

УДК 630*18 (470.343)

Ю.П. Демаков, С.М. Швецов

Поволжский государственный технологический университет

**СОДЕРЖАНИЕ ЗОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОДИЧНЫХ СЛОЯХ
ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ В ПРИОЗЕРНЫХ БИОТОПАХ
НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «МАРИЙ ЧОДРА»**

Одним из важнейших носителей информации о состоянии лесных экосистем являются годовые кольца деревьев, анализ многолетних рядов которых используется исследователями (Комин, 1973; Битвинскас, 1974; Ловелиус, 1979; Шиятов, 1986; Ваганов, Шиятов, Мазепа, 1996; Демаков, 2000; Румянцев, 2011) для оценки происходящих изменений. Применяемые в настоящее время приемы и методы позволяют, однако, расшифровать лишь часть закодированной в них информации. Весьма перспективной в этом плане может оказаться оценка состава в годовых кольцах зольных элементов, содержание которых зависит от условий среды и состояния деревьев (Адаменко и др., 1982). Изучение содержания в них зольных элементов необходимо как для познания процесса их потребления растениями и выявления закономерностей протекания биологического круговорота в биогеоценозах, так и для оценки степени загрязнения среды при ведении экологического мониторинга.

Исходный материал представлен кернами древесины, взятыми осенью 2011 года с 49 деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), произраставших на песчаных почвах берегов карстовых озер Яльчик и Глухое НП «Марий Чодра» (Россия, Республика Марий Эл) в зоне интенсивной рекреационной нагрузки. Возраст деревьев изменялся от 60 до 190 лет, а их диаметр – от 28 до 60 см. Для анализа использованы керны древесины, взятые буром Пресслера по одному с каждого дерева на высоте 1,0-1,3 м от поверхности почвы. На кернах сначала было проведено измерение ширины годовых слоев с погрешностью $\pm 0,05$ мм. После этого их разделяли на слои по 20-летиям, высушивали до абсолютно сухого состояния, взвешивали, измельчали и сжигали в муфельной печи при температуре 450°C. Содержание элементов в золе определяли «мокрым» способом на атомно-

абсорбционном спектрометре AAnalyst 400, а пробоподготовку проводили по типовым методикам (Методы ..., 1974; Методика ..., 2007). Цифровой материал обработан на ПК с использованием стандартных методов математической статистики.

Исследования показали, что зольность древесины сосен, произрастающих в разных приозерных биотопах, практически одинакова, но содержание в ней некоторых зольных элементов различно (табл. 1). Так, в древесине сосен на крутом южном берегу оз. Глухое концентрация Ca, K, Mn и Sr в среднем гораздо выше, чем на пологом западном берегу оз. Яльчик, а свинца, наоборот, ниже. Среднее содержание остальных металлов в этих биотопах практически одинаково, однако концентрация их в слоях древесины, образовавшихся в них в одно и то же время, различна, что может быть обусловлено изменением интенсивности потребления деревьями элементов питания в разном возрасте.

Зольность древесины годовых слоев изменяется в обоих биотопах, как показали расчеты, синхронно во времени ($r = 0,87$) и волнообразно, отображаясь функцией $Y = 0,056 \cdot \sin(2\pi t/97,1 + 11,19) + 0,311$ ($R^2 = 0,83$). Синхронен также ход в биотопах содержания в слоях древесины Ca, Fe, Cu, Pb, Co и Cd (табл. 2 и 3): концентрация первых трех из них неуклонно увеличивается, а трех последних изменяется волнообразно с минимумом в период с 1880 по 1940 годы (рис. 1). Изменение содержания в древесине остальных зольных элементов происходит в каждом биотопе также в целом волнообразно, хотя и сугубо специфично. Так, период колебаний содержания калия в древесине сосен на берегу оз. Яльчик составляет 96 лет, максимумы приходятся на 1871-1910 и 1991-2010 годы, а минимумы – на 1851-1870 и 1931-1950 гг. В годовых слоях сосен на берегу оз. Глухое содержание этого элемента изменяется уже с периодом около 120 лет: отмечена пока одна волна, максимум которой пришелся на 1951-1970 годы. Сходным образом изменяется в этом биотопе содержание марганца. На берегу же оз. Яльчик содержание марганца изменяется также волнообразно, но уже с периодом около 160 лет и максимумом в 1891-1910 годы, хотя периодичность здесь выражена гораздо слабее.

Особенно резко различается динамика содержания в годовых слоях сосен Zn, Sr, Cr и Ni. Так, на берегу оз. Яльчик содержание цинка в древесине имеет два максимума, первый из которых отмечается в 1851-1870 годы, а второй – в 1971-1990. На берегу оз. Глухое отмечается одна полуволна с максимумом в период 1951-1970 годы. В 1891-1951 годах его содержание в данном биотопе в 1,6-2,1 раза ниже, чем у сосен на оз. Яльчик. В дальнейшем биотопы меняются между собой местами, т.е. картина становится диаметрально противоположной.

Таблица 1

Содержание золы и зольных элементов в годичных слоях древесины сосен в приозерных биотопах

Временной интервал	Годичный прирост, мм	Зола, %	Содержание элементов в древесине, мг/кг абсолютно сухой массы											
			Ca	K	Mn	Fe	Zn	Cu	Sr	Cr	Pb	Co	Cd	Ni
<i>Берег оз. Яльчик</i>														
1831-1850	2,85	0,23	772,7	252,1	18,19	14,98	3,659	0,802	0,000	0,852	0,276	0,526	0,351	0,301
1851-1870	1,97	0,29	766,4	227,3	38,12	20,68	6,710	0,991	0,048	0,648	1,811	0,200	0,162	0,095
1871-1890	3,28	0,35	768,3	360,2	31,01	16,02	5,916	0,765	0,632	0,370	0,333	0,108	0,077	0,068
1891-1910	2,53	0,39	558,8	365,4	47,56	12,12	4,576	0,691	0,754	0,177	0,121	0,077	0,040	0,071
1911-1930	1,54	0,28	620,0	279,5	27,98	12,75	4,995	0,633	0,420	0,105	0,099	0,096	0,077	0,065
1931-1950	1,24	0,28	613,3	183,9	29,74	12,90	5,698	0,669	0,369	0,464	0,135	0,102	0,080	0,099
1951-1970	1,22	0,30	634,6	299,8	26,22	17,79	5,541	0,750	0,314	0,118	0,140	0,100	0,067	0,089
1971-1990	1,15	0,38	706,6	488,5	29,68	20,36	6,376	0,983	0,253	0,298	0,219	0,139	0,114	0,109
1991-2011	1,27	0,36	666,5	618,0	22,56	23,77	4,997	1,201	0,215	0,202	0,197	0,134	0,090	0,121
Среднее	1,62	0,32	678,6	341,6	30,12	16,82	5,385	0,832	0,334	0,359	0,370	0,165	0,118	0,113
<i>Берег оз. Глухое</i>														
1891-1910	3,35	0,35	303,1	93,82	15,64	9,61	2,946	0,386	0,274	0,188	0,103	0,080	0,045	0,088
1911-1930	1,95	0,29	254,5	103,00	13,64	7,94	2,416	0,348	0,179	0,090	0,025	0,065	0,057	0,052
1931-1950	1,34	0,26	294,4	296,40	12,17	13,01	2,402	0,536	0,188	0,057	0,063	0,095	0,060	0,057
1951-1970	1,12	0,31	1208,4	876,60	147,20	25,03	10,700	1,175	1,807	0,788	0,180	0,203	0,161	0,198
1971-1990	0,93	0,32	1508,4	649,00	62,65	29,54	10,550	1,338	1,806	0,468	0,154	0,249	0,195	0,113
1991-2011	1,05	0,34	1100,7	501,30	48,55	20,32	8,299	1,152	1,118	0,829	0,187	0,227	0,176	0,074
Среднее	1,46	0,31	778,3	420,0	49,98	17,58	6,219	0,823	0,895	0,403	0,119	0,153	0,116	0,097

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции между рядами динамики содержания зольных элементов в слоях древесины сосен в приозерных биотопах

Элемент	Значение r	Элемент	Значение r	Элемент	Значение r
Ca	0,834	Zn	0,545	Pb	0,726
K	0,279	Cu	0,746	Co	0,835
Mn	-0,388	Sr	-0,608	Cd	0,679
Fe	0,775	Cr	-0,347	Ni	0,072

Таблица 3

Значения параметров уравнения $Y = a \cdot X + b$, отражающего зависимость содержания зольных элементов в разных слоях древесины сосен

Элемент	Значения параметров уравнения			Элемент	Значения параметров уравнения		
	a	b	R ²		a	b	R ²
Ca	9,27	-5091,8	0,696	Pb	1,04	-0,039	0,528
Fe	1,41	-5,894	0,601	Co	2,87	-0,157	0,698
Cu	1,49	-0,398	0,557	Cd	1,90	-0,032	0,461

Примечание: Y – содержание элемента в слое древесины сосен на берегу оз. Глухое, мг/кг; X – содержание элемента в этом же слое древесины сосен на берегу оз. Яльчик, мг/кг.

В динамике содержания стронция в обоих биотопах прослеживается по одной волне с гребнем, приходящимся на разные периоды: на берегу Яльчика в 1891-1910 гг., а на Глухом в 1951-1990 гг. Различия концентрации ионов этого металла в годичных слоях древесины наибольших значений достигают в 1971-1990 гг. (в биотопе на Глухом в 7,1 раза больше). Причина этого феномена не совсем ясна. Содержание хрома в древесине сосен на берегу оз. Яльчик с 1831 года неуклонно снижается, достигая минимума в 1911-1930 гг. В следующий период времени оно резко повышается (в 4,4 раза), а затем вновь падает. На берегу оз. Глухое концентрация этого металла в период с 1891 по 1930 гг. практически такая же, как на оз. Яльчик, в 1931-1950 гг. она в 8,1 раза меньше, а в 1951-1970 гг. в 6,7 больше. В целом же в этом биотопе отмечается увеличение содержания в древесине данного элемента, тогда как на оз. Яльчик наблюдается обратное. Сходным образом изменяется содержание никеля в древесине сосен обоих биотопов.

Связь зольности древесины и содержания в ней металлов с возрастом деревьев, как показали расчеты, слабая, что существенно отличается от полученных нами ранее результатов (Демаков и др., 2011). Слаба также связь

содержания зольных элементов с величиной текущего радиального прироста деревьев, выявленная в частности А.Ф. Четвериковым (1986). Расчеты показали также, что какой-либо закономерности изменения во времени величины пропорций содержания металлов, выявленной нами в пойменных биотопах (Демаков и др., 2011), в изученной совокупности деревьев не обнаружено. Таким образом, вариабельность их концентрации в годичных слоях связана как с изменением состояния окружающей среды, так и самих ценозов, в которых происходят циклические процессы отпада деревьев и разложения мертвой органики (Демаков, 2000), отражающиеся на напряженности конкурентных отношений между ними и характере потребления элементов питания. Подтвердить или опровергнуть данное положение можно лишь на основе дальнейших исследований, проведенных в древостоях разного возраста и типов леса.

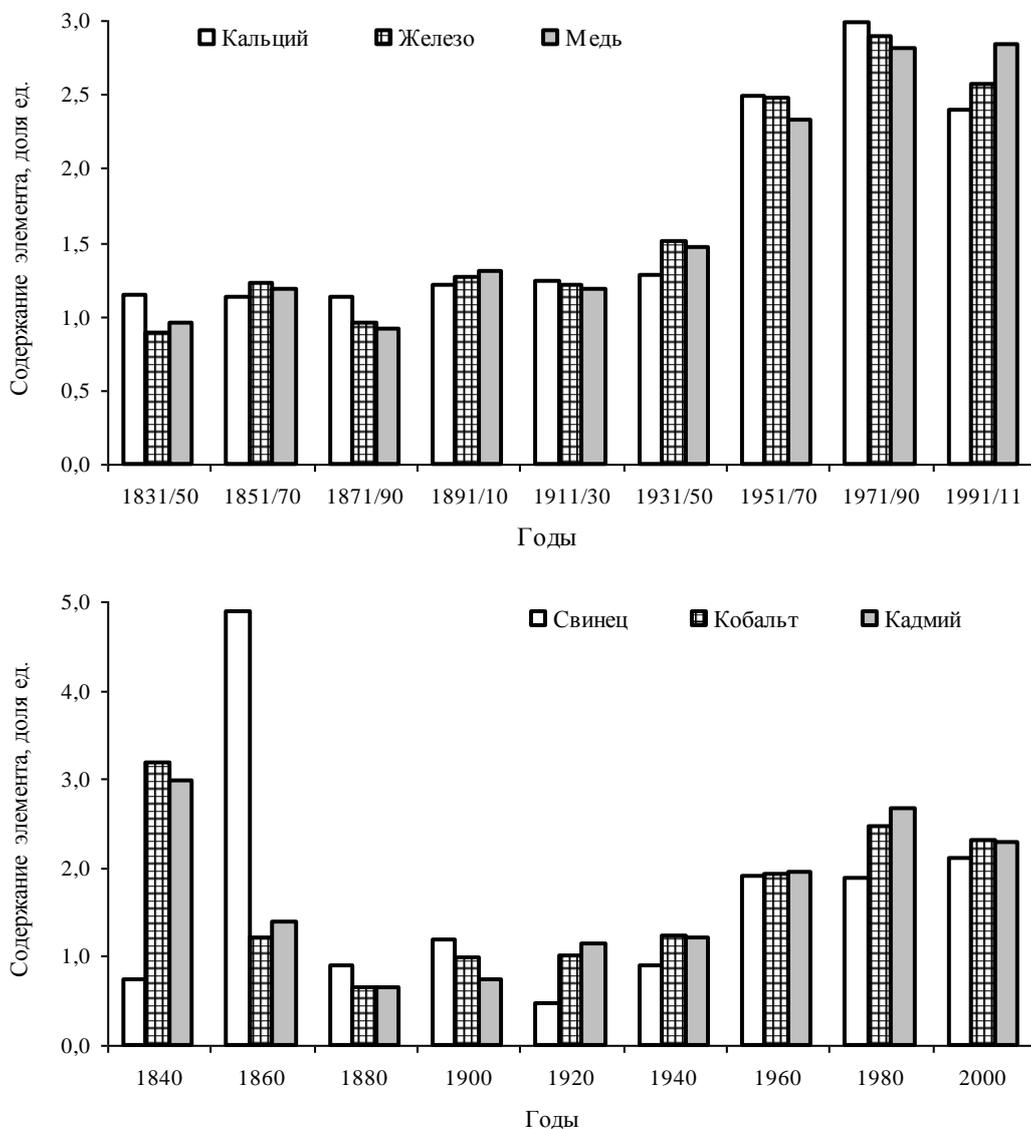


Рис. 1. Динамика относительного содержания зольных элементов в древесине сосен

Установлено, что более всего содержится в древесине кальция (табл. 4), являющегося основой оболочки клеток. За ним следует калий, содержание которого в образцах почти в два раза ниже. На порядок меньше содержится в них марганца, железа и цинка, активно участвующих в процессе метаболизма. Замыкают ранговый ряд по концентрации кобальт, кадмий и никель.

Таблица 4

Изменчивость содержания химических элементов в древесине сосен

Элемент	Значения статистических показателей *					
	M_x	min	max	S_x	m_x	V, %
Зола	0,32	0,23	0,39	0,05	0,012	14,5
Ca	718,4	254,5	1508,4	342,4	88,4	47,7
K	373,0	93,8	876,6	217,5	56,2	58,3
Mn	38,06	12,17	147,20	33,33	8,61	87,6
Fe	17,12	7,94	29,54	6,10	1,57	35,6
Zn	5,72	2,40	10,70	2,57	0,66	44,9
Cu	0,828	0,348	1,338	0,302	0,078	36,5
Sr	0,558	0,000	1,807	0,581	0,150	104,1
Cr	0,377	0,057	0,852	0,284	0,073	75,3
Pb	0,270	0,025	1,811	0,434	0,112	160,9
Co	0,160	0,065	0,526	0,117	0,030	73,0
Cd	0,117	0,040	0,351	0,082	0,021	70,2
Ni	0,107	0,052	0,301	0,064	0,017	60,5

Примечание: содержание золы выражено в %, а остальных элементов - в мг/кг абсолютно сухой массы древесины.

Характер рангового распределения элементов по содержанию их в древесине сосен приозерных биотопов существенно не отличается от других биотопов Республики Марий Эл (Демаков и др., 2010, 2012). Содержание всех зольных элементов, особенно свинца, стронция и марганца, довольно изменчиво. Менее всего варьирует содержание в годичных слоях древесины сосен золы ($V = 14,5\%$), а также железа и меди. Большинство зольных элементов по содержанию их в древесине тесно связано между собой (табл. 5). Особенно тесные связи отмечаются между содержанием в древесине кобальта и кадмия ($r = 0,99$), железа и меди ($r = 0,96$), кальция и цинка ($r = 0,94$). По характеру изменения содержания в образцах древесины все элементы объединяются между собой в три кластера (рис. 2). В первый из них входят четыре тяжелых металла, замыкающие ранговый ряд элементов по их концентрации. Второй кластер является наиболее пред-

ставительным, состоящим из семи элементов. Отдельный кластер, наиболее примыкающий ко второму, составляют зола и свинец.

Таблица 5

Матрица коэффициентов корреляции между содержанием элементов

Элемент	Значения коэффициентов корреляции между элементами										
	Ca	K	Mn	Fe	Zn	Cu	Sr	Cr	Pb	Co	Cd
Ca	1,00										
K	0,76	1,00									
Mn	0,68	0,78	1,00								
Fe	0,86	0,84	0,58	1,00							
Zn	0,94	0,79	0,80	0,85	1,00						
Cu	0,88	0,84	0,57	0,96	0,84	1,00					
Sr	0,81	0,76	0,83	0,62	0,84	0,60	1,00				
Cr	0,67	0,38	0,52	0,47	0,59	0,58	0,38	1,00			
Pb	0,12	-0,12	0,03	0,23	0,17	0,24	-0,22	0,36	1,00		
Co	0,49	0,20	0,15	0,35	0,24	0,42	0,09	0,76	0,19	1,00	
Cd	0,58	0,26	0,22	0,43	0,35	0,50	0,17	0,82	0,24	0,99	1,00
Ni	0,36	0,29	0,31	0,29	0,19	0,33	0,08	0,65	0,04	0,87	0,83

Примечание: жирным шрифтом выделены значения, достоверные при $P = 0,95$.

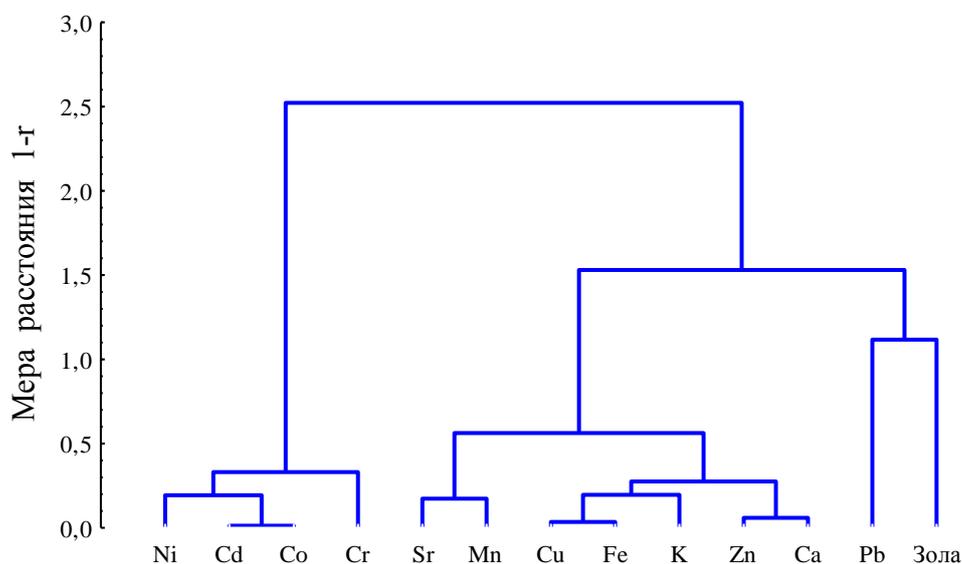


Рис. 2. Дендрограмма сходства динамики содержания зольных элементов в древесине сосен, построенная способом Варда по матрице коэффициентов корреляции

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Более всего содержится в древесине кальция, являющегося основной оболочки клеток. За ним следует калий, содержание которого в образцах почти в два раза ниже. На порядок меньше содержится в них марганца, железа и цинка. Замыкают ранговый ряд по концентрации кобальт, кадмий и никель.

2. Характер рангового распределения элементов по содержанию их в древесине сосен приозерных биотопов существенно не отличается от других биотопов Республики Марий Эл.

3. Содержание всех зольных элементов, особенно свинца, стронция и марганца, довольно изменчиво. Менее всего варьирует содержание в годичных слоях древесины сосен золы, а также железа и меди.

4. Большинство зольных элементов по содержанию их в древесине тесно связано между собой. Особенно тесные связи отмечаются между содержанием в древесине кобальта и кадмия, железа и меди, кальция и цинка. По характеру изменения содержания в образцах древесины все элементы объединяются между собой в три кластера, в первый из которых входят четыре тяжелых металла, замыкающие ранговый ряд элементов по их концентрации. Второй кластер является наиболее представительным, состоящим из семи элементов. Отдельный кластер, наиболее примыкающий ко второму, составляют зола и свинец.

5. Содержание Ca, Fe, Cu, Pb, Co и Cd в древесине различных годичных слоев изменяется в приозерных биотопах синхронно во времени: концентрация первых трех из них неуклонно увеличивается, а трех последних изменяется волнообразно с минимумом в период с 1880 по 1940 годы. Зольность древесины изменяется тоже синхронно и волнообразно с периодом 90-100 лет. Изменение содержания в древесине остальных зольных элементов происходит в каждом биотопе сугубо специфично, но в целом также волнообразно. Особенно резко различается динамика содержания в годичных слоях сосен Zn, Sr, Cr и Ni.

6. Связь зольности древесины и содержания в ней металлов с возрастом деревьев и величиной текущего радиального прироста слабая.

7. Вариабельность содержания зольных элементов в годичных слоях сосен связана как с изменением состояния окружающей среды, так и самих ценозов, в которых происходят циклические процессы отпада деревьев и разложения мертвой органики, отражающиеся на напряженности конкурентных отношений между ними и характере потребления элементов питания.

Список использованной литературы

Адаменко В.Н., Журавлева Е.Л., Четвериков А.Ф. Химический состав годичных колец деревьев и состояние природной среды // Доклады АН СССР. 1982. Т. 265. № 2. С. 507-512.

Битвинская Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 172 с.

Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 245 с.

Демаков Ю.П. Диагностика устойчивости лесных экосистем (методологические и методические аспекты). Йошкар-Ола: «Периодика Марий Эл», 2000. – 415 с.

Демаков Ю.П., Винокурова Р.И., Таланцев В.И., Швецов С.М. Изменчивость содержания зольных элементов в древесине, коре и хвое сосны обыкновенной // Лесные экосистемы в условиях изменяющегося климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: материалы международной конференции [Электронный ресурс]. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. С. 32-37 (<http://csfm.marstu.net/publications.html>).

Демаков Ю.П., Швецов С.М., Таланцев В.И., Калинин К.К. Динамика содержания зольных элементов в годичных слоях старовозрастных сосен, произрастающих в пойменных биотопах // Вестник МарГТУ. Сер. «Лес. Экология. Природопользование». 2011. № 3. С. 25-35.

Демаков, Ю.П., Сафин М.Г., Швецов С.М. Сосняки сфагновые Марийского Полесья: структура, рост и продуктивность. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. 276 с.

Комин Г.Е. Влияние климатических и фитоценологических факторов на прирост деревьев в древостоях // Экология. 1973. № 1. С. 74-83.

Ловеллус Н.В. Изменчивость прироста деревьев (дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий). Л.: Наука, 1979. 230 с.

Методика выполнения измерений валового содержания меди, кадмия, цинка, свинца, никеля, марганца, кобальта, хрома методом атомно-абсорбционной спектроскопии. М.: ФГУ ФЦАО, 2007. 20 с.

Методы определения микроэлементов в почвах, растениях и водах / Под ред. И.Г. Важенина. М.: Колос, 1974. 283 с.

Румянцев Д.Е. Потенциал использования дендрохронологической информации в лесной науке и практике: Автореф. дис.... докт. биол. наук. М., 2011. 36 с.

Четвериков А.Ф. Химический состав годичных слоев прироста деревьев и условия природной среды // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 126-130.

Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.

Рецензенты статьи: доктор сельскохозяйственных наук, профессор Поволжского государственного технологического университета И.А. Алексеев и доктор сельскохозяйственных наук, профессор Уральского государственного лесотехнического университета А.П. Кожевников.