

Д14-2004-74

А. В. Горбунов*, С. М. Ляпунов*, О. И. Окина*,
М. В. Фронтасьева, С. Ф. Гундорина

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО
СОСТАВА ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНОВ
ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Направлено в журнал «Экологическая химия»

*Геологический институт РАН, Москва

Горбунов А. В. и др.

Д14-2004-74

Сезонные изменения микроэлементного состава
вегетативных органов древесной растительности

В работе представлены статистические данные о концентрациях Na, K, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Br, Rb, Sb, La, Ce, Au и Th в листьях и почках липы и хвое сосны. Выявлены сезонные изменения микроэлементного состава древесной растительности. На основе полученных данных о вегетативных органах лиственной и хвойной растительности впервые установлены две группы химических элементов с разным характером сезонного распределения.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Gorbunov A. V. et al.

D14-2004-74

Seasonal Variations of Trace Element Content
of Vegetative Parts of Wood Vegetation

The results of statistical data processing of the concentrations of Na, K, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Br, Rb, Sb, La, Ce, Au, and Th in leaves and lime-tree buds and pine needles are given. Seasonal variations in the trace element content of wood vegetation are revealed. For the first time two groups of chemical elements are identified with different characters of seasonal distribution, based on the results obtained on vegetative organs of deciduous and coniferous vegetation.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Химический состав растений в целом отражает элементный состав среды произрастания. Практически все экологические, геохимические и биогеохимические исследования основаны на предположении, что микроэлементный состав 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 концентрации микроэлементов в растениях, произрастающих даже на фоновых площадях, обнаруживают весьма широкие вариации [1–3]. Литературные данные по микроэлементному составу лиственной и хвойной растительности обнаруживают расхождения в два-три и более раз [4–6].

Обобщение и систематизация этих данных свидетельствует о существовании по крайней мере одного фактора, который не принимается во внимание исследователями при отборе образцов растительности. Наряду с ландшафтно-геохимическими условиями, видовой специализацией растительности, ошибкой аналитических методов, на микроэлементный состав вегетативных органов растений влияет период отбора образцов — сезонный фактор. Наблюдается неслучайный характер изменений концентраций микроэлементов в растительности в течение сезона, причем диапазон колебаний концентраций составляет до 200 % [5, 7, 8]. Следовательно, проведение экологических, геохимических и биогеохимических исследований невозможно без учета времени отбора образцов растительности. Задача данной работы — выяснение степени влияния сезонного фактора на микроэлементный состав хвои сосны, листьев и почек липы, а также определение закономерностей накопления или выноса из них микроэлементов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пробоотбор. В качестве объектов для изучения были использованы наиболее типичные для средней полосы России представители высшей растительности — липа мелколистная и сосна. Продолжительность эксперимента составляла два года. Суть его в том, что на протяжении этого времени с одного и того же дерева ежемесячно отбирались образцы листвы (хвои). Весной

и осенью периодичность отбора образцов учащалась до одного раза в неделю. Зимой с липы отбирались почки, летом — листья, а с сосны круглогодично — хвоя. Место отбора образцов липы располагалось на территории Главного ботанического сада РАН на севере Москвы. По существующим критериям эколого-геохимической оценки состояния окружающей среды данный район является относительно чистым: в радиусе 3 км промышленные предприятия отсутствуют.

Отбор образцов проводился с периферийных частей веток на расстоянии от земли 2–2,5 м.

Место отбора образцов хвои сосны располагалось на юге Московской обл. в районе г. Серебряные Пруды. Район считается в основном сельскохозяйственным, крупные промышленные предприятия отсутствуют. Кроме того, если учесть тот факт, что в последние 10 лет в сельском хозяйстве района резко снизилось (в 5–10 раз) применение азотно-фосфорных удобрений и пестицидов, его можно считать экологически чистым.

Отбор образцов хвои производился как с периферийной, так и с внутренней части веток, т. е. отбиралась молодая, годичная и многолетняя хвоя.

Пробоподготовка. Отобранные образцы промывались под потоком водопроводной воды, второй раз промывались дистиллированной водой, высушивались до постоянного веса при комнатной температуре (20 °С) и измельчались. Измельченный образец массой 0,3–0,5 г упаковывался в алюминиевую фольгу для анализа методом нейтронной активации.

Для проведения анализа атомно-абсорбционным методом 0,5 г образца помещали в конические колбы и обрабатывали смесью концентрированных азотной (10 мл) и хлорной (1 мл) кислот при нагревании до полной минерализации. Остаток растворяли в 10 мл одномолярной соляной кислоты. После фильтрации раствор образца доводили до объема 25 мл дистиллированной водой.

Анализ. Анализ образцов осуществлялся с помощью инструментального нейтронного активационного и атомно-абсорбционного методов. Инструментальный нейтронный активационный анализ проводился на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (Дубна). Контейнеры с образцами облучались 4–5 сут в канале с кадмиевым экраном при плотности потока резонансных нейтронов $3,31 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и температуре 70 °С. Наведенная гамма-активность образцов измерялась дважды: спустя 3–4 и 20 сут после выгрузки их из канала — с помощью детектора из сверхчистого германия с разрешением 2,2 кэВ для линии ^{60}Co 1332 кэВ.

Таким образом была определена концентрация следующих элементов: Na, K, Ca, Sc, Cr, Co, As, Sb, Cs, La, Ce, Th. Определение элементов Fe и Zn в растворах проводилось атомно-абсорбционным методом на спектрометре КВАНТ-2А (КОРТЭК, Москва) в лаборатории химико-аналитических исследований Геологического института РАН (Москва).

Контроль качества. Определение концентрации элементов в анализируемых образцах осуществлялось с использованием международных (МАГАТЭ, Австрия) и отечественных (Новосибирск) стандартных образцов состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены статистические данные по микроэлементному составу листьев и почек липы, отобранных с одного и того же растения за полтора года (17 месяцев, включая два летних сезона). 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 Sc, Cr, Au по листьям и K, Co, Vg по почкам, — 10 и более раз. Сравнение средних арифметических значений и медианы показывает, что распределение содержаний микроэлементов носит в основном равномерный и симметричный характер. Это свидетельствует о существовании определенных закономерностей в распределении микроэлементов в продолжение сезона.

Для оценки закономерностей ежемесячно строили графики изменения данных содержания микроэлементов в листьях и почках липы. Они представлены на рис. 1. Анализ графических материалов показывает, что все приведенные в табл. 1 микроэлементы можно разделить на две группы по характеру их накопления.

В первой группе элементов (см. на рис. 1 Na, Fe, Co и La) наблюдается достаточно равномерное накопление химических элементов в листьях в течение сезона. Максимальные уровни содержания химических элементов наблюдаются перед листопадом. Такого рода распределение характерно для подавляющего большинства приводимых химических элементов и скорее всего связано с концентрацией их в старых клетках растения.

Во второй группе, к которой относятся K, Rb, Zn и As, наблюдается достаточно резкое накопление микроэлементов до своего максимума, что чаще всего совпадает с периодом цветения, с последующим понижением концентраций к концу сезона. Минимальные значения содержаний приходятся на момент начала роста листа и момент его опада, а максимум — на середину летнего сезона.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов корреляции химических элементов в листьях липы. Легко заметить, что здесь также находит свое подтверждение принцип деления микроэлементов на две группы. Очевидны корреляционные зависимости в группе Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Br, Sb, Ba, La, Ce, Au, Th (коэффициенты корреляции 0,5–0,9) и в группе K, Rb, Zn, As (коэффициенты корреляции 0,4–0,6).

Таблица 1. Микроэлементный состав листьев и почек липы, отобранных в одной точке местности в течение двух лет (мкг/г)

Характеристика	Элемент																
	Na	K, %	Ca, %	Sc	Cr	Fe	Co	Zn	As	Br	Rb	Sb	Ba	La	Ce	Au	Th
Листья, n = 23																	
Среднее значение	159	1,7	2,2	0,09	1,9	163	0,3	28	0,4	1,5	8	0,14	32	0,5	0,9	0,010	0,09
Минимум	75	0,5	0,7	0,01	0,5	50	0,1	12	0,1	0,5	3	0,05	20	0,2	0,4	0,002	0,02
Максимум	300	3,0	3,9	0,29	5,9	380	0,7	58	0,9	3,8	25	0,31	48	1,4	2,4	0,028	0,18
Медиана	150	1,6	2,0	0,05	1,5	100	0,3	25	0,3	1,1	6	0,10	30	0,4	0,7	0,008	0,07
Стандартное отклонение	68	0,8	1,2	0,08	1,6	114	0,2	13	0,3	1,0	5	0,08	9	0,3	0,6	0,006	0,06
Почки, n = 23																	
Среднее значение	72	1,3	1,9	0,008	0,5	82	0,08	26	0,04	0,5	4	0,02	20	0,2	0,3	0,004	0,05
Минимум	23	0,2	1,2	0,003	0,2	35	0,02	12	0,01	0,1	2	0,01	12	0,05	0,1	0,002	0,01
Максимум	160	3	2,4	0,02	1,1	170	0,2	52	0,06	1,4	7	0,06	41	0,6	1,1	0,0011	0,13
Медиана	50	0,9	2	0,007	0,4	62	0,05	27	0,04	0,4	3	0,02	17	0,1	0,2	0,003	0,03
Стандартное отклонение	49	0,9	0,4	0,005	0,3	45	0,06	11	0,02	0,4	1	0,01	8,5	0,2	0,3	0,003	0,04

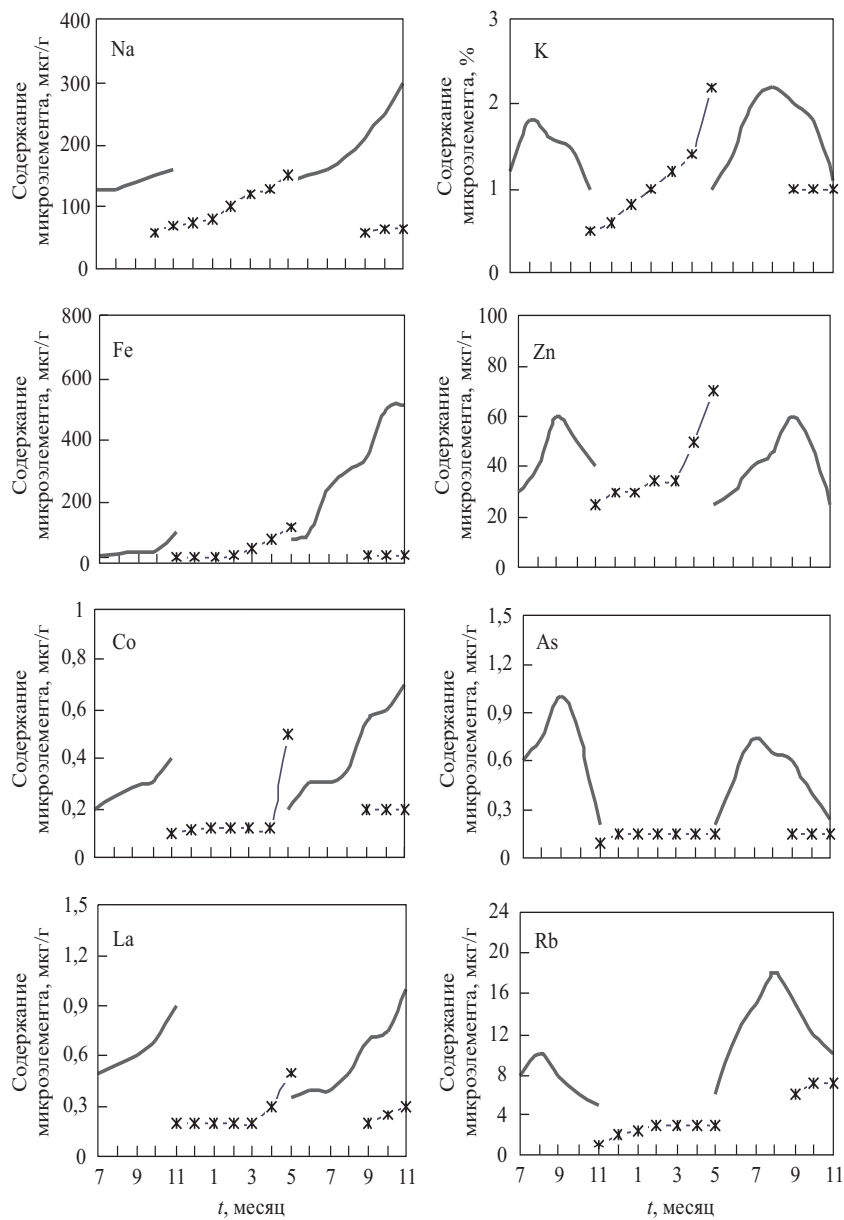


Рис. 1. Распределение микроэлементов в листьях (—) и почках (ж-ж) липы остролистной

Таблица 2. Корреляция содержания микроэлементов в листьях липы

Элемент	Na	K, %	Ca, %	Sc	Cr	Fe	Co	Zn	As	Br	Rb	Sb	Ba	La	Ce	Au	Th
Na	1																
K, %	-0,3	1															
Ca, %	0,8	-0,2	1														
Sc	0,9	-0,4	0,7	1													
Cr	0,9	-0,5	0,8	0,9	1												
Fe	0,8	0,1	0,7	0,7	0,5	1											
Co	0,8	-0,4	0,7	0,7	0,7	0,6	1										
Zn	-0,2	0,5	0,1	-0,2	-0,2	-0,1	0,1	1									
As	-0,2	0,4	0,1	-0,4	-0,2	-0,1	0,1	0,7	1								
Br	0,8	0,1	0,6	0,8	0,7	0,9	0,8	-0,3	-0,4	1							
Rb	0,3	0,6	0,4	0,3	0,1	0,5	0,2	0,5	0,5	0,4	1						
Sb	0,6	-0,7	0,4	0,5	0,8	0,1	0,6	-0,1	0,1	0,3	-0,2	1					
Ba	0,8	0,1	0,7	0,8	0,6	0,8	0,6	-0,1	0,1	0,7	0,6	0,3	1				
La	0,6	-0,4	0,6	0,5	0,7	0,2	0,5	0,2	0,2	0,3	0,1	0,7	0,4	1			
Ce	0,6	-0,4	0,6	0,5	0,7	0,2	0,5	0,1	0,2	0,3	0,1	0,7	0,4	1	1		
Au	0,7	-0,7	0,6	0,8	0,9	0,3	0,7	-0,3	-0,3	0,6	-0,2	0,9	0,5	0,7	0,7	1	
Th	0,6	0,1	0,8	0,5	0,5	0,7	0,5	0,3	0,2	0,5	0,5	0,2	0,8	0,5	0,5	0,3	1

Таблица 3. Микроэлементный состав хвои сосны, отобранной в одной точке местности в течение двух лет (мкг/г): 1 — хвоя текущего года; 2 — однолетняя хвоя; 3 — многолетняя хвоя

Значение	Na			K, %			Ca			Cr			Fe			Co		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Среднее	73	116	130	0,68	0,44	0,27	2079	3447	4058	0,9	1,1	1,3	99	129	176	0,3	0,3	0,3
Минимальное	32	53	70	0,41	0,21	0,05	1100	2250	3010	0,4	0,4	0,5	63	75	95	0,1	0,1	0,1
Максимальное	129	192	205	1,25	0,75	0,55	2700	4150	4910	1,6	2	2,4	155	255	320	0,5	0,6	0,5
Медиана	58	101	108	0,64	0,41	0,27	2053	3485	3975	0,9	1,2	1,3	97	118	169	0,2	0,3	0,3
Стандартное отклонение	32	47	43	0,25	0,17	0,14	402	573	598	0,3	0,5	0,5	20	49	64	0,1	0,2	0,1
Стандартное отклонение, %	44	41	34	37	39	52	19	17	15	30	45	38	20	38	36	30	66	30
Значение	Zn			As			Br			Rb			Sb			La		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Среднее	36	33	29	0,03	0,05	0,05	4,7	5,7	6,2	6,4	4,2	2,9	0,021	0,033	0,05	0,3	0,3	0,3
Минимальное	16	18	16	0,02	0,02	0,02	1,3	1,5	2	3	2	1	0,008	0,01	0,02	0,2	0,2	0,2
Максимальное	59	56	48	0,06	0,09	0,1	14	17	19	25	12	8	0,05	0,06	0,08	0,5	0,6	0,6
Медиана	35	30	26	0,03	0,05	0,06	4,5	5,4	5,6	4	3	2	0,02	0,03	0,04	0,2	0,3	0,3
Стандартное отклонение	12	10	9,5	0,01	0,02	0,02	3,3	3,9	4	5,3	2,4	1,9	0,011	0,013	0,01	0,1	0,1	0,1
Стандартное отклонение, %	33	30	32	33	40	40	70	68	64	83	57	65	52	39	20	33	33	33

В почках распределение микроэлементов в осенний, зимний и весенний период иное. Наблюдаются практически постоянные содержания в осенне-зимний сезон и повышение концентраций весной. Максимум содержания химических элементов в почках липы достигается к моменту раскрытия.

В табл. 3 приведены статистические данные о микроэлементном составе хвои сосны, отобранной с одного и того же растения за два года. Разница между минимальными и максимальными значениями здесь несколько ниже и составляет в среднем 4–6 раз. Значения среднего арифметического и медианы во всех случаях также достаточно близки, что говорит о равномерном и симметричном распределении концентраций во времени. Анализ данных по средним арифметическим содержаниям микроэлементов в хвое текущего года, однолетней и многолетней хвое показывает, что тенденции, которые достаточно определенно проявились по отношению к листьям липы, вполне справедливы и по отношению к хвое сосны.

Результаты показывают тенденцию к накоплению в долгосрочной перспективе таких элементов, как Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Br, Sb и La, и к снижению концентраций K, Rb и Zn с течением времени.

Для того чтобы более подробно рассмотреть эти зависимости, были построены графики изменения микроэлементного состава хвои сосны за время эксперимента. Графики для Na, Ca, Fe, K, Zn и Rb представлены на рис. 2. Их анализ показывает следующее:

- поскольку эксперимент охватывал два летних сезона, все графики имеют два более или менее выраженных максимума концентраций микроэлементов;

- максимальные уровни концентраций Na, Ca, Fe и остальных элементов этой группы имеют достаточно сглаженный вид, максимумы второго года значительно (почти в 2 раза) превышают максимумы первого года;

- максимальные уровни концентраций K, Zn и Rb имеют более выраженный характер, продолжительность максимума составляет 1,5–2 месяца, второй максимум равен первому либо меньше него;

- графики накопления Na, Ca, Fe и других элементов этой группы отражают временной характер накопления, т.е. чем старше хвоя, тем выше концентрация этих элементов;

- графики распределения (накопления) K, Zn и Rb отражают обратную зависимость концентраций и возраста хвои;

- расчет коэффициентов корреляции для всей совокупности микроэлементов показал наличие тех же корреляционных зависимостей, что и в листьях липы.

Таким образом, существование закономерностей распределения микроэлементов в листьях липы и хвое сосны в зависимости от фазы вегетации подтверждается. Они выражаются в накоплении вегетативными органами лиственной и хвойной растительности в разные фазы вегетации одних хими-

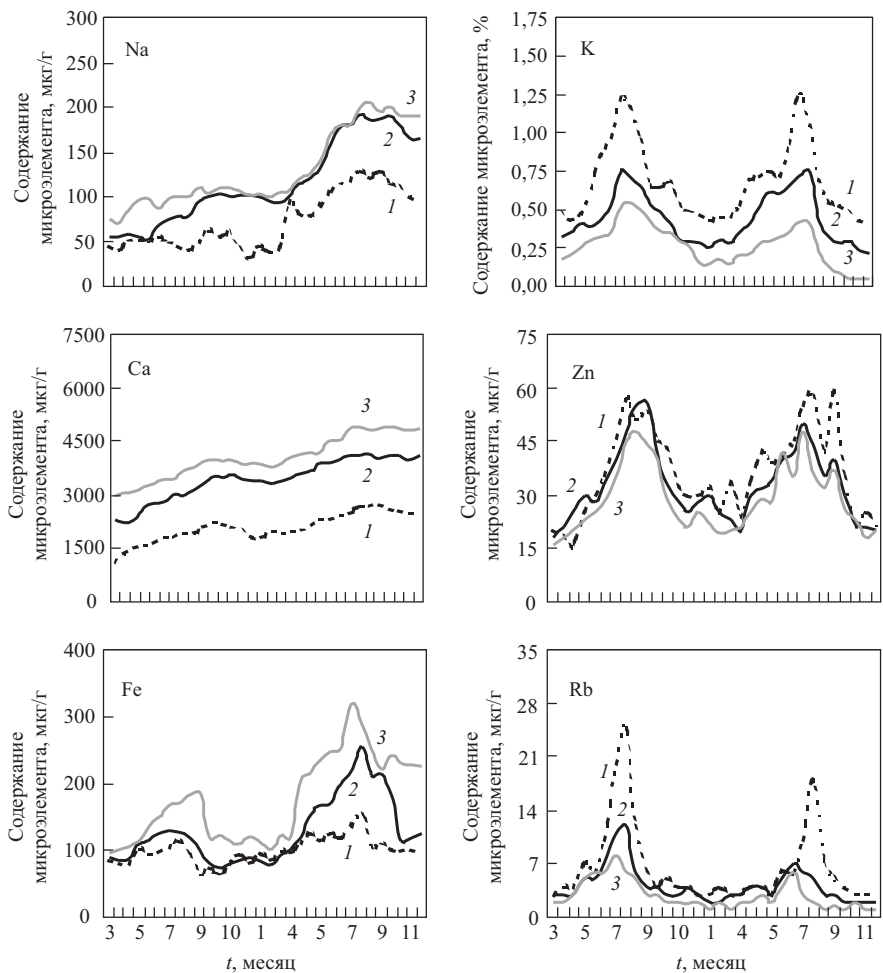


Рис. 2. Изменение микроэлементного состава хвои сосны с течением времени (1 — хвоя текущего года, 2 — однолетняя хвоя, 3 — многолетняя хвоя)

ческих элементов (Na, Ca, Cr, Fe, Co, Br и пр.) и выносе других (K, Rb, Zn, возможно As).

Эти закономерности не являются линейными и имеют свои максимумы накопления — конец летнего сезона в первом случае и середина летнего сезона во втором. Диапазон изменения концентраций в течение сезона достаточно велик и может достигать 10 раз и более.

Авторами были проведены выборочные исследования сезонного распределения микроэлементов в листьях березы и хвое ели, результаты которых подтвердили универсальность вышеизложенных принципов.

ВЫВОДЫ

1. В вегетативных органах древесной растительности в течение летнего сезона могут происходить весьма значительные изменения микроэлементного состава (в 10 и более раз), что выявлено на примере липы мелколистной и сосны обыкновенной.

2. Эти изменения происходят в соответствии с вполне определенными закономерностями и могут быть связаны с биологической ролью данного элемента в растении и его миграционными свойствами.

3. Такие элементы, как Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Br, Sb, La, равномерно накапливаются в листьях липы и хвое сосны и достигают максимальных концентраций перед опадом.

4. Вторая группа элементов — K, Rb и Zn — имеет четко обозначенные максимумы концентраций в середине сезона и явную тенденцию к выносу этих элементов в долгосрочной перспективе. Их минимальные концентрации наблюдаются к моменту опадания листьев или хвои.

5. Авторы считают, что отмеченные закономерности универсальны и характерны для всех видов древесной растительности.

6. При проведении экологических, эколого-геохимических и эколого-биохимических исследований необходимо учитывать наличие показанных в этой работе зависимостей. В противном случае могут быть получены несопоставимые результаты.

7. Отбор образцов растительности целесообразно проводить в достаточно узком временном диапазоне — с середины июля до середины августа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркет Б., Второва В. Н. Кадастры концентраций химических элементов растительных лесных экосистем Восточной Европы // Физиология растений. Изв. РАН. Сер. биологическая. 1995. № 5. С. 545–553.
2. Кист А. А. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент, 1987. 236 с.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 436 с.
4. Ковальский В. В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 298 с.

5. *Лукина Н. В., Никонов В. В.* Питательный режим лесов северной тайги. Апатиты, 1998. 316 с.
6. *Markert B., Klausmeyer N.* Variations in the elemental composition of plants and composition of plants and computer aided sampling in ecosystems // *Toxicological and Environmental Chemistry*. 1990. V. 25. P. 201.
7. *Rautio P., Huttunen S., Lamppu J.* Seasonal foliar chemistry of northern scots pines under sulphur and heavy metal pollution // *Chemosphere*. 1998. V. 37, No. 2. P. 271–287.
8. *Горбунов А. В., Онищенко Т. Л., Фронтасьева М. В.* Оценка изменений фонового микроэлементного состава биологических объектов // *Геохимические исследования городских агломераций*. М., 1998. С. 60–69.

Получено 18 мая 2004 г.

Редактор *О. Г. Андреева*

Подписано в печать 28.06.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 200 экз. Заказ № 54497.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/