

# БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА НА ПРИМЕРЕ *PINUS SYLVESTRIS L.*

**РЫБАКОВ**  
Дмитрий Сергеевич

Институт геологии Карельского научного центра РАН,  
*rybakovd@krc.karelia.ru*

**Ключевые слова:**  
загрязнение  
тяжелые металлы  
*Pinus sylvestris* L.  
радиальный прирост  
годичные кольца  
плотность древесины

**Аннотация:** Обсуждены данные, свидетельствующие о возможности использования годичных колец деревьев *Pinus sylvestris* L. для оценки химического загрязнения территории Республики Карелия. При помощи метода главных компонент факторного анализа показана связь между содержанием химических элементов и дендрологическими параметрами – шириной годичных колец и плотностью древесины. Основными факторами, способствующими загрязнению северной части Республики Карелия выбросами железорудного комбината ОАО «Карельский окатыш», являются: повторяемость экологически значимых направлений ветра, расстояние от источника и общее количество выброшенных загрязнителей. Величина радиального прироста (ширина годичных колец по пятилетиям) *Pinus sylvestris* L. имеет отрицательную статистическую связь с содержанием Cu, Cd, Ni и Fe. Mn, являясь элементом питания, в том числе в северных ареалах в антагонизме с Fe и, частично, с Cr, положительно коррелирует с плотностью древесины. Ряд пиков содержания Pb совпадает со временем наиболее интенсивных испытаний атомного оружия. Резкие максимумы Pb могут быть также следствием трансграничных загрязнений и выбросов из региональных источников.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент В. В. Гавриленко

Получена: 15 января 2016 года

Подписана к печати: 19 мая 2016 года

## Введение

Большое внимание привлекает информация о химическом и радиоактивном загрязнении окружающей среды, зафиксированная в годичных кольцах деревьев. О. А. Неверовой (2004, 2010) получены данные о снижении интенсивности фотосинтеза у различных пород деревьев (сосны, ели, липы, березы, сирени, рябины) в городских районах с высокой степенью загрязнения. Снижение интенсивности фотосинтеза и связанного с ним количества органического вещества у растений, в свою

очередь, является причиной уменьшения годичного прироста деревьев, причем у хвойных пород в большей степени, чем у лиственных.

Другими авторами (Алексеев, Сорока, 2002 и др.) отмечено, что локальное, региональное и глобальное загрязнение, замедляя интенсивность процесса фотосинтеза у древесных растений, действует в противоположном направлении эффекту потепления климата и увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере.

Т. В. Черненькова (2002) упоминает несколько известных путей поступления

химических элементов и соединений в соудистые растения, основными из которых являются корневое питание, газообмен и обменная адсорбция на поверхности листовой пластинки. Для корней растений наиболее доступны микроэлементы, адсорбированные на глинистых минералах, тогда как фиксированные на оксидах и связанные микроорганизмами оказываются менее доступными (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). В условиях повышенного техногенного загрязнения (город) обогащение древесных растений тяжелыми металлами (ТМ) осуществляется в основном атмосферным путем, так как высокий уровень загрязнения почв вызывает подавление биологического поглощения по сравнению с фоном для широкого спектра элементов (Неверова, 2004). В целом, по опубликованным данным, вместе с пылью на поверхности листьев вблизи источника может оседать около 30 % от общего количества ТМ. В понижениях и с наветренной стороны это количество может возрастать до 60 %. По мере удаления от источника роль атмосферного загрязнения заметно уменьшается (Лозановская и др., 1998; Садовникова и др., 2006).

В любых растениях происходят различные метаболические и неметаболические процессы, обусловливающие поступление, перемещение, накопление, взаимодействие и вынос во внешнюю среду различных микроэлементов (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989 и др.). Не являются исключением и деревья, использование которых для изучения загрязнения окружающей среды, как полагают, сопряжено с некоторыми условностями, связанными с их физиологией, минеральным питанием и передвижением вещества в древесине (Хантемиров, 1992; Cutter, Guyette, 1993; Хантемиров, 1996 и др.).

Загрязнение ТМ и S различных объектов растительного мира на территории Республики Карелия исследовалось рядом авторов (Лазарева и др., 1992; Дьяконов и др., 1996; Федорец и др., 1998 и др.). Нами (Рыбаков и др., 1997; Рыбаков, 1999; Рыбаков, 2000 и др.) показано, что годичные кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) хорошо фиксируют поступающие в древесину деревьев химические элементы, в том числе радионуклиды и ТМ. Основными источниками техногенного загрязнения Республики Карелия в разные

периоды являлись: глобальные радиоактивные выпадения (Рыбаков и др., 1997 и др.), трансграничные и межрегиональные переносы (Федорец и др., 1998; Иешко, Титов, 2002; Elvingson, Ågren, 2004), региональные выбросы от промышленных предприятий (ОАО «Карельский окатыш», ОАО «Сегежабумпром», ОАО «Кондопога», ОАО «СУАЛ» филиал «Надвоицкий алюминиевый завод»), объектов теплоэнергетики, жилищно-коммунального комплекса и передвижных источников – автотранспорта (Государственный доклад..., 1998 и др.).

Линейный корреляционный анализ показывает отрицательную связь между усредненной по пятилетиям шириной годичных колец (радиальным приростом древесины) *Pinus sylvestris* L. и содержанием в них Cr и, в меньшей степени, Pb (Рыбаков, 2002). Однако небольшой набор химических элементов и выбранный статистический метод недостаточны для более полного определения вероятного воздействия ТМ на дендрологические параметры. В настоящей работе эти проблемы решаются на основании расширения списка используемых элементов (архивные данные за период 1952–2001 гг.) и применения метода главных компонент факторного анализа.

## Материалы

Изучались древесные керны *Pinus sylvestris* L., образцы которых собраны в различных частях Карелии, в древостоях, произрастающих на песчаных и супесчаных почвах в условиях средней и северной тайги, на территориях с различной техногенной нагрузкой (рис. 1). Керны диаметром 0.5 см отбирались в период с 12 сентября по 5 октября 2001 г. с помощью бурава Пресслера на высоте 30 см от комля, высушивались в помещении при комнатной температуре. Всего изучено 13 деревьев возраста 50–150 лет, из них 5 деревьев 50–60 лет и 8 деревьев 80–150 лет. Для исследования отбирались годичные кольца, соответствующие последним 50 годам жизни деревьев.

## Методы

В отобранных кернах методом рентгеновского анализа определялись ширина годичных колец и плотность древесины.

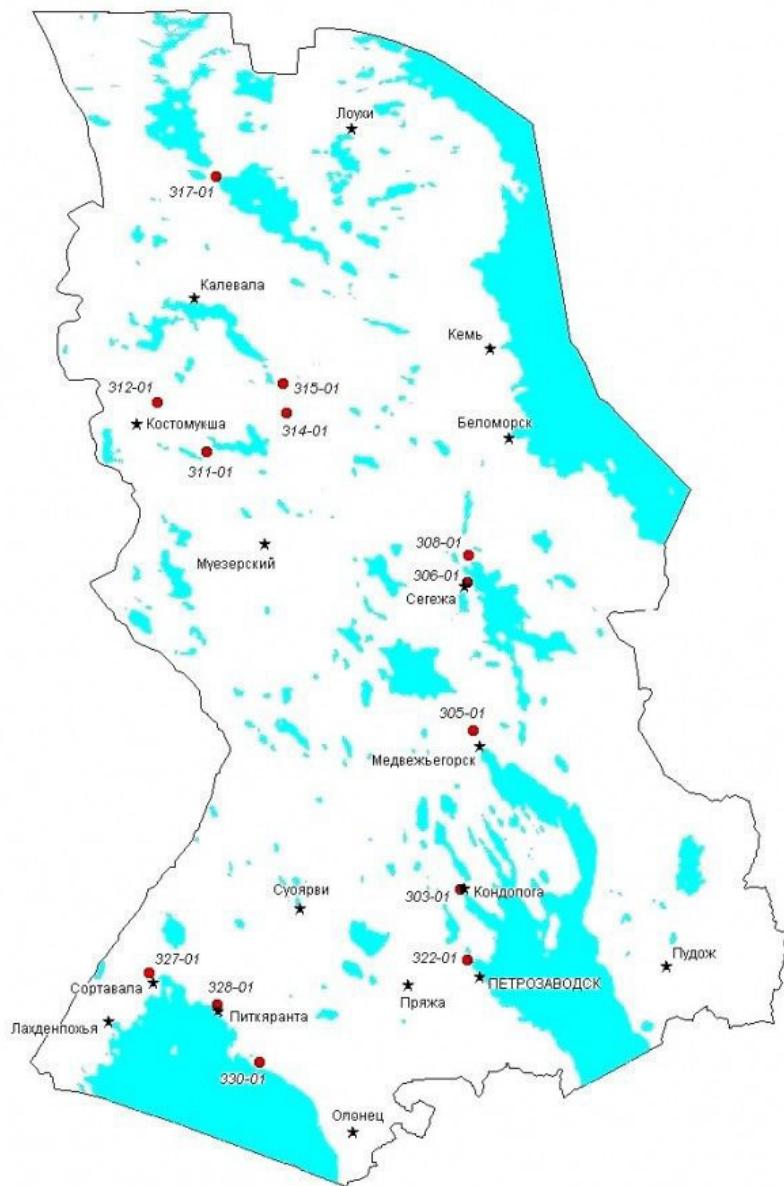


Рис. 1. Точки отбора древесных кернов *Pinus sylvestris* L.

Fig. 1. Sampling points of *Pinus sylvestris* L. tree cores

После этого материал подвергался автоклавному разложению в кислоте по разработанной схеме (Козлов и др., 2001), и методом атомной абсорбции (приборы Квант ЭТ и С-115) в годичных кольцах определялось содержание химических элементов. Всего методом атомной абсорбции выполнено 130 определений содержания Cr и Pb, 128 – Cd, Ni, Mn, Fe, Cu, Zn.

С целью получения достаточного количества вещества для химического определения (не менее 60–70 мг) пробы готовились при помощи усреднения материала 5 смежных годичных колец. Во внимание

бралось также то, что проведение анализа по пятилетиям позволяет сгладить эффект «размывания» содержания некоторых подвижных в ксилемном соке химических элементов из-за влияния уровня загрязнения последующих лет, в течение которых годичное кольцо остается активным (Хантемиров, 1996). Степень потенциальной подвижности некоторых элементов приведена Cutter и Guyette (1993) на основе растворимости, отношения заряда иона к радиусу и свойств элементов. В частности, из элементов, используемых в настоящей работе, к проявляющим слабую подвижность отно-

сятся Fe, Ni, Pb и Cd, к умеренно мобильным – Mn, Zn и Cu.

Для учета возможного влияния на изучаемые дендрологические параметры и устанавливаемые связи меняющихся метеорологических условий для каждого пятилетия рассчитывались: средние значения температуры воздуха, суммарное количество атмосферных осадков и повторяемость экологически значимого (от источника выбросов загрязняющих веществ) направления ветра. Исходные данные брались на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных <http://meteo.ru> (Специализированные..., 2016).

По известным формулам расчета асимметрии и эксцесса (Войткевич и др., 1990) проверялось соответствие распределения используемых значений ширины годичных колец, плотности древесины и содержания химических элементов нормальному и логнормальному законам. Для сравнения выборок использовались медианные значения. При проведении корреляционного и факторного анализов статистически аномальные наблюдения исключались из рассмотрения с учетом выбранного закона распределения по «правилу трех сигм». Полученные значения сравнивались

с табличными данными (Большев, Смирнов, 1983). Статистические расчеты осуществлялись с помощью пакета «Анализ данных» программы Microsoft Excel и программы STATGRAPHICS Plus 5.0.

## Результаты

В табл. 1 представлены данные о содержании ТМ в годичных кольцах, ширине годичных колец ( $D_5$ ) и плотности древесины ( $p_5$ ), полученные в ходе настоящих исследований для *Pinus sylvestris* L. на территории Республики Карелия. Повышенное содержание ТМ (кроме Mn) в годичных кольцах разных пятилетних периодов, а также заметные различия средних арифметических и медианных значений (прежде всего, содержания Pb и Cu) объясняются указанными выше причинами загрязнения территории, в том числе приближением мест произрастания деревьев к крупным стационарным источникам выбросов. Кроме того, эти различия связываются с наличием единичных статистически аномальных (трехсигмовых) значений содержания Pb, Cr, Zn и Cd, определенных в разных пространственно-временных координатах и требующих интерпретации в будущем на большем статистическом материале.

Таблица 1. Содержание ТМ (мг/кг воздушно-сухой навески), ширина годичных колец (мм) и плотность древесины (кг/м<sup>3</sup>) в деревьях *Pinus sylvestris* L. за период 1952–2001 гг.

Table 1. Heavy metals content (mg/kg air-dried sample), width of the annual rings (mm) and wood density (kg/m<sup>3</sup>) in *Pinus sylvestris* L. trees in the period 1952–2001

	Mn	Cr	Pb	Cd	Ni	Fe	Cu	Zn	$D_5$	$p_5$
Общая выборка (13 кернов)										
Среднее	33.24	2.25	4.58	1.53	3.30	37.51	5.10	12.36	1.90	464.7
Медиана	30.40	1.55	0.80	1.20	2.90	25.85	2.35	9.15	1.73	459.0
Стандартное отклонение	21.958	2.531	22.45	1.253	1.552	34.30	6.598	14.62	1.032	56.36
Минимум	2.40	0.27	0.03	0.20	следы	5.50	0.60	1.70	0.46	343.0
Максимум	92.9	23.0	250.4	8.30	9.10	171.9	39.8	127.4	6.42	646.0
Число анализов (n)	128	130	130	128	128	128	128	128	129	129
Деревья возраста 50–60 лет (n = 47)										
Среднее	29.26	1.63	0.68	0.84	2.87	16.63	2.73	13.10	2.58	449.3
Медиана	25.80	0.99	0.37	0.70	2.20	12.20	1.70	7.90	<b>2.42</b>	445.0
Стандартное отклонение	24.174	3.288	0.814	0.370	1.699	12.668	3.226	21.454	1.175	54.63
Минимум	2.40	0.27	0.05	0.20	0.80	5.50	0.60	1.70	0.72	354.0
Максимум	92.9	23.0	3.52	1.90	9.10	61.7	16.6	127.4	6.42	610.0

Таблица 1. Продолжение

	Mn	Cr	Pb	Cd	Ni	Fe	Cu	Zn	D <sub>5</sub>	p <sub>5</sub>
Деревья возраста 80–150 лет (n = 80)										
Среднее	35.53	2.66	7.04	1.95	3.57	50.05	6.54	12.01	1.48	474.0
Медиана	<b>32.90</b>	<b>2.03</b>	<b>1.71</b>	<b>1.50</b>	<b>3.30</b>	<b>38.05</b>	<b>3.70</b>	<b>10.10</b>	1.39	<b>470.0</b>
Стандартное отклонение	20.490	1.928	28.403	1.404	1.403	37.055	7.635	8.637	0.677	55.971
Минимум	3.70	0.30	0.03	0.60	0.50	8.70	0.80	4.20	0.46	343.0
Максимум	90.2	10.53	250.4	8.30	7.80	171.9	39.8	77.9	3.12	646.0
Северные ареалы, возраст 80–150 лет (n = 50)										
Среднее	38.50	2.91	5.24	1.56	3.44	45.71	7.24	13.32	1.30	485.9
Медиана	<b>35.80</b>	<b>2.45</b>	<b>2.12</b>	1.30	3.20	37.35	3.45	<b>11.05</b>	1.22	<b>480.0</b>
Стандартное отклонение	20.179	1.881	8.350	0.808	1.092	30.620	8.829	10.531	0.608	53.513
Минимум	13.2	0.3	0.03	0.6	1.3	11.4	0.8	4.2	0.46	385.0
Максимум	90.2	8.22	40.48	5.0	6.6	171.9	39.8	77.9	2.65	609.0
Южные ареалы, возраст 95–120 лет (n = 30)										
Среднее	30.58	2.24	10.03	2.59	3.80	57.27	5.36	9.81	1.78	454.1
Медиана	21.40	1.67	1.10	<b>1.65</b>	<b>3.60</b>	<b>43.15</b>	<b>4.55</b>	9.60	<b>1.57</b>	457.0
Стандартное отклонение	20.374	1.963	45.443	1.890	1.807	45.495	4.980	2.802	0.687	55.155
Минимум	3.70	0.57	0.08	0.80	0.50	8.70	0.90	6.10	0.92	343.0
Максимум	70.9	10.53	250.4	8.30	7.80	170.5	23.2	16.7	3.12	646.0

На распределение ТМ по годичным кольцам *Pinus sylvestris* L. и величину дендрологических параметров влияют возраст и географическое положение опробованных деревьев (см. табл. 1).

Из табл. 1 видно, что старые деревья *Pinus sylvestris* L., имея меньший прирост годичных колец в течение изученного 50-летнего периода, в большей степени насыщались ТМ (отношение медиан содержания ТМ в старых и более молодых деревьях): Pb(4.62)–Fe(3.12)–Cu(2.18)–Cd(2.14)–Cr(2.05)–Ni(1.50)–Zn(1.28)–Mn(1.28). Как средние, так и медианные значения плотности древесины в группах старых и более молодых деревьев отличаются незначительно (в пределах 5–6 %).

Сравнение старых экземпляров сосен северных и южных ареалов (см. табл. 1) разделяет элементы на две группы: Pb–Cr–Zn, Mn и Cu–Cd–Fe–Ni. Последовательный ряд отношений медиан содержания ТМ северных и южных образцов выглядит следующим образом: Pb(1.94)–Mn(1.67)–Cr(1.47)–Zn(1.15)–Ni(0.89)–Fe(0.87)–Cd(0.79)–Cu(0.76).

В табл. 2 приведены матрицы факторных нагрузок, полученные для 13 об-

разцов за весь изучаемый временной период за исключением 8 проб, в которых обнаружены статистически аномальные (трехсигмовые) значения содержания Pb, Cr, Zn и Cd. Общая выборка составила 119 значений содержания или логарифмов содержания (при логнормальном распределении) 8 ТМ, а также дендрологических параметров – ширины годичных колец и плотности древесины, усредненных по пятилетним частям кернов.

Результаты факторного анализа, представленные в табл. 2, показали, что основными элементами, значения логарифмов содержания которых имеют отрицательную статистическую связь со значением IgD<sub>5</sub> (фактор I, полученный после вращения факторов) являются Cu, Cd, Fe и Ni. При этом если Cu и Fe обычно причисляют к микроэлементам минерального питания, жизненно необходимым и незаменимым для растений (при высоких концентрациях Си токсична) (Ваганов, Круглов, 2007), то Cd к таким элементам не относят (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Благотворное или угнетающее действие Ni на рост растений зависит от его концентрации (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Таблица 2. Матрицы факторных нагрузок, рассчитанных для выявления статистической связи между содержанием элементов и дендрологическими параметрами *Pinus sylvestris* L. за период 1952–2001 гг. (n = 119)

Table 2. Matrix of factor loadings, designed to detect a statistical relationship between the contents of elements and wood parameters of *Pinus sylvestris* L. in the period 1952–2001 (n = 119)

Значения	Матрица до вращения			Матрица после варимаксного вращения		
	Фактор I	Фактор II	Фактор III	Фактор I	Фактор II	Фактор III
Mn	0.10	<b>-0.76</b>	-0.28	-0.08	0.28	<b>0.76</b>
IgCr	<b>0.69</b>	-0.23	0.44	0.37	<b>0.76</b>	-0.08
IgPb	0.43	-0.50	0.47	0.05	<b>0.80</b>	0.09
IgCd	<b>0.87</b>	0.17	-0.06	<b>0.85</b>	0.27	-0.05
IgNi	<b>0.77</b>	0.24	-0.05	<b>0.77</b>	0.19	-0.11
IgFe	<b>0.80</b>	0.26	-0.01	<b>0.80</b>	0.23	-0.15
IgCu	<b>0.71</b>	0.23	-0.48	<b>0.86</b>	-0.12	0.18
IgZn	<b>0.52</b>	<b>-0.50</b>	0.15	0.24	<b>0.63</b>	0.32
IgD <sub>5</sub>	<b>-0.82</b>	-0.03	0.10	<b>-0.77</b>	-0.30	-0.09
p <sub>5</sub>	0.04	<b>-0.60</b>	<b>-0.57</b>	0.02	-0.04	<b>0.83</b>
d <sub>f</sub> , %	41.0	17.0	10.9			

Примечания. 1. df – вклад i-го фактора в общую дисперсию. 2. Полужирным шрифтом выделены значения факторных нагрузок >0.50.

Notes. 1. df – the contribution of the i-th factor to the total dispersion. 2. Boldface denotes the value of factor loadings >0.50.

Отмечается (Ваганов, Круглов, 2007), что между зольностью древесины и шириной годичных колец установлена отрицательная корреляционная зависимость с весьма высоким коэффициентом корреляции ( $r = -0.80$ ). Это, по мнению указанных авторов, означает, что в благоприятные годы, когда создаются оптимальные условия для роста деревьев и синтез органических веществ осуществляется в больших объемах, увеличение ширины годичных колец происходит в основном вследствие накопления органических веществ. В ряде исследований на деревьях, произрастающих на северном пределе их распространения, обнаружена положительная корреляционная связь зольности с такими используемыми в настоящем исследовании элементами, как Mn ( $r = 0.88$ ) и Fe ( $r = 0.49$ ). Таким образом, в годы, благоприятные для роста древесных растений на полярном пределе их существования, одновременно с уменьшением зольности и увеличением ширины годичных колец уменьшается содержание в них, наряду с некоторыми другими элементами, также Mn и Fe. Менее тесно ширина годичных колец связана, например, с содержанием Cu (Ваганов, Круглов, 2007), что не согласуется с результатами наших расчетов (см. табл. 2). Кроме того, в отличие от

представленных литературных данных, содержание Mn в годичных кольцах совершенно не связано с приростом *Pinus sylvestris* L., но отчетливо связано с плотностью древесины (см. табл. 2).

При варимаксном вращении Pb, Cr и Zn образуют собственный фактор (II), что согласуется с различием медианных значений содержания этих элементов в годичных кольцах старых деревьев *Pinus sylvestris* L. из северных и южных ареалов (см. табл. 1).

Факторный анализ, проведенный для 5 образцов кернов *Pinus sylvestris* L. из северных районов Республики Карелия (см. рис. 1), подтвердил отрицательную статистическую связь между приростом годичных колец изученных деревьев и содержанием элементов группы Cu–Cd–Ni–Fe (фактор I в табл. 3). Загрязнение ТМ, с одной стороны, может быть связано с трансграничными переносами в результате развития производства цветных металлов в Западной Европе в 1960–1970-е гг. Только в середине 1970-х годов стали использоваться электростатические фильтры и тканевые уловители, которые позволили достичь первого значительного сокращения выбросов опасных элементов (Pacyna, 1996; ESPREME, 2007). С другой стороны, загрязнение также связывается с деятельностью

ОАО «Карельский окатыш» с момента введения в эксплуатацию в 1982 г. Костомукшского ГОКа (обр. 311–01, 312–01 и 314–01 на рис. 2). Так, очевидность воздействия выбросов горно-обогатительного комбината на участок отбора образца 311–01, расположенный в 40 км к юго-востоку от данного источника, доказывается связью с количеством выбросов твердых веществ и по-

вторяемостью северо-западного направления ветра (табл. 4). Аналогичная связь с ветровым режимом для 20-летнего периода работы Костомукшского ГОКа наблюдается и для остальных образцов (см. рис. 2). Вместе с тем интенсивность загрязнения различается, в том числе из-за разницы в расстояниях от источника выбросов.

Таблица 3. Результаты факторного анализа для *Pinus sylvestris* L. за период 1952–2001 гг.  
(Север, возраст деревьев 80–100 лет; n = 49)

Table 3. The results of the factor analysis of *Pinus sylvestris* L. for the period 1952–2001 (North, tree age 80–100 years; n = 49)

Значения	Матрица до вращения				Матрица после варимаксного вращения			
	Фактор I	Фактор II	Фактор III	Фактор IV	Фактор I	Фактор II	Фактор III	Фактор IV
Mn	0.09	<b>0.79</b>	0.32	0.00	0.28	0.50	<b>-0.54</b>	0.34
lgCr	-0.30	0.18	<b>-0.56</b>	-0.42	0.11	0.28	<b>0.65</b>	0.32
lgPb	0.25	<b>0.58</b>	-0.25	0.18	-0.07	<b>0.69</b>	-0.15	0.01
lgCd	<b>-0.80</b>	0.27	-0.07	-0.09	<b>0.77</b>	0.10	0.34	0.10
lgNi	<b>-0.68</b>	0.20	0.16	0.07	<b>0.73</b>	-0.02	0.08	-0.02
lgFe	<b>-0.73</b>	-0.39	-0.25	-0.16	0.42	-0.35	<b>0.69</b>	-0.10
lgCu	<b>-0.80</b>	0.11	0.44	0.19	<b>0.90</b>	-0.22	-0.10	-0.11
lgZn	0.09	<b>0.58</b>	<b>-0.51</b>	-0.17	-0.05	<b>0.71</b>	0.24	0.28
lgD <sub>5</sub>	<b>0.82</b>	-0.33	-0.18	-0.06	<b>-0.90</b>	-0.05	-0.09	-0.03
p <sub>5</sub>	0.44	0.29	<b>0.61</b>	-0.05	-0.11	-0.01	<b>-0.75</b>	0.29
lg(T+10)	-0.08	-0.44	0.44	-0.49	-0.01	<b>-0.71</b>	-0.02	0.37
lgP	-0.15	-0.32	-0.25	<b>0.74</b>	0.03	0.01	0.13	<b>-0.84</b>
d <sub>f</sub> . %	<b>27.8</b>	<b>17.6</b>	<b>14.1</b>	<b>9.2</b>				

Примечания. Рассчитанные по пятилетиям с использованием данных метеостанции «Калевала» (Специализированные..., 2016): Т – средняя температура воздуха (для ухода от отрицательных величин при логарифмировании все значения увеличены на 10); Р – суммарное количество осадков (по скорректированным данным).

Notes. Calculated by five-years by using the data from the meteorological station «Kalevala» (Specialized... , 2016 ): Т – average air temperature (to avoid negative values when taking the logarithm, all the values were increased by 10); Р – total amount of precipitation (according to adjusted data).

По расчетам с использованием данных метеостанции «Калевала» среднепятилетняя температура воздуха в районе отбора образцов в северной части Республики Карелия в изученный период 1952–2001 гг. колебалась в пределах от -0.22 до +1.17 °C (медианное значение +0.64 °C). Общее количество осадков (по скорректированным значениям) составило за 50 лет около 26440 мм и колебалось по пятилетиям от 2411.5 до 2839.8 мм. При этом табл. 3 практически не показывает связи между этими естественными факторами и приростом годичных колец деревьев в исследованных загрязненных районах в наблюдаемый 50-летний период.

Антагонизм Mn с Fe и Cr (фактор III после вращения – см. табл. 3) связан с различиями плотности древесины. Фактор II после варимаксного вращения формируется в основном положительными факторными нагрузками на Zn, Pb и Mn и отрицательной – на значение температуры воздуха. Следует отметить, что «искажение» факторных структур (см. табл. 2, 3) может быть следствием довольно частых резких пиков содержания некоторых элементов. Например, это касается Pb, значительный рост содержания которого в ряде случаев точно совпадает с периодами выпадения радиоактивных изотопов, образовавшихся в ходе испытаний атомного оружия в 1950–1970-х гг. (рис. 3).

Таблица 4. Содержание ТМ, ширина годичных колец *Pinus sylvestris* L., повторяемость северо-западного направления ветра (СЗ 300–320°) и количество выбросов твердых веществ (Мтв5) и диоксида серы (Ms5) от железорудного ГОКа по пятилетним периодам

Table 4. Heavy metals content, width of the annual rings of *Pinus sylvestris* L., repeatability of the north-west (NW 300–320°) wind direction and emissions of particulate matter (Mpm5) and sulfur dioxide (Ms5) from Iron Ore Processing Combine for five-year periods

Периоды	1982–1986	1987–1991	1992–1996	1997–2001
Cu	21.9	32.9	39.8	28.4
Cd	2	1.5	2.2	1.7
Ni	4.7	4.2	5.2	4.4
Fe	19.9	34.2	86.2	28.2
Zn	7.8	8.3	10.2	9.3
D <sub>5</sub> , мм	0.54	0.65	0.56	0.96
NW <sub>5</sub> , %	8.04	8.16	11.2	7.09
Mтв5, т	4574.2	4938.6	5622.8	6495.0
Ms <sub>5</sub> , т	39151.2	60514.8	50714.0	32921.0

Примечание. Данные по выбросам загрязняющих веществ по: Оценка воздействия..., 2002.  
Note. Data on emissions of pollutants by: Impact Assessment..., 2002 (rus).

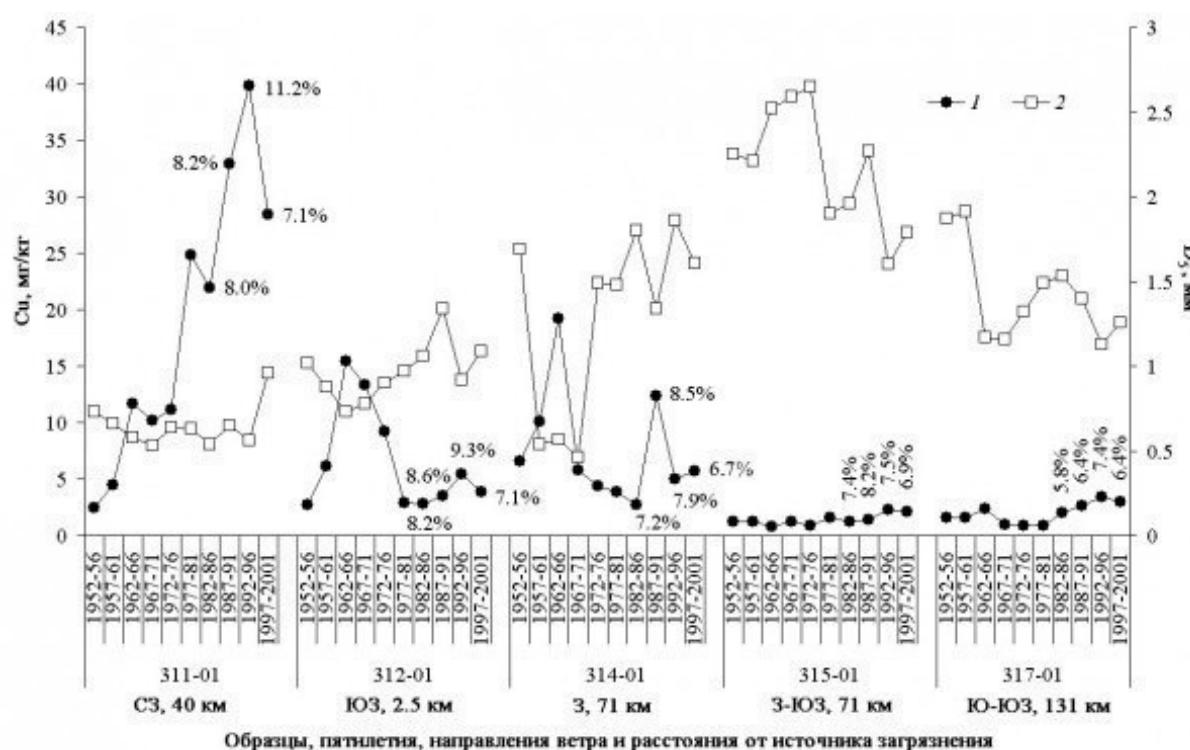


Рис. 2. Содержание Cu в годичных кольцах и радиальный прирост *Pinus sylvestris* L. на севере Республики Карелия в период 1952–2001 гг.: 1 – содержание Cu; 2 – ширина годичных колец (D5); СЗ, 40 км... – направления ветра в створе 20° (экологически значимое) и расстояние от источника загрязнения; в % приведены средние за пятилетия повторяемости экологически значимых направлений ветра (за период работы Костомукшского ГОКа в 1982–2001 гг.)

Fig. 2. Cu content in the annual rings and radial growth of *Pinus sylvestris* L. in the North of the Republic of Karelia from 1952 to 2001: 1 – Cu content, 2 – width of the annual rings (D5); NW at 40 km... – wind direction in the alignment of 20° (environmentally significant) and the distance from the source of air pollution; the average five-year repeatability of environmentally significant wind directions given in % (during the period of activity of the Kostomuksha Mining Processing Combine from 1982 to 2001)

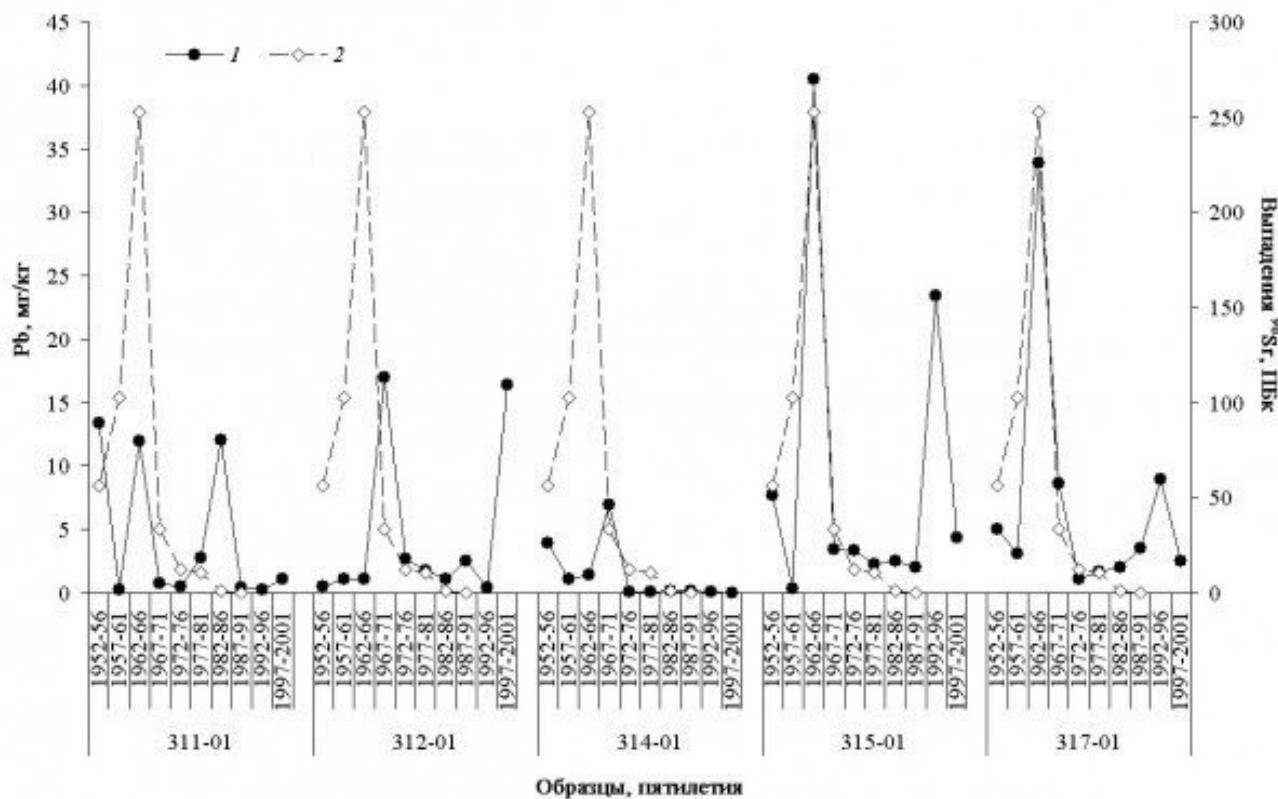


Рис. 3. Содержание Pb в годичных кольцах *Pinus sylvestris* L. на севере Республики Карелия в период 1952–2001 гг. и радиоактивные выпадения в Северном полушарии (по  $^{90}\text{Sr}$ ): 1 – содержание Pb, 2 – выпадения  $^{90}\text{Sr}$  (по: Sources and Effects..., 2000)

Fig. 3. Content of Pb in annual rings of *Pinus sylvestris* L. in the North of the Republic of Karelia during the period 1952–2001 and radioactive depositions in Northern Hemisphere (by  $^{90}\text{Sr}$ ): 1 – content of Pb, 2 –  $^{90}\text{Sr}$  deposition (by Sources and Effects..., 2000)

Ранее (Рыбаков и др., 1997; Рыбаков, 2000) с помощью локального лазерного спектрометрического анализа в годичных кольцах *Pinus sylvestris* L. из Медвежьегорского района, соответствующих времени испытаний ядерного оружия, выпадения радионуклидов (Моисеев, Иванов, 1990; Sources and Effects..., 2000) и Чернобыльской катастрофы, обнаружены U, Ra, Ac, Ru, Pa, Tc, Pb, Bi, Sr и другие элементы. Наличие повышенного содержания Pb в искомых годичных кольцах частично может быть следствием распада тяжелых радионуклидов с различными периодами полураспада, поступивших из тропосферных и глобальных выпадений.

Очевидно, что в каждом пятилетии мы имеем дело с суммарным содержанием Pb из различных источников – природных и техногенных. Так, согласно историческим трендам за период 1955–1990 гг. (Расуна, 1996), максимальные ежегодные выбросы Pb в Европе – порядка 150–160 тыс. тонн – приходятся на 1970-е гг. Постепенно снижаясь, уже к 1990 г. эти выбросы оценивались примерно в 60 тыс. тонн в год.

Причины увеличения содержания Pb в годичных кольцах *Pinus sylvestris* L. в 1990-е гг. (обр. 312–01, 315–01 и 317–01 на рис. 3), а также постоянно наблюдаемой необычной для растений (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989) положительной корреляции его содержания с содержанием Zn (см. табл. 2, 3) точно не определены. Так, поступление ТМ в растения может быть связано, помимо фолиарного поглощения, еще и с увеличением кислотности почв за счет техногенных выбросов соединений S. Это, в свою очередь, предполагает рост содержания подвижных доступных растениям форм токсикантов, имеющих иной источник, например, для Pb – транспорт в условиях придорожного ландшафта (обр. 315–01 и 317–01). Ориентировочно можно отметить, например, что выбросы загрязняющих веществ от автотранспорта в Карелии составили (Государственный доклад..., 1993, 2002 и др.) в 1992 г. около 91 тыс. т, в

1993 г. – 63.2 тыс. т, всего за 1992–1996 гг. – 288.4 тыс. т, в то время как за 1997–2001 гг. – 219.1 тыс. т (на 24 % меньше, чем за предыдущее пятилетие). Вместе с тем в дальнейших исследованиях следует учитывать также особенности взаимоотношений совместно присутствующих химических элементов, в частности антагонизм Pb и S в растениях (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

## Заключение

Учет естественных параметров, таких как возраст деревьев, географическое положение мест произрастания, погодно-климатические характеристики (температура воздуха, количество осадков и повторяемость направлений ветра), позволил с достаточной статистической достоверностью выявить связь между загрязнением окружающей среды и повышенным содержанием ТМ в годичных кольцах изученных экземпляров *Pinus sylvestris* L. При этом радиальный прирост (ширина годичных колец) деревьев связан обратной статистической зависимостью с содержанием Cu, Cd, Ni и Fe, а не с температурой или количеством осадков.

На плотность древесины оказывают влияние возраст деревьев и их географическое положение. Наибольшие ее значения фиксируются в старых деревьях и деревьях, произрастающих в северной части Республики Карелия. Вместе с тем при помощи факторного анализа показано, что более плотные годичные кольца *Pinus sylvestris* L. содержат больше Mn, а в северных ареалах также меньше Fe и Cr.

## Библиография

- Алексеев А. С., Сорока А. Р. Рост насаждений сосны обыкновенной на Северо-Западе Кольского полуострова в связи с возможными региональными изменениями окружающей среды // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: Материалы международной конференции. Архангельск: Институт экологических проблем Севера УрО РАН, 2002. С. 273–278.
- Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики . М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 416 с.
- Ваганов Е. А., Круглов В. Б. Экология древесных растений: Курс лекций . Красноярск, 2007. 230 с.
- Войтекевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г. Справочник по геохимии . М.: Недра, 1990. 480 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1992 году . Петрозаводск: Министерство экологии и природных ресурсов Республики Карелия, 1993. 63 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1997 году . Петрозаводск: Государственный комитет охраны окружающей среды по Республике Карелия, 1998. 220 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 2001 году . Петрозаводск: Комитет природных ресурсов по Республике Карелия, 2002. 240 с.

Присутствие Pb в годичных кольцах *Pinus sylvestris* L. может иметь несколько причин. Однако часть пиков содержания этого металла точно совпадает с периодом наиболее интенсивных испытаний атомного оружия в 1950–1970-х гг. Это согласуется с предположением о появлении определенных количеств Pb в древесине *Pinus sylvestris* L. за счет распада некоторых тяжелых радиоактивных элементов (наличие радиоактивного загрязнения вследствие атмосферных выпадений показано ранее на примере *Pinus sylvestris* L. в Медвежьегорском районе Республики Карелия). Вместе с тем в этом контексте пока не очень ясна роль Zn, который проявляет положительную, а не как обычно для растений отрицательную корреляцию со Pb.

Таким образом, несмотря на ряд трудностей в интерпретации полученных данных, можно подтвердить, что использование годичных колец повсеместно произрастающей в Республике Карелия *Pinus sylvestris* L. вносит значительный вклад в исследование пространственно-временной динамики загрязнения окружающей среды региона.

Работа выполнена на основе собственных архивных аналитических материалов в рамках темы НИР № 207 «Пространственно-временная динамика природного и техногенного преобразования окружающей среды, изменение климата и эволюция биоты в регионе Юго-Восточной Фенноскандии» в Институте геологии Карельского научного центра РАН.

- Дьяконов В. В., Козлов В. А., Коржицкая З. А. Оценка загрязнения тяжелыми металлами и серой лесных экосистем Республики Карелия // Проблемы антропогенной трансформации лесных биоценозов Карелии. Петрозаводск, 1996. С. 167–182.
- Иешко Е. П., Титов А. Ф. Основные тенденции изменения состояния окружающей природной среды в Республике Карелия // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: Материалы международной конференции. Архангельск: Институт экологических проблем Севера УрО РАН, 2002. С. 12–16.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. . М.: Мир, 1989. 439 с.
- Козлов В. А., Кистерная М. В., Клеманский Ю. М. и др. Аналитическое обеспечение мониторинга лесных экосистем // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 278–285.
- Лазарева И. П., Кучко А. А., Кравченко А. В. и др. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов северной Карелии . Петрозаводск, 1992. 52 с.
- Лозановская И. Н., Орлов Д. С., Садовникова Л. К. Экология и охрана биосфера при химическом загрязнении: Учебное пособие для вузов . М.: Высш. шк., 1998. 287 с.
- Моисеев А. А., Иванов В. И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. 4-е изд., перераб. и доп. . М.: Энергоатомиздат, 1990. 252 с.
- Неверова О. А. Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города (на примере г. Кемерово): Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук . М., 2004. 37 с.
- Неверова О. А., Цандекова О. Л. Фотосинтетическая способность древесных растений как индикатор суммарного загрязнения атмосферного воздуха городской среды // Сибирский экологический журнал. 2010. Т. 17. № 2. С. 193–196.
- Оценка воздействия на окружающую среду Проекта разработки Корпангского железорудного месторождения. Костомукша, Республика Карелия: Отчет для ОАО «Карельский окатыш» . М., 2002. 53 с.
- Рыбаков Д. С., Замойский В. Л., Косовец Ю. Г. Исследования радиоактивного загрязнения в Медвежьегорском районе Республики Карелия // Проблемы геоэкологии Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. С. 61–73.
- Рыбаков Д. С. Первые данные дендрохимического определения многолетней динамики загрязнения Петрозаводска // Вопросы геологии и экологии Карелии: По материалам конференции молодых ученых. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 51–57.
- Рыбаков Д. С. Особенности распределения техногенных загрязнителей по годичным кольцам сосны (на примере Карелии) // Строение, свойства и качество древесины – 2000: Материалы III Международного симпозиума. 11–14 сент. 2000. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 72–75.
- Рыбаков Д. С. Воздействие тяжелых металлов на годичный прирост и плотность древесины сосны // Биокосные взаимодействия: жизнь и камень: Материалы I Международного симпозиума. СПб., 2002. С. 296–299.
- Садовникова Л. К., Орлов Д. С., Лозановская И. Н. Экология и охрана окружающей среды при химическом загрязнении: Учебное пособие для вузов . М.: Высш. шк., 2006. 334 с.
- Специализированные массивы для климатических исследований / ВНИИГМИ-МЦД. Обнинск. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 08.01.2016).
- Федорец Н. Г., Дьяконов В. В., Литинский П. Ю., Шильцова Г. В. Загрязнение лесной территории Карелии тяжелыми металлами и серой . Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. 47 с.
- Хантемиров Р. М. Биоиндикация загрязнения среды в прошлом на основе анализа содержания химических элементов в годичных слоях древесины // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. Т. XVI. СПб.: Гидрометеоиздат, 1996. С. 153–164.
- Черненькова Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение . М.: Наука, 2002. 191 с.
- Cutter B. E., Guyette R. P. Anatomical, Chemical and Ecological Factors Affecting Tree Species Choice in Dendrochemistry Studies // Journal of Environmental Quality. 1993. Vol. 22. № 3. P. 611–619.
- Elvingson P., Ågren C. Air and the Environment. Göteborg: The Swedish NGO Secretariat on Acid Rain, 2004. 174 p.
- ESPREME – Estimation of willingness-to-pay to reduce risks of exposure to heavy metals and cost-benefit analysis for reducing heavy metals occurrence in Europe. Publishable final activity report of the ESPREME Project, FP6, 2007. URL: <http://espreme.ier.uni-stuttgart.de> (дата обращения: 12.01.2016).
- Hantemirov R. M. Possibility to use chemical elements in tree rings of Scots pine for the air pollution reconstruction // Tree rings and environment: Proceedings of the International Dendrochronological Symposium, Ystad, South Sweden, 3–9 September 1990. Lund: Lund University, Department of Quaternary Geology, 1992. P. 142–145.

Pacyna J. M. Atmospheric emissions of heavy metals for Europe. Improvements, updates, historical data and projections. A Report for the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Laxenburg, Norway, 1996.

Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. 2000. Vol. I. Annex C: Exposures from man-made sources of radiation. URL: <http://www.unscear.org/docs/reports/annexc.pdf> (дата обращения: 12.01.2016).

# BIOGEOCHEMICAL ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RISK BY THE EXAMPLE OF *PINUS SYLVESTRIS* L.

**RYBAKOV**  
Dmitry Sergeevich

*Institute of Geology, Karelian Research Center,*  
*rybakovd@krc.karelia.ru*

**Key words:**  
pollution  
heavy metals  
*Pinus sylvestris* L.  
radial growth  
annual rings  
wood density

**Summary:** The possibility of using annual rings of *Pinus sylvestris* L. to assess chemical pollution in the Republic of Karelia is discussed. With the help of principal component factor analysis the relationship between the contents of chemical elements and dendrological parameters – the width of annual rings and wood density - was revealed. The main factors contributing to the pollution of the northern part of the Republic of Karelia by the emission from iron-ore enterprise JSC «Karelsky Okatysh» are frequent ecologically significant wind directions, the distance from the source and the total mass of the emission. The value of radial growth (the average width of annual rings for five-years) of *Pinus sylvestris* L. is connected negatively with the content of Cu, Cd, Ni and Fe. As an element of nutrition, Mn is positively correlated with the density of wood wherein it is an antagonist of Fe and partially of Cr in northern areas. Several peaks of Pb content coincide with the most intense tests of atomic weapons. Sharp maximums of Pb can also be due to a cross-border pollution and emission from regional sources

**Reviewer:** V. V. Gavrilenko

**Received on:** 15 January 2016

**Published on:** 19 May 2016

## References

- Alekseev A. S. Soroka A. R. The growth of the Scots pine plantations in the North-West of the Kola Peninsula in relation to possible regional changes of the environment, *Ekologiya severnyh territoriy Rossii. Problemy, prognoz situacii, puti razvitiya, resheniya: Materialy mezdunarodnoy konferencii*. Arhangel'sk: Institut ekologicheskikh problem Severa UrO RAN, 2002. P. 273–278.
- Bol'shev L. N. Smirnov N. V. Tables of mathematical statistics. M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1983. 416 p.
- Vaganov E. A. Kruglov V. B. Ecology of woody plants: lecture course. Krasnoyarsk, 2007. 230 p.
- Voytkevich G. V. Kokin A. V. Miroshnikov A. E. Prohorov V. G. Handbook of geochemistry. M.: Nedra, 1990. 480 p.
- State Report on the Status of the Environment in the Republic of Karelia in 1992. Petrozavodsk: Ministerstvo ekologii i prirodnyh resursov Respubliki Kareliya, 1993. 63 p.
- State Report on the Status of the Environment in the Republic of Karelia in 1997. Petrozavodsk: Gosudarstvennyy komitet ohrany okruzhayuschev sredy po Respublike Kareliya, 1998. 220 p.
- State Report on the Status of the Environment in the Republic of Karelia in 2001. Petrozavodsk: Komitet prirodnyh resursov po Respublike Kareliya, 2002. 240 p.
- D'yakonov V. V. Kozlov V. A. Korzhickaya Z. A. Evaluation of heavy metal and sulfur pollution for the forest ecosystems of the Republic of Karelia, *Problemy antropogennoy transformacii lesnyh bioazonov Karelii*. Petrozavodsk, 1996. P. 167–182.
- Ieshko E. P. Titov A. F. Main trends in the state of the environment in the Republic of Karelia, *Ekologiya severnyh territoriy Rossii. Problemy, prognoz situacii, puti razvitiya, resheniya: Materialy mezdunarodnoy konferencii*. Arhangel'sk: Institut ekologicheskikh problem Severa UrO RAN, 2002. P. 12–16.
- Pendias A. Pendias H. Trace elements in soils and plants. M.: Mir, 1989. 439 p.
- Kozlov V. A. Kisternaya M. V. Klemanskiy Yu. M. Analytical support for monitoring of forest ecosystems, *Bioekologicheskie aspekty monitoringa lesnyh ekosistem Severo-Zapada Rossii*. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2001. P. 278–285.

- Lazareva I. P. Kuchko A. A. Kravchenko A. V. The impact of aerotechnogenic contamination on the pine forests state of northern Karelia. Petrozavodsk, 1992. 52 p.
- Lozanovskaya I. N. Orlov D. S. Sadovnikova L. K. Ecology and protection of the biosphere by chemical pollution: A manual for schools. M.: Vyssh. shk., 1998. 287 p.
- Moiseev A. A. Ivanov V. I. The directory on dosimetry and radiation hygiene. M.: Energoatomizdat, 1990. 252 p.
- Neverova O. A. Environmental assessment of woody plants and pollution of the industrial city environment (by the example of Kemerovo). M., 2004. 37 p.
- Neverova O. A. Candekova O. L. Photosynthetic ability of woody plants as an indicator of the cumulative air pollution of the urban environment, Sibirskièkologicheskiy zhurnal. 2010. T. 17. No. 2. P. 193–196.
- Environmental impact assessment of the Project of the development of Korpangsky iron ore deposit. Kostomuksha, Republic of Karelia. M., 2002. 53 p.
- Rybakov D. S. Zamyskiy V. L. Kosovec Yu. G. Studies of radioactive contamination in the Medvezhiegorsky area of the Republic of Karelia, Problemy geoekologii Karelii. Petrozavodsk: KarNC RAN, 1997. P. 61–73.
- Rybakov D. S. The first data on dendrogeochemical determination of long-term contamination dynamics in Petrozavodsk, Voprosy geologii i ekologii Karelii: Po materialam konferencii molodyh uchenyh. Petrozavodsk: KarNC RAN, 1999. P. 51–57.
- Rybakov D. S. Features of distribution of man-made pollutants in annual rings of pine (by the example of the Republic of Karelia), Stroenie, svoystva i kachestvo drevesiny – 2000: Materialy III Mezhdunarodnogo simpoziuma. 11–14 sent. 2000. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2000. P. 72–75.
- Rybakov D. S. Effects of heavy metals on the annual increment and wood density of pine, Biokosnye vzaimodeystviya: zhizn' i kamen': Materialy I Mezhdunarodnogo simpoziuma. SPb., 2002. P. 296–299.
- Sadovnikova L. K. Orlov D. S. Lozanovskaya I. N. Ecology and environmental protection in chemical pollution: A manual for HEIs. M.: Vyssh. shk., 2006. 334 p.
- Specialized arrays for climate research, VNIIGMI-MCD. Obninsk. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (data obrascheniya: 08.01.2016).
- Fedorec N. G. D'yakonov V. V. Litinskiy P. Yu. Shil'cova G. V. Contamination with heavy metals and sulphur of the forest area in the Republic of Karelia. Petrozavodsk: Izd-vo KarNC RAN, 1998. 47 p.
- Hantemirov R. M. Bioindication of environment pollution on the basis of analysis of chemical elements content in the annual layers of wood, Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniye ekosistem. T. XVI. SPb.: Gidrometeoizdat, 1996. P. 153–164.
- Chernen'kova T. V. Response of forest vegetation to industrial pollution. M.: Nauka, 2002. 191 p.
- Cutter B. E., Guyette R. P. Anatomical, Chemical and Ecological Factors Affecting Tree Species Choice in Dendrochemistry Studies, Journal of Environmental Quality. 1993. Vol. 22. No. 3. P. 611–619.
- Elvingson P., Ågren C. Air and the Environment. Göteborg: The Swedish NGO Secretariat on Acid Rain, 2004. 174 p.
- ESPREME – Estimation of willingness-to-pay to reduce risks of exposure to heavy metals and cost-benefit analysis for reducing heavy metals occurrence in Europe. Publishable final activity report of the ESPREME Project, FP6, 2007. URL: <http://espreme.ier.uni-stuttgart.de> (data obrascheniya: 12.01.2016).
- Hantemirov R. M. Possibility to use chemical elements in tree rings of Scots pine for the air pollution reconstruction, Tree rings and environment: Proceedings of the International Dendrochronological Symposium, Ystad, South Sweden, 3–9 September 1990. Lund: Lund University, Department of Quaternary Geology, 1992. P. 142–145.
- Pacyna J. M. Atmospheric emissions of heavy metals for Europe. Improvements, updates, historical data and projections. A Report for the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Laxenburg, Norway, 1996.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. 2000. Vol. I. Annex C: Exposures from man-made sources of radiation. URL: <http://www.unscear.org/docs/reports/annexc.pdf> (data obrascheniya: 12.01.2016).