

Некоторые закономерности накопления микроэлементов в листьях липы (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы (*Betula alba* L.)

© 2024. А. В. Горбунов¹, с. н. с.,
Д. Б. Петренко^{1,2}, к. х. н., н. с.,
А. А. Дронова¹, м. н. с.,

¹Геологический институт Российской академии наук,
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 1,

²Государственный университет просвещения,
141014, Россия, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,
e-mail: anatolygor@yandex.ru

Изучены закономерности фонового накопления микроэлементов в течение одного вегетационного сезона в листьях липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы белой (*Betula alba* L.). Образцы отбирали на территории Главного Ботанического сада РАН в течение весенне-летне-осеннего сезона 2018 г. с одного и того же дерева с промежутком 10–12 дней, начиная с раскрытия почки (конец апреля) непосредственно вплоть до времени листопада (конец сентября – начало октября). Также отбирали образцы почвы в местах произрастания берёзы и липы. Анализ образцов осуществлялся в лаборатории химико-аналитических методов ГИН РАН при помощи комплекса аналитических методов, состоящего из рентгено-флуоресцентного анализа (РФА), инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) и атомно-абсорбционной спектрометрии холодного пара (АА). Показано, что концентрация микроэлементов в отобранных образцах почвы соответствует понятию «фоновых» содержаний. Первый тип – равномерное накопление микроэлементов с максимумом в конце сезона (Na, Ca, Cr, Fe, Co, Br, Sb, La). Второй тип распределения характеризуется максимумом концентрации микроэлементов в середине сезона с уменьшением концентрации к моменту листопада (K, As, Zn, Cd, Pb). Следует отметить, что диапазон изменения концентрации микроэлементов в течение сезона в обоих случаях может достигать 10–15 раз. Рекомендовано производить отбор образцов растительности (листьев) в максимально сжатые сроки в середине летнего сезона, в качестве «фоновых» желательно использовать образцы, отобранные в этих же временных рамках в этой же местности.

Ключевые слова: микроэлементы, накопление, вегетативные органы, высшие растения.

Some patterns of the accumulation of trace elements in the leaves of linden (*Tilia cordata* Mill.) and birch (*Betula alba* L.)

© 2024. A.V. Gorbunov¹ ORCID: 0000-0001-7794-100X³
D. B. Petrenko^{1,2} ORCID: 0000-0003-0640-5159³
A. A. Dronova¹ ORCID: 0000-0002-1232-9765³

¹Geological Institute, Russian Academy of Sciences,
bld. 1, 7, Pyzhevsky Lane, Moscow, Russia, 119017,

² Federal state university of education,
24, Very Voloshinoy St., Mytishi, Russia, 141014,
e-mail: DBPetrenko@yandex.ru

The purpose of the work: to study the patterns of background accumulation of trace elements during the spring-summer-autumn season in the vegetative organs (leaves) of the heart-shaped linden (*Tilia cordata* Mill.) and white birch (*Betula alba* L.). Samples were taken on the territory of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences during one season of 2018 from the same tree with an interval of 10–12 days, starting from the opening of the bud (end of April) right up to the time of leaf fall. Soil samples were also taken from birch and linden growing areas. The samples were analyzed in the laboratory of Chemical analytical methods of the GIN RAS using X-ray fluorescence analysis (XRF), instrumental neutron activation analysis (INAA) and atomic absorption spectrometry of cold vapor (AA). The concentration of trace elements in the selected soil samples corresponds to the concept of “background” contents. Two types of trace elements’ distribution in linden and birch leaves during the season have been revealed. The first type is a uniform accumulation of trace elements with a maximum at the end of the season (Na, Ca, Cr, Fe, Co, Br, Sb, La). The

second type of distribution is characterized by a maximum concentration of trace elements in the middle of the season with a decrease in concentration by the time of leaf fall (K, As, Zn, Cd, Pb). It should be noted that the range of changes in the concentration of trace elements during the season in both cases can reach 10–15 times. We recommend to take samples of vegetation (leaves) as soon as possible in the middle of the summer season, and to use samples taken at the same time in the same area as “background”.

Keywords: trace elements, accumulation, vegetative organs, higher plants.

Микроэлементный состав растений в целом отражает элементный состав среды произрастания, что многократно продемонстрировано для целого ряда растений урбанизированных территорий [1–7]. Однако на эту закономерность оказывают влияние множество различных факторов: реакция среды, температура, аэрация, окислительно-восстановительный потенциал почвы, вид растений и т. д. Поэтому зависимость между концентрацией макро- и микроэлементов в почве и поступлением их в растения часто не носит определённого функционального характера. Следует отметить, что практически все экологические и биогеохимические исследования основаны на предположении, что микроэлементный состав для каждого вида растений, при отсутствии техногенных воздействий, является величиной относительно постоянной. Считается, что уровни природных «фоновых» концентраций микроэлементов для данного вида растительности могут изменяться в пределах 30–50%. Однако данные, приведённые в литературных источниках, показывают, что диапазон колебаний концентрации микроэлементов в течение одного сезона может составлять до 100% и более [8–12]. Эти данные позволяют предположить, что наряду с ландшафтно-геохимическими условиями и видовой специализацией растительности, на микроэлементный состав вегетативных органов растений влияет также так называемый сезонный фактор – то есть непосредственно время отбора образцов.

Целью нашей работы была оценка закономерностей фонового накопления микроэлементов в листьях наиболее распространённых в средней полосе России растений на примере липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы белой (*Betula alba* L.) в течение вегетативного сезона.

Объект и методы исследования

Отбор образцов. В качестве объекта для исследования «фоновое» распределение микроэлементов были взяты листья липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы белой (*Betula alba* L.), произраставших в одинаковых ландшафтно-геохимических условиях.

Место отбора образцов располагалось на территории Главного Ботанического сада РАН. Ботанический сад расположен в северной части территории Москвы. Средняя продолжительность вегетационного периода 180 дней, среднегодовая температура +3,6 °С. По существующим критериям эколого-геохимической оценки состояния окружающей среды район является относительно чистым: в радиусе 3 км промышленные предприятия отсутствуют.

На протяжении одного сезона 2018 г. с одного и того же растения, с промежутком 10–12 дней, начиная с раскрытия почки (конец апреля), отбирали образцы листьев. Весной и осенью периодичность отбора образцов изменялась до одного раза в неделю. Отбор образцов проводился с периферийных частей веток на расстоянии от земли 1,5–2 м. Отбирали также образцы почвы в местах произрастания берёзы и липы (почва дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая). Отбор образцов почвы проводился 3 раза за сезон – весной, в середине лета и осенью. Всего отобрано около 60 образцов.

Анализ образцов. Отобранные образцы листьев дважды промывали дистиллированной водой для удаления поверхностного загрязнения листьев. Далее образцы высушивали до постоянной массы при комнатной температуре (20 °С) и измельчали с помощью лабораторной мельницы Stegler LM-250 (Stegler, Китай). Почву также высушивали при комнатной температуре и пропускали через сито с размером ячеек 1 мм. Анализ образцов осуществлялся в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН (г. Москва), использовался комплекс методов, состоящий из нейтронно-активационного (ИНАА), рентгеноспектрального (РФА) и атомно-абсорбционного метода с «холодным» паром (АА ХП). Для определения концентрации Cu и Pb в растительных объектах использовали атомно-абсорбционный метод (АА).

Рентгеноспектральный анализ почвы проводился с использованием последовательного волнового XRF спектрометра «S4 Pioneer» Bruker AXS. Обработка полученных результатов осуществлялась с помощью пакета программ «S4 Spectra Plus».

Инструментальный нейтронно-активационный анализ листьев липы и берёзы проводился на исследовательском реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ с помощью спектрометра на основе детектора из сверхчистого германия большого объёма фирмы «Canberra» с энергетическим разрешением 1,3 кэВ по линии 1332 кэВ Co^{60} . Определение концентрации ртути проводили методом атомной абсорбции с «холодным» паром, использовался анализатор ртути «Юлия-5К» (НПО «Метрология», Россия). Атомно-абсорбционный анализ осуществлялся с помощью атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2А» (Москва, КОРТЭК), укомплектованного дейтериевым корректором неселективного поглощения и соответствующими лампами полого катода.

Контроль качества результатов анализа проводили с помощью анализа «холостых»

проб, контрольных образцов и стандартных образцов состава отечественного производства, МАГАТЭ и NIST. Анализ всех образцов проводился в соответствии с утверждёнными в РФ методиками, анализ подвижных форм в почве проводился в соответствии с РД 52.18.289-90.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены концентрации микро- и макроэлементов в почве. Эти данные показывают, что содержание приведённых в таблице элементов в почве ниже кларковых значений, значительно ниже ПДК (ОДК), как по «валовым» значениям, так и по подвижным формам. Таким образом, изученные почвы можно отнести к «фоновым», не обладающим аномальными концентрациями компонентов.

Таблица 1 / Table 1
Концентрация микро- и макроэлементов в почве в пересчёте на воздушно-сухую массу
Concentration of trace and macroelements in soil, air-dry weight

Элемент Element	Ед. изм. Unit	Среднее содержание в почвах мира [12] World-soil average [12]	Средняя концентрация Average concentration	Валовые концентрации, мин-макс Total concentration, min-max	Подвижные формы, мин-макс Labile forms, min-max	ПДК (ОДК)* MPC (UEC)*	
						Валовые концентрации Total concentrations	Подвижная форма Movable form
Na	масс. % wt. %	–	1,93	1,81–2,02	–	–	–
K		–	1,27	1,11–1,35	–	–	–
Ca		–	1,25	1,15–1,36	–	–	–
Fe		–	1,77	1,71–1,82	–	–	–
Cr	мг/кг mg/kg	59,5	15	11–21	0,3–0,5	100	–
Co		11,3	5,8	5,3–6,2	0,5–1,13	–	5
Cu		38,9	9,8	9,3–10,6	1,4–4,9	132	3
Zn		70	40	32–45	5,1–9,3	220	23
As		6,83	1,4	0,73–1,88	–	10	–
Br		10	2,04	1,56–2,77	–	–	–
Rb		68	46	39–52	–	–	–
Cd		0,41	0,4	0,2–0,6	0,05–0,2	2	–
Sb		0,67	0,11	0,09–0,13	–	4,5	–
Ba		460	387	333–410	–	–	–
La		27	6,2	5,2–8,1	–	–	–
Ce		56,7	13,4	13,4–15,5	–	–	–
Hg		0,07	0,025	0,021–0,029	–	2,1	–
Pb		27	9,9	9–12,2	1,1–3,5	130	6
Th		9,2	1,84	1,11–2,12	–	–	–

Примечание: *ПДК (ОДК) – согласно СанПиН 1.2.3685-21; «–» – нет данных.
Note: *MPC (UEC) – according to SanPiN 1.2.3685-21; “–” – no data available.

Таблица 2 / Table 2

Концентрация микроэлементов в листьях липы и берёзы в пересчёте на воздушно-сухую массу
Concentration of trace elements in linden and birch leaves, air-dry weight

Элемент Element	Ед. изм. Unit	Объект / Object						Норма Standard
		Липа (<i>Tilia cordata</i>) Linden tree			Берёза (<i>Betula alba</i> L.) Birch			
		C _{av.} * Средняя концентрация	Диапазон концентраций, мин-макс Concentration range, min-max	S** Стандартное отклонение	C _{av.} Средняя концентрация	Диапазон концентраций, мин-макс Concentration range, min-max	S Стандартное отклонение	
K	%	1,73	0,5–3,01	0,80	1,31	0,65–2,33	0,54	–
Ca		2,20	0,7–3,9	1,20	1,93	0,88–2,54	0,65	–
Na		159	75–300	68,3	109	45–213	48,5	–
Cr	мг/кг mg/kg	1,89	0,5–5,9	1,56	0,74	0,33–4,2	0,23	0,2–1,0
Fe		163	50–380	114	159	98–260	98	–
Co		0,34	0,05–0,71	0,15	0,35	0,06–0,77	0,15	0,02–1,0
Cu		6,30	5,31–12,8	3,85	11	6,61–18	4,62	2–30
Zn		28,4	21–52	12,6	27,3	22–49	11,9	15–150
As		0,38	0,05–0,91	0,25	0,48	0,11–1,01	0,11	0,1–1,7
Rb		8,39	3,1–25	2,61	9,2	3,3–15	3,56	–
Br		1,49	0,5–3,8	1,01	2,16	0,83–3,9	1,11	–
Cd		0,08	0,073–0,12	0,05	0,06	0,04–0,11	0,04	0,05–0,2
Sb		0,14	0,05–0,31	0,08	0,09	0,04–0,25	0,05	0,06–7
Ba		32,3	20–48	9,30	94	35–129	25	–
La		0,47	0,2–1,4	0,34	0,16	0,08–0,25	0,07	–
Ce		0,90	0,4–2,4	0,59	0,42	0,14–0,44	0,15	–
Hg		0,015	0,011–0,03	0,009	0,012	0,009–0,022	0,009	0,005–0,01
Th		0,09	0,02–0,18	0,055	0,05	0,03–0,012	0,025	–
Pb		0,78	0,65–1,12	0,48	0,33	0,12–0,65	0,15	0,1–5

Примечание: *C_{av.} – средняя концентрация, **S – стандартное отклонение, «–» – нет данных.
Note: *C_{av.} – average concentration, **S – standard deviation, “–” – no data available.

В таблице 2 приведены данные о концентрации микроэлементов в отобранных образцах листьев липы и берёзы. В целом эти значения укладываются в понятие нормальных [12–15] значений. Оценка минимальных и максимальных содержаний показывает весьма большой разброс данных в зависимости от момента сбора в течение сезона. В среднем этот разброс составляет 5–7 раз, а по отдельным элементам, таким как Cr, As, Sb – в 10 и более раз.

Это свидетельствует о существовании определённых закономерностей в распределении микроэлементов в течение сезона. Для оценки этих закономерностей были построены графики изменения концентрации микроэлементов в листьях липы и берёзы в зависимости от времени отбора образцов. Эти графики представлены на рисунках 1 и 2. Графики и уравнения, представленные на этих рисунках, указывают на прямо пропорциональный

характер распределения определённой группы микроэлементов в листьях липы в течение весенне-летне-осеннего сезона.

В этой группе элементов наблюдается достаточно равномерное накопление элементов в листьях липы в течение сезона. Максимальные уровни содержания химических элементов отмечены перед листопадом. Такого рода распределение характерно для подавляющего большинства приводимых химических элементов и связано, видимо, с концентрацией их в старых клетках растения. На рисунке 1 эта группа элементов представлена Na, Fe, Ca и Cr, на рисунке 2 представлены только Na и Fe, так как распределение Ca и Cr в листьях берёзы идентично графикам рисунка 1. Следует отметить, что к этой же группе элементов с подобным распределением относятся также Co, Br, Sb, La и Ce. Величина коэффициента детерминации (R²=0,50–0,79) показывает, что выбранная модель распределения (линия

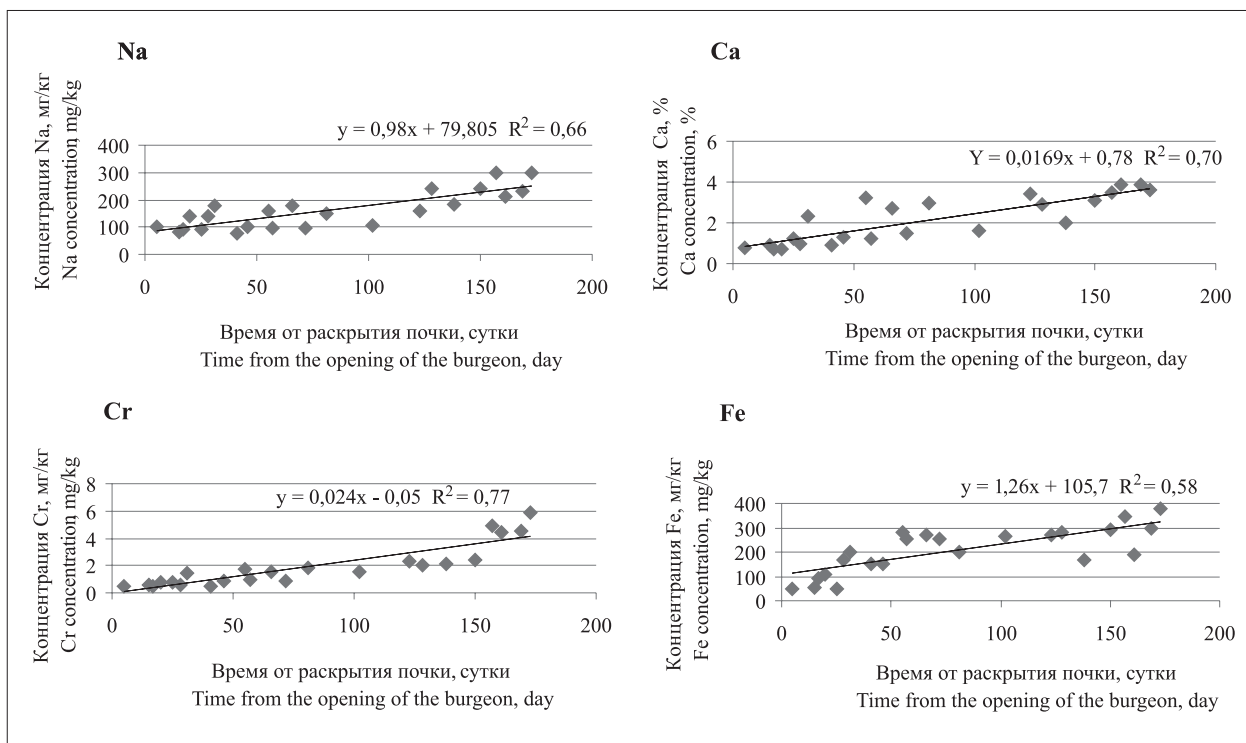


Рис. 1. Изменение концентрации Na, Ca, Fe и Cr в листьях липы в течение вегетативного сезона
Fig. 1. Changes in Na, Ca, Fe and Cr concentrations in linden leaves during the vegetative season

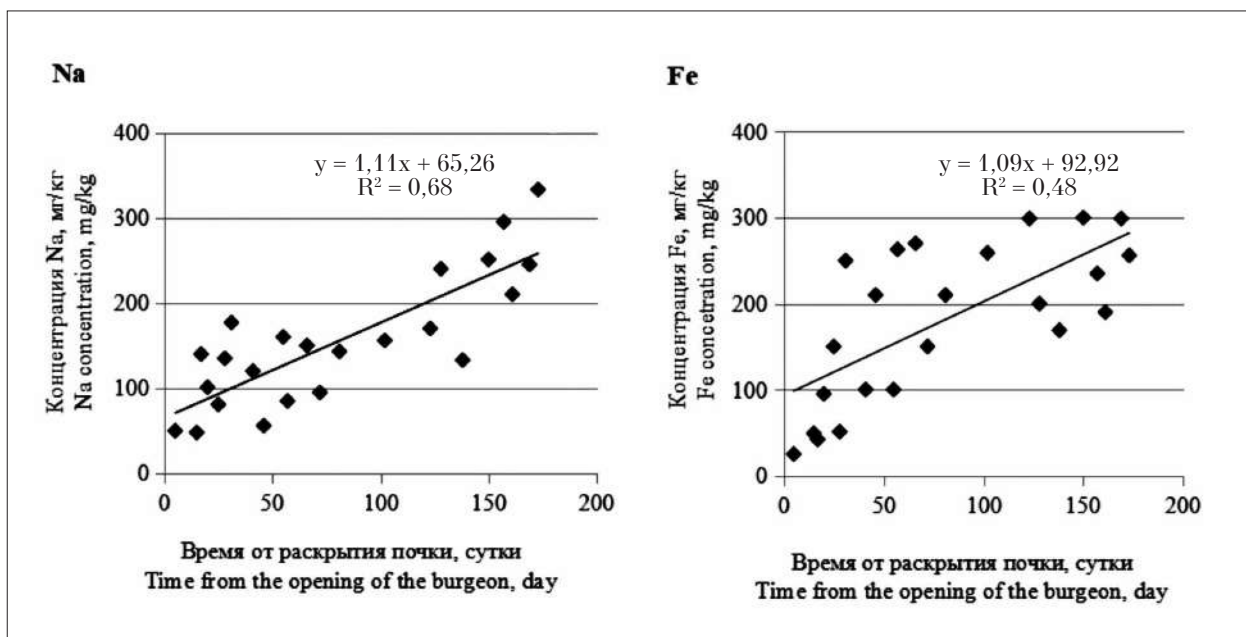


Рис. 2. Изменение концентрации Na и Fe в листьях берёзы в течение вегетивного сезона
Fig. 2. Changes in Na and Fe concentrations in birch leaves during the vegetative season

тренда) имеет характер приемлемого качества, т. е. характер распределения можно признать достоверным.

На рисунках 3 и 4 приведены графики распределения K, Zn, As, Cd и Pb в листьях липы и берёзы в течение весенне-летне-

осеннего сезона. Графики и уравнения, приведённые на этом рисунке, указывают на полиномиальный характер распределения концентрации данных микроэлементов. Распределение этих элементов в листьях имеет два минимума и один максимум концентрации.

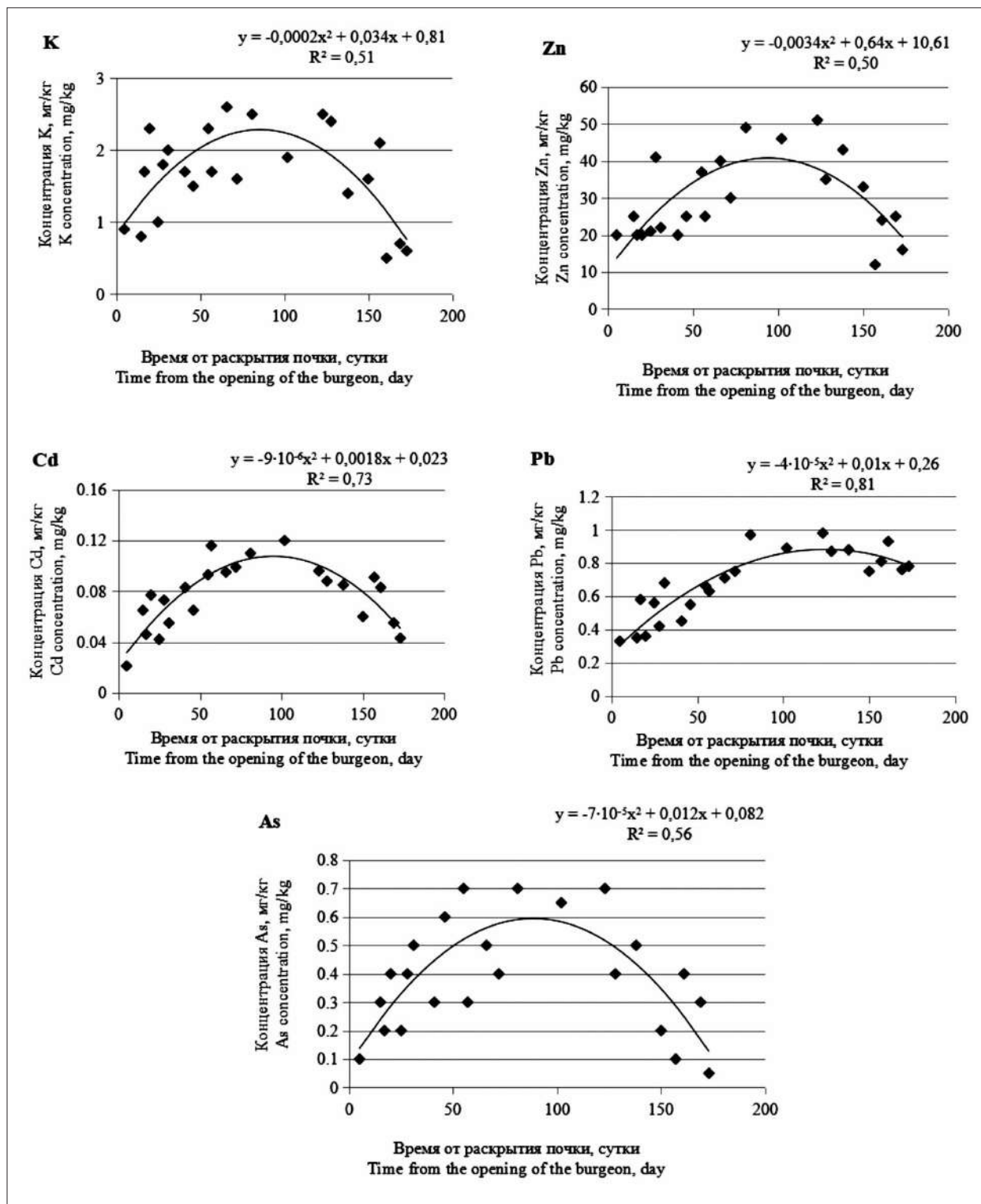


Рис. 3. Изменение концентрации K, Zn, Pb, Cd и As в листьях липы в течение вегетативного сезона
 Fig. 3. Changes in K, Zn, Pb, Cd and As concentrations in linden leaves during the vegetative season

Минимумы характерны для начала сезона (раскрытие почки) и для конца сезона (опад листьев), максимум приурочен к середине сезона. Величина коэффициента детерминации находится в рамках модели приемлемого качества. Парадоксально то, что в одной модели

распределения объединены такие жизненно важные элементы, как K, Zn и токсичные элементы As, Cd, Pb.

Следует отметить, что при анализе распределения микроэлементов в листьях берёзы и липы получены сопоставимые результаты

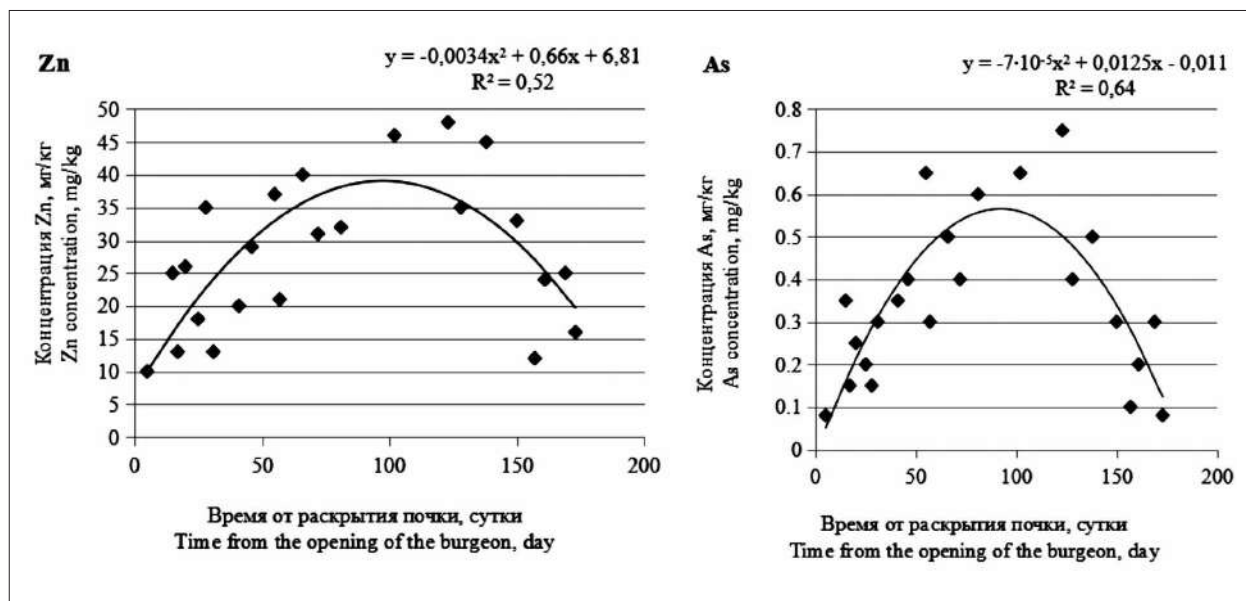


Рис. 4. Изменение концентраций Zn и As в листьях березы в течение вегетативного сезона
 Fig. 4. Changes in Zn and As concentrations in birch leaves during the vegetative season

как по характеру распределения, так и по набору микроэлементов.

Данные, приведённые выше, показывают, что концентрация различных элементов в листьях, отобранных в различное время сезона, может различаться в 3–10 раз. Это различие определяется двумя разными алгоритмами накопления микроэлементов в листьях. Для одной группы элементов – это линейное накопление до момента опадания листьев, для другой группы элементов – это накопление до максимума в середине сезона с последующим выносом элемента до минимума к моменту опадания. Отбор образцов листьев без учёта этих особенностей может привести к значительным ошибкам в анализе экологической ситуации в районе исследований.

Выводы

В процессе проведения данной работы были выявлены некоторые закономерности распределения микроэлементов в листьях липы и берёзы в зависимости от фазы вегетации. Эти закономерности выражаются в линейном накоплении листьями липы и берёзы Na, Ca, Cr, Fe, Co, Br, Sb, La с максимумом в конце сезона. Накопление K, As, Zn, Cd, Pb имеет принципиально другой характер с максимумом концентрации в середине летнего сезона с уменьшением концентрации к моменту опадания листьев. Диапазон изменения концентраций в течение сезона достаточно велик и может достигать 10 раз и более. Эти закономерности необходимо учитывать при

проведении экологических и мониторинговых исследований при использовании листьев липы и берёзы и, возможно, других высших растений. В противном случае возможны значительные ошибки в интерпретации результатов исследования. Избежать этих ошибок позволят следующие рекомендации:

а) отбор всего объёма образцов необходимо проводить в максимально сжатые сроки в середине летнего сезона;

б) в качестве «фона» необходимо использовать образцы, отобранные в эти же сроки в этой же местности.

Литература

1. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Биогеохимическая миграция элементов-загрязнителей в урбоэкосистеме // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 3. С. 27–32. doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-027-032
2. Дабах Е.В., Кислицына А.П., Домнина Е.А. Сравнительное изучение содержания микроэлементов в системе почва – растения луговых биоценозов // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 139–146. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-139-146
3. Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П. Оценка загрязнения почв и растений в зоне воздействия газовой запылённости // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 64–68. doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-064-068
4. Сухарева Т.А. Элементный состав листьев древесных растений в условиях техногенного загрязнения // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 3. С. 369–376.

5. Роева Н.Н., Воронич С.С., Хлопаев А.Г., Зайцев Д.А., Воронич Н.С. Исследование динамики накопления подвижных форм тяжёлых металлов, бенз(а)-пирена и нефтепродуктов в почвах урбанизированных территорий // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 8. С. 39–43. doi: 10.18412/1816-0395-2018-8-39-43

6. Akhtaeva N., Boribay E., Nurmakhanova A., Tynybekov B., Moldagazyeva Z. Adaptive characteristics of plants in the conditions of technogenic pollution // Journal of water and land development. 2022. No. 55. P. 251–258. doi: 10.24425/jwld.2022.142328

7. Медведева М.В., Титова Т.С., Бахмет О.Н., Пеккоев А.Н., Харитонов В.А. Исследование влияния аэротехногенного загрязнения на накопление тяжёлых металлов в системе растение – почва // Экология и промышленность России. 2019 Т. 23. №. 6. С. 52–57. doi: 10.18412/1816-0395-2019-6-52-57

8. Gill M. Heavy metal stress in plants: a review // Int. J. Adv. Res. 2014. V. 2. No. 6. P. 1043–1055.

9. Vanghele N.A., Pruteanu M.A., Petre A.A., Matache A., Mihalache D.B., Stanciu M.M. The influence of environmental factors and heavy metals in the soil on plants' growth and development // E3S Web Conf. 2020. V. 180. Article No. 03014. doi: 10.1051/e3sconf/202018003014

10. Senchenko M., Pozdnyakova V., Stepanova M., Olenchuk E. Migration of microelements and heavy metals in the system “soil – plant – plant-based products” // J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci. 2021. V. 10. No. 6. Article No. e3169. doi: 10.15414/jmbfs.3169

11. Винокуров С.Ф., Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Газеев В.М., А.Б. Лексин, Шевченко А.В., Долов С.М., Дударов З.И., Гурбанова О.А. Сезонные колебания концентраций макро- и микроэлементов и формы их миграции в поверхностных водоёмах в районе деятельности Тырнаузского вольфрамомолибденового комбината (Кабардино-Балкарская Республика, РФ) // Вестник ВНИЦ. 2016. Т. 16. № 2. С. 55–63.

12. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press Inc., 2010. 548 p. doi: 10.1201/b10158

13. Богачев А.В. Миграция ¹³⁷Cs и калия в системе «почва-растение». Факты, закономерности, гипотезы. Препринт № ИБРАЕ-97-20. М.: ИБРАЭ РАН, 1997. 35 с.

14. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Фронтасьева М.В., Гундорина С.Ф. Сезонные изменения микроэлементного состава вегетативных органов древесной растительности // Экологическая химия. 2005. Т. 14. № 4. С. 258–265.

15. Jayasankar R., Paliwar K. Seasonal variation in the elemental composition of *Gracilaria* species of the Gulf of Mannar, Tamil Nadu coast // Seaweed Res. Utiln. 2002. V. 24. No. 1. P. 55–59.

References

1. Mikhailova T.A., Shergina O.V. Biogeochemical migration of pollutant elements in an urban ecosystem // Theoretical and Applied Ecology. 2010. No. 3. P. 27–32 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-027-032

2. Dabakh E.V., Kislitsyna A.P., Domnina E.A. Comparative study of the content of trace elements in the system soil – plants of meadow biocenoses // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 139–146 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-139-146

3. Evdokimova G.A., Mozgova N.P. Comparative estimation of soil and plant pollution in the impact area of air emissions from an aluminium plant after technogenic load reduction // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 4. P. 64–68 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-064-068

4. Sukhareva T.A. Elemental composition of the leaves of wood plants under the conditions of technogenic pollution // Chemistry for Sustainable Development. 2012. V. 20. No. 3. P. 369–376 (in Russian).

5. Roeva N.N., Voronich S.S., Khlopaev A.G., Zaitsev D.A., Voronich N.S. Investigation of the dynamics of accumulation of mobile forms of heavy metals, benz-(a)-pyrene and petroleum products in soils of urbanized territories // Ecology and Industry of Russia. 2018. V. 22. No. 8. P. 39–43 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-8-39-43

6. Akhtaeva N., Boribay E., Nurmakhanova A., Tynybekov B., Moldagazyeva Z. Adaptive characteristics of plants in the conditions of technogenic pollution // Journal of water and land development. 2022. No. 55. P. 251–258. doi: 10.24425/jwld.2022.142328

7. Medvedeva M.V., Titova T.S., Bakhmet O.N., Pekkoiev A.N., Kharitonov V.A. Investigation of the influence of aerotechnogenic pollution on the accumulation of heavy metals in the plant-soil system // Ecology and Industry of Russia. 2019. V. 23. No. 6. P. 52–57. doi: 10.18412/1816-0395-2019-6-52-57

8. Gill M. Heavy metal stress in plants: a review // Int. J. Adv. Res. 2014. V. 2. No. 6. P. 1043–1055.

9. Vanghele N.A., Pruteanu M.A., Petre A.A., Matache A., Mihalache D.B., Stanciu M.M. The influence of environmental factors and heavy metals in the soil on plants' growth and development // E3S Web Conf. 2020. V. 180. Article No. 03014. doi: 10.1051/e3sconf/202018003014

10. Senchenko M., Pozdnyakova V., Stepanova M., Olenchuk E. Migration of microelements and heavy metals in the system “soil – plant – plant-based products” // J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci. 2021. V. 10. No. 6. Article No. e3169. doi: 10.15414/jmbfs.3169

11. Vinokurov S.F., Kotanov A.G., Bogatnikov O.A., Gazeev V.M., Lexin A.B. Shevchenko A.V., Dolov S.M., Dударov Z.I., Kotanova O.A. The seasonal variation of macro- and minor elements concentration and forms of its migration in surface channels at the Тырнауз tungsten-molybdenum mining complex (Kabardino-Balkarian Re-

public, RF) // Vestnik VNC. 2016. V. 16. No. 2. P. 55–63 (in Russian).

12. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press Inc., 2010. 548 p. doi: 10.1201/b10158

13. Bogachev A.V. Migration of ^{137}Cs and potassium in the “soil-plant” system. Facts, patterns, hypotheses. Preprint No. IBRAE-97-20. Moskva: IPSDNE RAS, 1997. 35 p. (in Russian).

14. Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Frontasyeva M.V., Gundorina S.F. Seasonal changes in the microelement composition of vegetative organs of woody vegetation // Ecological Chemistry. 2005. V. 14. No. 4. P. 258–265 (in Russian).

15. Jayasankar R., Paliwar K. Seasonal variation in the elemental composition of *Gracilaria* species of the Gulf of Mannar, Tamil Nadu coast // Seaweed Res. Utiln. 2002. V. 24. No. 1. P. 55–59.