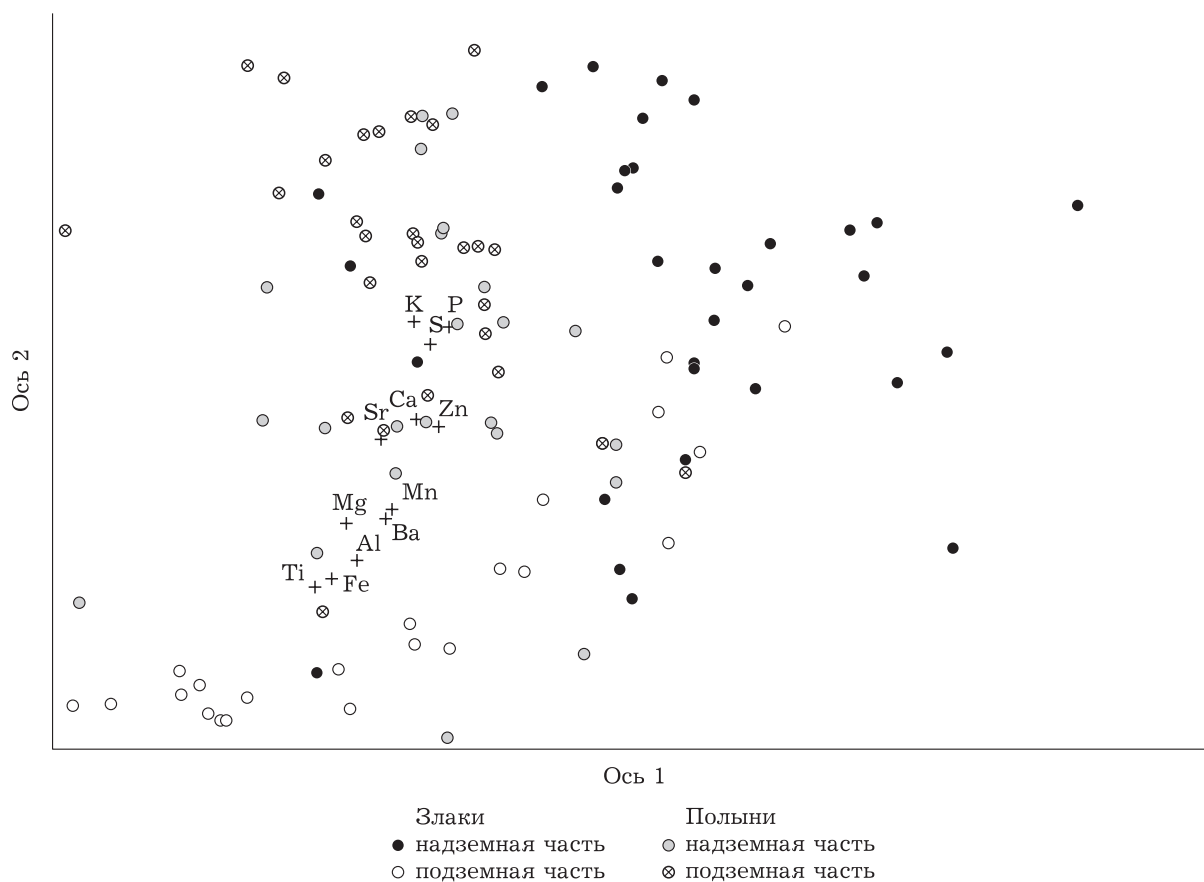


Рис. 2. Распределение групп растительности (надземная и подземная части полыней и злаков) в зависимости от содержания в них изученных элементов

земная и подземная части полыней, что согласуется и с данными НМС-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-геохимических условий изученных объектов исследования воспроизводят 41 и 20 % вариации экспериментальных данных (рис. 7). Наиболее высокий и значимый коэффициент корреляции с первой осью ($r = -0,88-0,93$), с которой совпадает распределение точек подземной части злаков, выявлен для элементов Mg, Al, Fe, Ti, Mn, Sr и Ba. 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.

ОБСУЖДЕНИЕ

Многочисленные исследования показали, что химический состав растений определяется большим набором факторов (в литературе их насчитывают до 100 и более). К основным из них можно отнести систематическое положение растения и экологические условия окружающей среды [Родин, Базилевич, 1965; Барбер, 1988]. В проведенном исследовании в растениях степей и полупустынь при варьировании экологических условий (количество осадков, температура, засоление почв, положение в мезо- и макрорельефе и т. п.) наибольшее содержание выявлено для Ca, Al, Fe, K, далее по убыванию диагностированы S, P, Mg, Ti, Mn, Sr, Ba, Zn, Ni, что согласуется с данными других исследований. Так, в степных сообществах Казахстана, Алтая и Стрелецкой степи (преобладали в напочвенном покрове *Stipa lessingiana*,

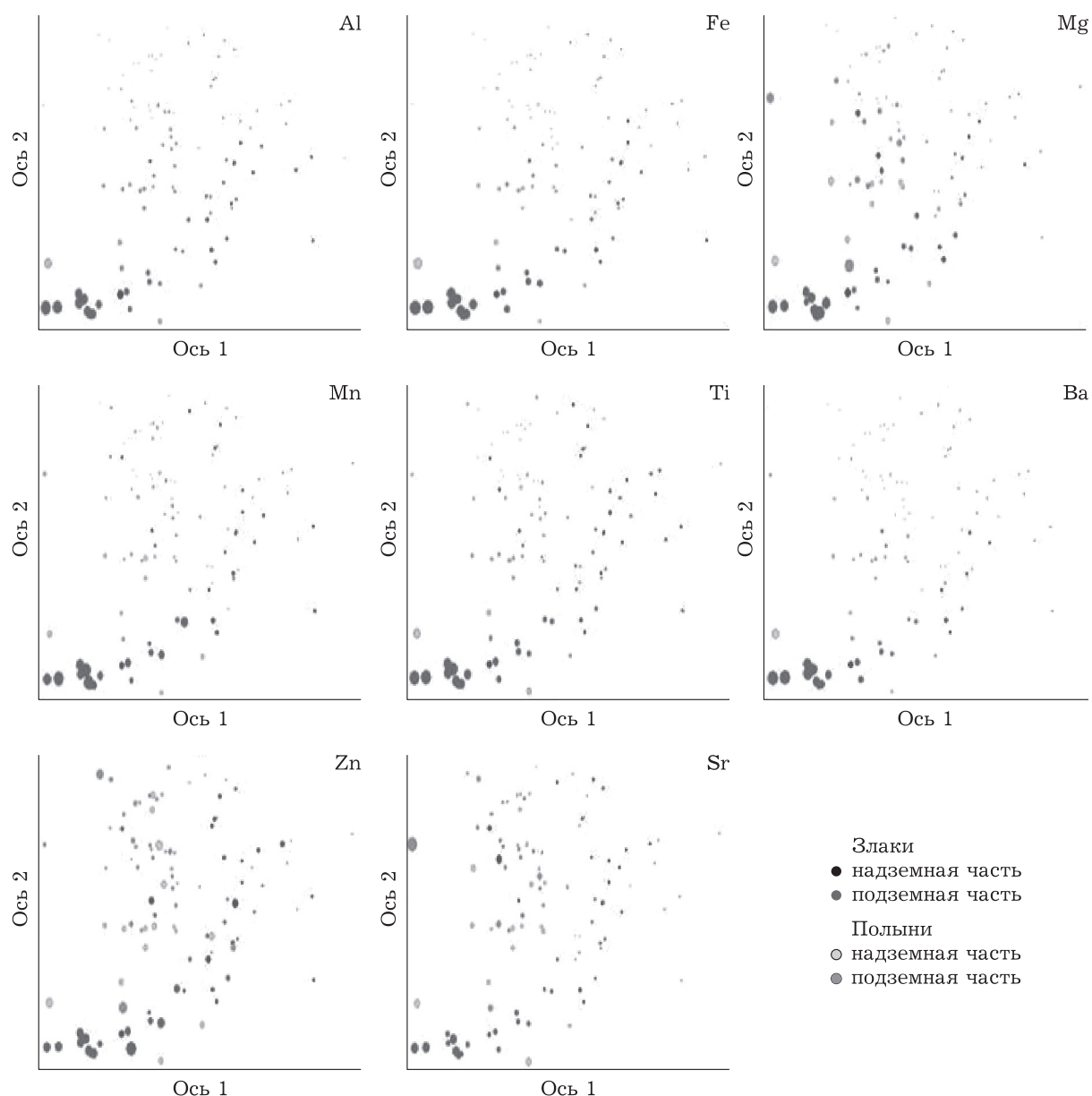


Рис. 3. Накопления элементов в растительности по стратегии 1 (размер пунсона прямо пропорционален значению концентрации элемента)

S. sareptana, *Festuca sulcata*) показан азотно-кремниевый тип накопления химических элементов со значительным участием в нем Са, К, Na, Mg [Мирошниченко, 2007]. Для степных участков Ферганской долины и Центральной Азии в органах растений наблюдалась аккумуляция наибольшего количества таких макро- и микроэлементов, как Na, Mg, К, Са, Mn, Zn, Fe, Sr, Ba [Игамбердиева, Осинская, 2010]. Как показали исследования равнинных луговых и злаково-карагановых сухих степей, на каменистых супесчаных

светло-каштановых почвах Западной Тувы в растениях отмечено высокое содержание основных макроэлементов: Р, К (в среднем 0,8 и 1,8 мг/кг соответственно) и некоторых микроэлементов: Са, Mn, Ni, Fe, Mg, Zn (1,1, 20, 8,1, 2325, 0,5, 9,9 мг/кг соответственно) [Ондар и др., 2014].

В исследовании показано, что Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Ba, Zn и Sr в изученной растительности больше накапливаются в подземной части злаков и полыней, а Са, К, Р и S – в надземной части полыней и подземной части

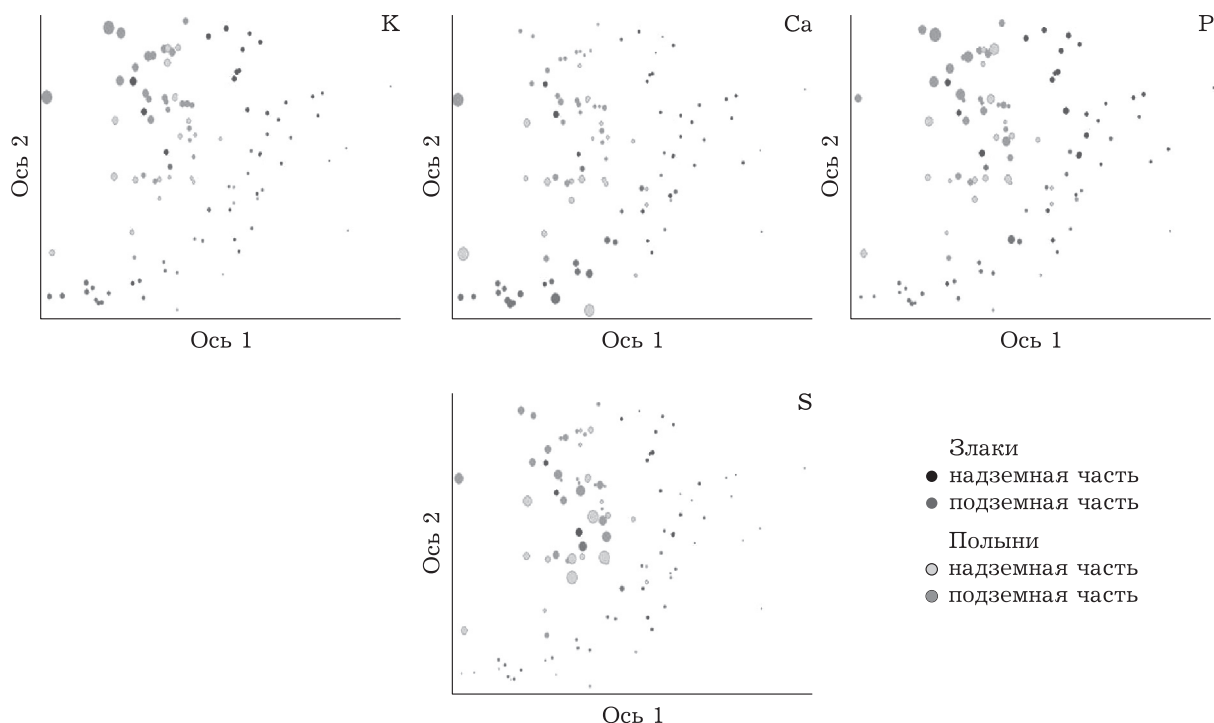


Рис. 4. Накопления элементов в растительности по стратегии 2 (размер пунсона прямо пропорционален значению концентрации элемента)

злаков. Однако другие исследования макро-элементного состава золы растений степных ландшафтов выявили, что Ca, Fe и Al преимущественно накапливаются в корнях, а K – в надземных органах [Базилевич, 1993]. Отмечено, что большое значение в накоплении элементов морфологическими частями растений имеет продолжительность их жизни (многолетники и однолетники). Установлено, что с возрастом в листьях все больше накапливаются Ca, S, Fe, Mn, а подвижные элементы P и K сильнее всего сконцентрированы в молодых частях [Безуглова, Орлов, 2000].

Данное исследование выявило, что Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Ba, Zn, Sr присутствуют преимущественно в подземной части растений рода *Poaceae* Barnhart. Видимо, данный факт объясняется тем, что растения этого вида относятся к переходной группе и в равной степени поглощают микроэлементы как в катионной, так и в анионной форме [Горчакова, 2013]. Для элементов Ca, K, P, S выявлено наибольшее концентрирование в полынях (надземная и подземная части). Растения рода *Artemisia* L. относятся к ариданитным видам и активнее поглощают аниогенные элементы, например P и S. Однако следует

отметить, что полыни, в отличие от злаков, проявляют экологическую пластичность в освоении разнообразных мест обитания, проявляющуюся в изменении морфологического строения листьев и корневой системы, что влияет на улучшение поглотительной способности [Очирова, 2010]. Экологические условия степей (средняя обеспеченность почв гумусом, достаточно высокое засоление и засушливый режим увлажнения) наиболее благоприятны для произрастания именно полынью, в то время как злаки в данных условиях быстро переходят из одной вегетативной стадии в другую и начинают увядать [Бакташева, 1983; Горчакова, 2013]. Отмечено, что анионофитные растения, характерные для ландшафтов аридного и гумиаридного климата, в связи с большим разнообразием ландшафтно-геохимических условий обладают более высокой емкостью биологического поглощения [Уфимцева, 2015].

В целом для растений исследуемой территории выявлено, что $KBP > 1$ отмечен у элементов $S_{(1,1-12,7)}$, $Zn_{(0,2-6,5)}$, $K_{(0,1-3,9)}$, $Ca_{(0,1-3,5)}$, $Sr_{(0,1-3,0)}$, $P_{(0,2-1,3)}$ и $KBP < 1$ – у $Al_{(0-0,31)}$, $Fe_{(0,01-0,56)}$, $Mn_{(0,01-0,46)}$, $Ti_{(0,01-0,46)}$, $Mg_{(0,05-0,9)}$ и $Ba_{(0,03-0,67)}$. Для степей Юго-Восточного За-

Т а б л и ц а 3
Коэффициент биологического поглощения изученных элементов в подземной и надземной частях полыней и злаков

Часть растения	Mg	Al	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba
<i>Poaceae</i> Barnhart												
Надземная (n = 32)	0-0,29/ 0,04	0-0,17/ 0,03	0,74-1,34/ 0,72	2,95-12,77/ 2,94	0,41-2,49/ 0,38	0,30-1,55/ 0,52	0,01-0,19/ 0,03	0,09-0,52/ 0,15	0,01-0,22/ 0,04	0,41-6,48/ 0,80	0,11-1,04/ 0,23	0,07-0,34/ 0,10
Подземная (n = 25)	0,04-0,53/ 0,23	0,03-0,31/ 0,13	0,72-1,61/ 0,72	2,94-17,59/ 3,97	0,38-0,81/ 0,34	0,52-2,15/ 1,03	0,03-0,46/ 0,17	0,15-0,90/ 0,41	0,04-0,56/ 0,24	0,80-4,18/ 1,07	0,23-1,25/ 0,55	0,10-0,67/ 0,30
<i>Artemisia</i> L.												
Надземная (n = 23)	0-1,27/ 0,14	0,01-0,11/ 0,03	0,61-2,73/ 1,31	1,17-14,88/ 6,66	0,29-3,97/ 0,86	0,18-3,57/ 0,98	0,01-0,13/ 0,03	0,05-1,00/ 0,18	0,01-0,21/ 0,05	0,30-7,29/ 1,06	0,13-3,08/ 0,51	0,03-0,21/ 0,08
Подземная (n=26)	0,00-0,64/ 0,15	0,01-0,19/ 0,06	0,22-3,44/ 1,22	1,90-16,8/ 7,68	0,14-2,55/ 0,60	0,19-2,56/ 1,11	0,01-0,27/ 0,06	0,05-0,47/ 0,19	0,01-0,33/ 0,09	0,27-6,05/ 1,10	0,11-1,56/ 0,49	0,03-0,43/ 0,14

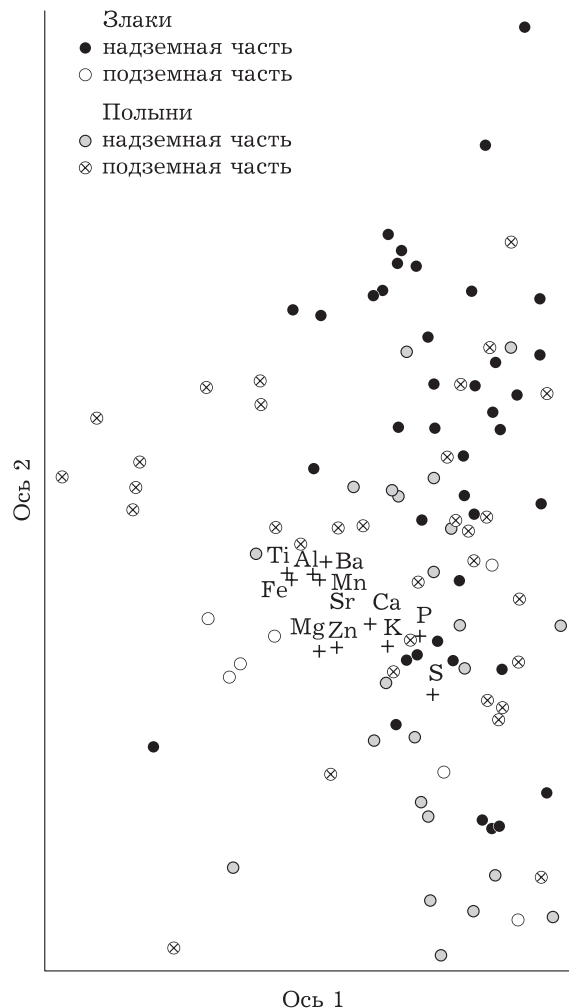


Рис. 5. Биологическое накопление изученных элементов в подземной и надземной частях растений родов *Artemisia* L. и *Poaceae* Barnhart

байкаля, расположенных в средней части Онон-Аргунского междуречья, получены аналогичные закономерности накопления большинства изученных элементов [Давыдова, 2017]. Так, показано, что $KBP > 1$ выявлен для P, K, Ca, Zn, Sr, $Mg_{(39,4-1,1)}$ и $KBP < 1$ – для Fe, Al, $Ti_{(0,02-0,8)}$. На примере степей Алтайского края определено, что наибольшей интенсивностью поглощения отличаются $Zn_{(0,2-6,5)} > K_{(0,1-3,9)} > Ca_{(0,1-3,5)} > Sr_{(0,1-3,0)} > P_{(0,2-1,3)}$ [Спицына и др., 2014]. В целом, если говорить о зависимости накопления элементов растительностью, то выделяют два их типа: один соответствует низкому содержанию элемента в почве и прямой пропорциональной зависимости, другой – высокому содержанию элемента в почве и обратно пропорциональной зависимости между содер-

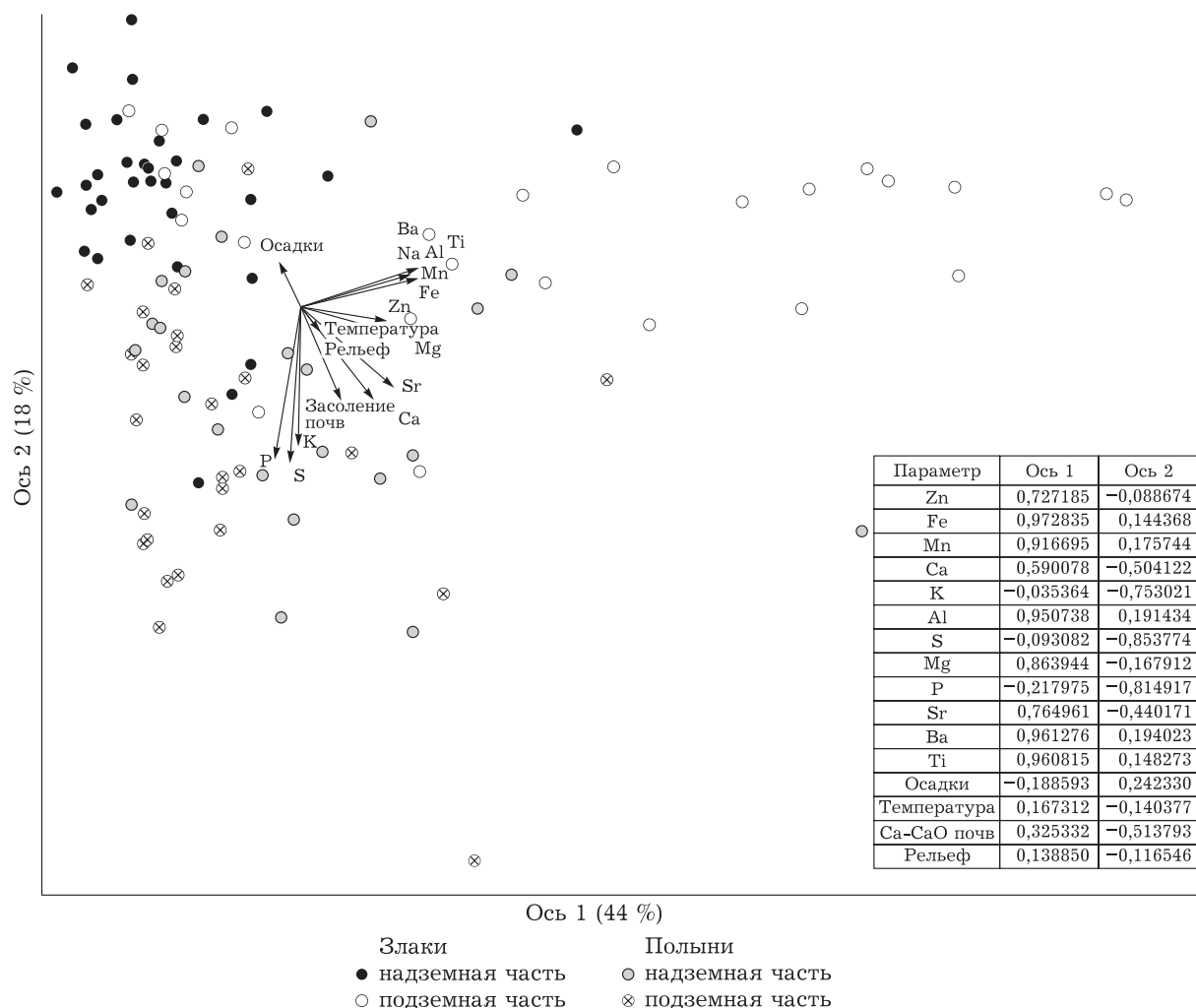


Рис. 6. Многофакторный анализ (метод PCA) взаимосвязи между содержанием химических элементов в растительности и эколого-геохимическими условиями объектов исследования

жанием элемента в почвах и растениях [Ковалевский, 1971]. На наш взгляд, преобладание биологического поглощения Р и S в исследованных степных ландшафтах, прежде всего, определяется их высоким содержанием в карбонатных горизонтах изученных почв (на глубине около 30 см) [Спицина и др., 2014]. Также это может быть связано с интенсификацией накопления анионогенных элементов, характерной для ландшафтов аридного и гумиаридного климата. Так, у злаков, принадлежащих к различным экобиоморфам, КБП Ti может варьировать от 0,34–0,5, а у полыней – от 8,3 до 13,5 [Уфимцева, 2015]. Для степей Омской обл. отмечают, что из микроэлементов слабее всего в биогенную миграцию включается Fe, промежуточное положение за-

нимает Mn и характеризуется как элемент слабого биологического поглощения [Азаренко, 2016], в то время как Cu и Zn поглощаются растениями очень интенсивно, несмотря на низкие концентрации их подвижных форм в почвах [Азаренко, 2013].

Корреляционных взаимосвязей между изученными эколого-геохимическими условиями, содержанием и накоплением (КБП) элементов изученными видами и морфологическими частями растений не выявлено. Однако следует отметить, что определенная взаимосвязь между накоплением химических элементов растительностью и климатическими параметрами все-таки существует. В частности, отмечается однонаправленное увеличение среднего годового количества осадков и со-

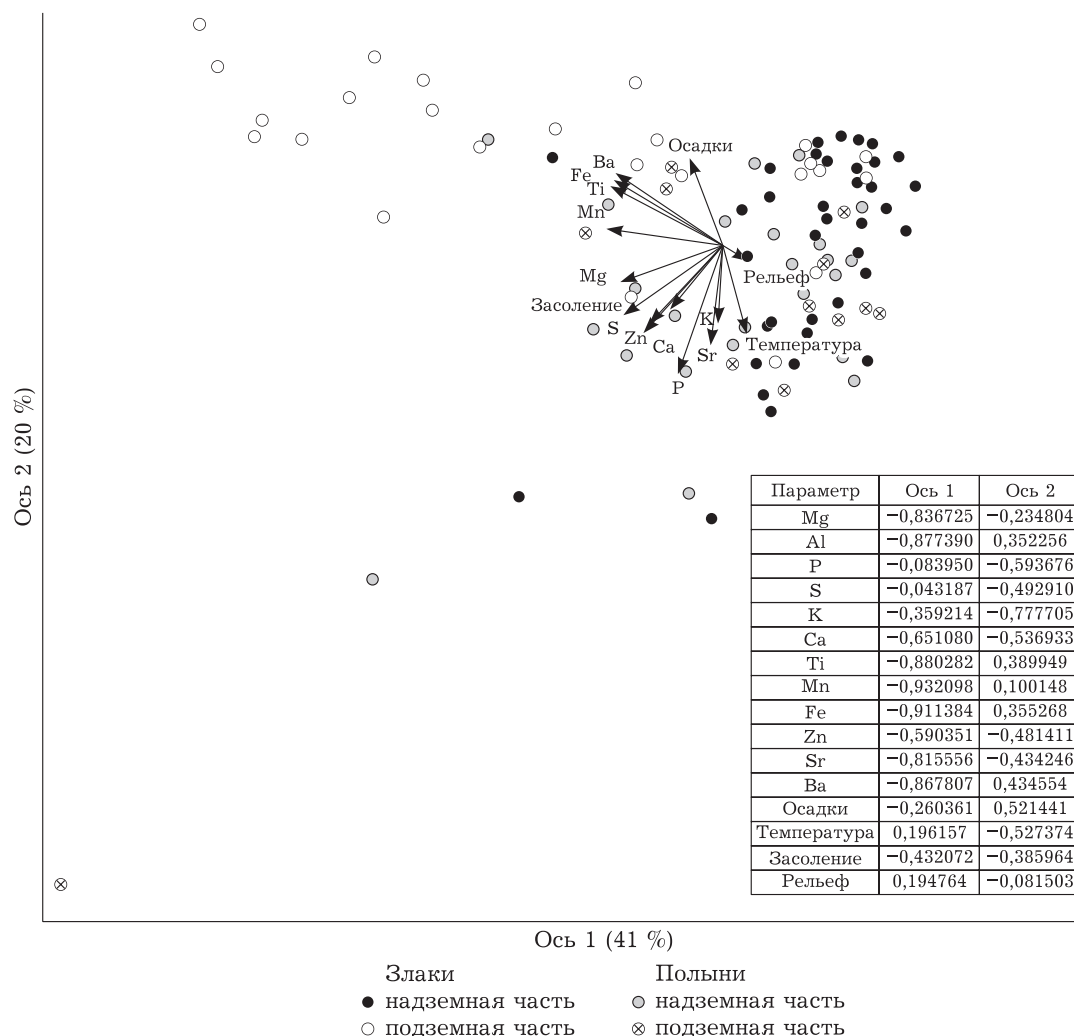


Рис. 7. Многофакторный анализ корреляционной зависимости между КБП изученных элементов и эколого-геохимическими условиями объектов исследования

держания Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Ba, Zn, Sr в надземных частях злаков. Также выявлено, что в более аридных условиях элементы накапливаются лучше в корнях растений, что связано с засолением почв в аридных ландшафтах. При увеличении увлажнения, когда легкорастворимые соли и карбонаты уходят ниже по профилю почв [Перельман, Касимов, 1999], для развития злаков создаются наиболее благоприятные условия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выявлено, что независимо 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 (КБП > 1) – S, Zn, K, Ca, Sr, P, и слабо накапливающиеся (КБП < 1) – Al, Fe, Mn, Ti,

Mg, Ba, что, с одной стороны, зависит от высокого содержания в почве Р и S, а с другой стороны, от интенсификации накопления аниогенных элементов в ландшафтах аридного и гумиаридного климата.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Азаренко Ю. А. Закономерности содержания, распределения, взаимосвязей микроэлементов в системе почва – растение в условиях юга Западной Сибири. Омск: Вариант – Омск, 2013. 232 с.
- Азаренко Ю. А. Содержание микроэлементов в растениях на почвах лесостепных и степных ландшафтов Омского Прииртышья // Вестн. ОмГАУ. 2016. № 4, ч. 24. С. 65–74.
- Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Бакташева Н. М. Флора Калмыцкой АССР и ее анализ: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1983. 20 с.
- Барбер С. А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механический подход / пер. с англ. Ю. Я. Мазеля. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
- Безуглова О. С., Орлов Д. С. Биогеохимия. Ростов н/Д: “Феникс”, 2000. 320 с.
- Богданов А. Ю. Химизм и энергия фитомассы основных сообществ песков Северного Прикаспия. М.: Наука, 1978. 128 с.
- Варлыгин Д. Л., Базилевич Н. И. Связи продукции зональных растительных формаций мира с некоторыми параметрами климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 1992. № 1. С. 23–32.
- Гаврилкина С. В. Реакция пространственной структуры ландшафта высокогорного массива Монгун – Тайга (Западная Тува) на изменение климата: дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2015. 102 с.
- Горчакова А. Ю. Кущение и ветвление злаков Мордовии. М.: Директ-Медиа, 2013. 116 с.
- Давыдова Н. Д. Трансформация аэротехногенных потоков веществ в степных ландшафтах // Геохимия ландшафтов / под ред. Н. С. Касимова, А. Н. Геннадиева. М.: АПР, 2017. 297–328.
- Добровольский В. В. Геохимия почв и ландшафтов // Избр. тр. М.: Научный мир, 2009. Т. II. 752 с.
- Игамбердиева П. К., Осинская Н. С. Исследование минерального комплекса вегетативной части *Stevia rebaudiana* и *Artemisia scoparia* Waldst et Kit. // Химия раст. сырья. 2010. № 4. С. 121–124.
- Исаченко А. Г. Широтная зональность и механизмы устойчивости ландшафтов к антропогенным воздействиям // Изв. РГО. 1997. Т. 129, № 3. С. 15.
- Калинин П. И., Кудреватых И. Ю., Вагапов И. М., Борисов А. В., Алексеев А. О. Биогеохимические процессы в условиях современных степных ландшафтов Ереванской возвышенности // Почвоведение. 2018. № 5. С. 526–537.
- Ковалевский А. Л. О физиологических барьерах поглощения химических элементов растениями // Микроэлементы в биосфере и применение их в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, 1971. С. 134–144.
- Крайнов С. Р., Швецов В. М. Гидрогеохимия. М.: Недра, 1992. 467 с.
- Мирошниченко Ю. М. Влияние климата и почв на доминирование макроэлементов в растениях пустыней и степей // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2007. № 3. С. 204–206.
- Мордкович В. Г., Шатохина Н. Г., Титлянова А. А. Степные катены. Новосибирск: Наука, 1985. 118 с.
- Мырзабекова У. Ж. Распределение микроэлементов в почвах и растениях по основным типам пастбищ северного склона Таласского Ала-Тоо // Изв. вузов Киргизстана. 2016. № 1. С. 21–24.
- Ондар С. О., Ондар У. В., Очуроол А. О. Особенности накопления химических элементов в надземных органах растений флористических комплексов в Западной Туве // Фундамент. исслед. 2014. № 12, ч. 5. С. 972–977.
- Очирова К. С. Структурная адаптация полыней к условиям Калмыкии: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2010. 25 с.
- Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк., 1966. 392 с.
- Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Астрель-2000, 1999. 768 с.
- Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1965. 254 с.
- Родин Л. Е., Базилевич Н. И., Мирошниченко Ю. М. Продуктивность и биохимия полыньников Средиземноморья // Пробл. биогеоценологии. М., 1973. С. 197–202.
- Спицына С. Ф., Томаровский А. А., Оствальд Г. В. Физиологические барьеры при поглощении меди, цинка и марганца растениями из почвы в условиях равнинной части Алтайского плато // Вест. Алт. гос. аграрн. ун-та. 2014. Т. 117, № 7. С. 56–59.
- Ташнинова Л. Н., Ташнинова А. А. Почвы аридных зон Калмыкии // Вестн. Южного научн. центра РАН. 2010. Т. 6, № 1. С. 52–61.
- Уфимцева М. Д. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях // Геохимия. 2015. № 5. С. 450–465.
- 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.
- Rope S. K., Arthur J., Craig E. H. Nutrient and trace elements in soil and desert vegetation of southern Idano // Environ. Monitoring and Assessment. 1988. N 10. P. 1–24.
- Shededa 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 // J. Arid Environ. 2006. N 66. P. 210–217.

Biogenic accumulation of chemical elements by plants of the *Poaceae* Barnhart and *Artemisia* L. in the dry steppe and semi-desert zones of the south of the Russian Plain

I. Yu. KUDREVATYKH, P. I. KALININ, A. O. ALEKSEEV

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil of RAS
142290, Pushchino, Institutskaya str., 2
E-mail: averkieva.irina@yandex.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. In the soil organic carbon (C_{org}), calcium carbonate ($CaCO_3$), pH and grain size were determined additionally. 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: biogeochemistry, chemical elements, steppe vegetation, semi-desert, coefficient of biological uptake.