

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РЕГИОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ АО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»

М. Г. Опекунова, А. Р. Никулина

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
m.opkunova@mail.ru*

В зоне воздействия АО «Карельский окатыш» и в Костомукшском заповеднике (республика Карелия) изучен радиальный прирост *Pinus sylvestris*, химический состав, рН и потери при прокаливании почв. Лимитируют приросты сосны среднегодовое количество осадков, температура воздуха июня и июля текущего года, температура сентября предыдущего года; рН и содержание органического вещества в почвах. Уменьшению радиальных приростов способствует загрязнение окружающей среды Fe, Mn, Cr, Ni, V, Ti, Cu, Zn, Cd.

Ключевые слова: радиальный прирост; горнорудное производство; металлы; морфологические отклонения; загрязнение; годовые кольца; почвы.

Введение. АО «Карельский окатыш» с 1982 г. разрабатывает Костомукшское месторождение железистых кварцитов, которое является крупнейшим по запасам на Северо-Западе России. Предприятие перерабатывает ежегодно около 24 млн т железных руд, выпускает 11,054 млн т обогащенных железных окатышей [6]. Для диагностики трансформации окружающей среды под воздействием горнорудного производства широко используются методы биоиндикации и биогеохимии [3-5, 8].

Материалы и методы исследований. В июне 2023 г. на 63 станциях мониторинга (СМ) проведены геоэкологические исследования на площадках вблизи АО «Карельский окатыш» (контроль) и в Костомукшском заповеднике (фон) [3, 4]. Пробы почвы отобраны из органогенного и иллювиального горизонтов в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ 17.4.4.02-2017. На 27 СМ отобрано 69 древесных кернов *Pinus sylvestris* L., соответствующих 138 древесным радиусам. Обработка данных представлена для индексов приростов std [2]. Валовое содержание металлов (Mn, K, Sc, V, Sr, Fe, Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Cd, Ba, Pb, Ti) в почвах определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ISP-MS) на приборе «ELAN-6100 DRC» с полным кислотным разложением проб по ПНД Ф 16.1:2.3:3.11—98 в аккредитованной лаборатории института им. А.П. Карпинского. Концентрации подвижных форм металлов в почвах

(вытяжка ацетатно-аммонийным буфером, $pH=4,8$) установлены в Ресурсном центре «Методы анализа состава вещества» СПбГУ методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе «ICPE-9000 Shimadzu», аналитик В.Н. Григорьян. Пробоподготовка [5] осуществлена в учебной лаборатории физико-химического анализа СПбГУ. В качестве базовых метеорологических параметров использованы данные со станции Реболы ($63^{\circ}49'$ с.ш. $30^{\circ}49'$ в.д.), респ. Карелия [7].

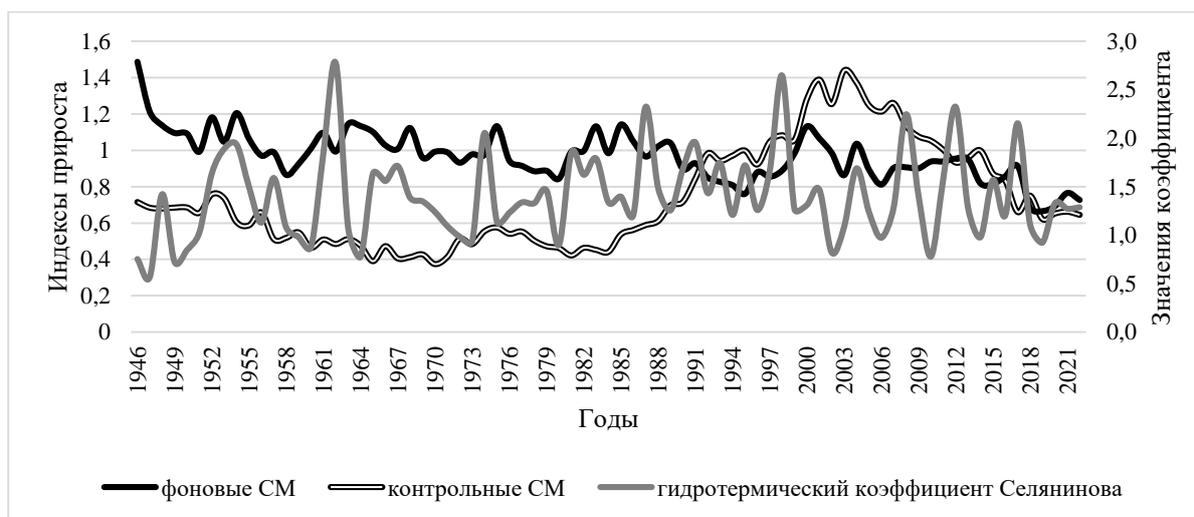
Результаты и их обсуждение. Радиальный прирост сосны составляет в среднем 1,36 мм в год. Угнетение деревьев на контрольных СМ проявляется в уменьшении минимальных и максимальных индексов прироста в 1,5 раза в период 1978-2022 гг. по сравнению с данными до 1978 г., на фоновых же СМ приросты относительно стабильны.

Наибольшей биоиндикационной значимостью характеризуются хронологии, полученные в сосняках кустарничково-воронично-зеленомошных на озах (значения популяционного сигнала $EPS = 0,80-0,94$). За счет разреженности древостоя здесь отсутствует межвидовая, и существенно снижается внутривидовая конкуренция. Таким образом, деревья оказываются более чувствительны к абиотическим и антропогенным факторам.

На фоновых СМ показана значимая слабая отрицательная связь между температурой воздуха июня ($r=-0,33$; $g_{крит.}=0,25$ при $p=0,05$), июля ($-0,38$) и сентября ($-0,35$) текущего года, а также температурой сентября предыдущего года ($-0,43$) и приростами сосны. Увеличение суммы температур выше $+10^{\circ}C$ в течение года и, в частности, в апреле, мае, июне, августе способствует уменьшению радиальных приростов (r от $-0,23$ до $-0,47$; $g_{крит.}=0,21$ при $p=0,05$), причем если до 1978 г. данный фактор проявляется на контрольных СМ ($r=-0,35$; $g_{крит.}=0,30$ при $p=0,05$), то с 1978 г. коэффициент корреляции снижается до незначимого значения 0,12. Важный вклад в формирование годичных колец вносит баланс температуры и увлажнения территории: гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова указывает на возрастание приростов в мае ($r=0,38$; $g_{крит.}=0,22$ при $p=0,05$; рис.) и июне (0,58) на фоне температур выше $+10^{\circ}C$ и уменьшение ширины колец при избыточном увлажнении в июле ($-0,39$) и августе ($-0,41$). Увеличение ГТК Селянинова приурочено к годам с наименьшими приростами (r от $-0,27$ до $-0,49$; $g_{крит.} = 0,22$ при $p = 0,05$), что свидетельствует об ингибировании приростов при избыточном увлажнении даже в случае температуры воздуха выше $+10^{\circ}C$ [1].

Сопоставление данных о приростах с коэффициентами Высоцкого-Иванова свидетельствует о слабовыраженной связи между данными параметрами. Только для одной СМ, где древостой представлен молодыми деревьями 25-летнего возраста, получены значимые коэффициенты корреляции между приростами и коэффициентом Высоцкого-Иванова за год

($r=-0,49$; $r_{\text{крит.}}=0,40$ при $p=0,05$), февраль (-0,48), август (-0,48). Молодые деревья оказываются особенно чувствительны к избыточному увлажнению за счет слабого развития корневой системы [8]. На контрольных СМ до строительства комбината значимая корреляция получена между индексами прироста и среднегодовой температурой воздуха на СМ 47 ($r = 0,45$; $r_{\text{крит.}} = 0,25$ при $p = 0,05$), СМ 54 (0,53), однако после 1978 г. коэффициенты корреляции Пирсона снижаются до незначимых 0,12 и -0,04 соответственно, аналогичные закономерности отмечены в литературе и для других регионов [1,8].



Связь хронологий радиального прироста *Pinus sylvestris* и гидротермического коэффициента Селянинова

Высокое содержание слабо разложившегося органического вещества в органогенном горизонте почв, медленно вовлекающегося в биологический круговорот, приводит к уменьшению ширины годичных колец сосны ($r=-0,47$; $r_{\text{крит.}}=0,29$ при $p=0,05$), причем эдафический сигнал хорошо выражен в заповеднике ($r=-0,83$; $r_{\text{крит.}}=0,50$ при $p=0,05$) и фактически теряется на контрольных СМ ($r = -0,37$; $r_{\text{крит.}}=0,35$ при $p=0,05$).

В древостоях заповедника приросты сосны увеличиваются при нейтрализации рН почв: от кислой до слабокислой и близкой к нейтральной реакции ($r=0,73$ для органогенных горизонтов и $r=0,52$ – для минеральных; $r_{\text{крит.}}=0,29$ при $p=0,05$), это хорошо согласуется с литературными данными [9]. На территории комбината данный фактор не выражен.

Подавление климатического и эдафического сигналов на контрольных СМ связано с загрязнением окружающей среды, которое проявляется в том числе в увеличении валовых содержаний Cr, Mn, Fe, Ni, Cu в 1,5–14 раз относительно фона в органогенных горизонтах почв и в 1,5–2 раза в иллювиальных (табл.).

Концентрации подвижных форм Fe, Mn, Zn, Cr, Ni, V превышают фон в 1,5–60 раз. Возрастает подвижность металлов (доля от валового содержания) по сравнению с фоном: Cd (в 2 раза), Fe (2,0), Mn (2,7), Cr (3,0), V (6,2) в органогенных горизонтах и Cd (1,8), V (4,4), Cr (5,0), Ni (15,4) в иллювиальных горизонтах. В почвах на территории комбината наибольшая подвижность характерна для Cd (до 29 % от валового содержания), Cu (до 25 %), Mn (до 58 %), Zn (до 26 %).

Статистические характеристики содержания металлов в почве

СМ	Параметр	Концентрации металлов, мг/кг									
		Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	V	Zn
Органогенные горизонты											
Фоновые СМ (n = 10)	сред- нее	<u>163</u> 16,4	<u>0,68</u> 0,09	<u>10,3</u> 0,14	<u>7,2</u> 4,0	<u>5 500</u> 130	<u>250</u> 82	<u>6,1</u> 0,59	<u>15,8</u> 1,0	<u>6,6</u> 0,06	<u>37</u> 11,2
	мин	<u>11,0</u> 2,7	<u>0,40</u> <0,02	<u>1,0</u> <0,02	<u>0,50</u> <0,02	<u>1 600</u> 3,7	<u>50</u> 7,5	<u>2,1</u> 0,18	<u>5,4</u> <0,02	<u>1,3</u> 0,03	<u>4,5</u> 2,1
	макс	<u>412</u> 37	<u>1,3</u> 0,21	<u>32</u> 0,53	<u>13,3</u> 11,3	<u>13 300</u> 1 117	<u>450</u> 232	<u>11,9</u> 3,6	<u>31</u> 2,1	<u>10,1</u> 0,15	<u>61</u> 27
Контрольные СМ (n = 53)	сред- нее	<u>179</u> 23	<u>0,54</u> 0,18	<u>22</u> 0,51	<u>19,4</u> 1,3	<u>32 500</u> 423	<u>450</u> 227	<u>22</u> 2,6	<u>18,3</u> 1,3	<u>25</u> 1,7	<u>73</u> 12,8
	мин	<u>96</u> 6,6	<u>0,10</u> <0,02	<u>6,1</u> <0,02	<u>7,2</u> <0,02	<u>4 600</u> 7,3	<u>50</u> 2,6	<u>8,4</u> 0,28	<u>4,2</u> <0,02	<u>7,9</u> <0,02	<u>33</u> 1,2
	макс	<u>303</u> 58	<u>1,4</u> 2,2	<u>41</u> 2,1	<u>104</u> 6,6	<u>119 700</u> 3 355	<u>1 250</u> 4 210	<u>86</u> 43	<u>37</u> 3,5	<u>57</u> 1,9	<u>116</u> 42
Иллювиальные горизонты											
Фоновые СМ (n = 10)	сред- нее	<u>377</u> 8,5	<u>0,13</u> <0,02	<u>40</u> 0,44	<u>4,9</u> 1,9	<u>15 700</u> 65	<u>300</u> 11,9	<u>14,9</u> 0,22	<u>1,7</u> 0,51	<u>н/д</u> 0,11	<u>29</u> 4,5
	мин	<u>328</u> 2,9	<u>0,11</u> <0,02	<u>31</u> <0,02	<u>4,0</u> <0,02	<u>12 400</u> 6,2	<u>250</u> 0,94	<u>12,7</u> 0,10	<u>0,50</u> <0,02	<u>н/д</u> 0,03	<u>22</u> 0,94
	макс	<u>403</u> 14,3	<u>0,14</u> 0,03	<u>55</u> 1,5	<u>5,5</u> 10,1	<u>19 500</u> 211	<u>300</u> 45	<u>19,3</u> 0,40	<u>4,1</u> 2,8	<u>н/д</u> 0,32	<u>40</u> 20
Контрольные СМ (n = 53)	сред- нее	<u>444</u> 7,5	<u>0,13</u> 0,02	<u>65</u> 3,1	<u>7,2</u> 1,7	<u>32 800</u> 353	<u>300</u> 13,5	<u>21</u> 2,0	<u>12,2</u> 0,51	<u>73</u> 0,35	<u>28</u> 4,2
	мин	<u>370</u> 2,9	<u>0,04</u> <0,02	<u>43</u> <0,02	<u>3,4</u> <0,02	<u>20 800</u> 5,3	<u>200</u> 0,53	<u>13,3</u> 0,12	<u>8,3</u> <0,02	<u>49</u> 0,03	<u>19,0</u> 0,73
	макс	<u>541</u> 26	<u>0,19</u> 0,30	<u>104</u> 26	<u>17,2</u> 14,7	<u>52 300</u> 1 935	<u>500</u> 71	<u>31</u> 47	<u>18,0</u> 3,5	<u>113</u> 3,2	<u>46</u> 45

Примечание. Над чертой валовые содержания, под чертой – концентрации подвижных форм.

Ингибирование приростов при загрязнении почв металлами подтверждают результаты корреляционного анализа. Статистически значимые связи уменьшения ширины годичных колец у сосны отмечены при возрастании валовых содержаний Zn ($r=-0,66$; $r_{\text{крит.}}=0,29$ при $p=0,05$), Pb ($r=-0,57$) в органогенных горизонтах почв; Cr ($r=-0,65$), Mn ($r=-0,44$), Fe ($r=-0,41$),

Ni ($r=0,55$), Zn ($r=-0,81$) – в иллювиальных. Негативно на радиальный прирост влияет увеличение концентраций подвижных форм Cr ($r=-0,38$), Fe ($r=-0,35$), Ni ($r=-0,36$), Ti ($r=-0,44$), V ($r=-0,55$) в органогенных и Mn ($r=-0,47$), Ni ($r=-0,57$), Pb ($r=-0,41$), Zn ($r=-0,41$) в иллювиальных горизонтах почв.

Заключение. В регионе присутствия АО «Карельский окатыш» однозначного уменьшения индексов радиального прироста сосны на контрольных СМ по сравнению с фоновыми не наблюдается; однако отмечено подавление климатического и эдафического сигналов на контрольных СМ в связи с загрязнением окружающей среды металлами. Лимитируют прирост сосны среднегодовое количество осадков, температура воздуха, в том числе сумма температур выше $+10^{\circ}\text{C}$, летом и в сентябре. Высокие значения ГТК Селянинова указывают на уменьшение приростов сосны в условиях избыточного увлажнения и температуры воздуха выше $+10^{\circ}\text{C}$. Наиболее чувствительны к балансу тепла и влаги молодые деревья в возрасте до 30 лет. Ингибирование приростов наблюдается на кислых торфяных почвах, содержащих большое количество слаборазложившегося органического вещества, а также при загрязнении окружающей среды Fe, Mn, Cr, Ni, V, Ti, Cu, Zn, Cd.

Работа выполнена в рамках НИР № 01/1-55-69-СПбГУ «Мониторинг и сохранение биоразнообразия растительности в регионе присутствия АО «Карельский окатыш».

Библиографические ссылки

1. Факторы пространственно-временной изменчивости прироста лиственницы сибирской в горных районах Алтая, Тувы и Монголии / М. В. Андреева [и др.] // Экология. 2019. № 5. С. 365-372.

2. Ваганов Е. А., Круглов В. Б., Васильев В. Г. Дендрохронология: учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2008. 120 с.

3. Никулина А. Р., Опекунова М. Г. Изменение дендроиндикационных параметров *Pinus sylvestris* L. в регионе воздействия АО «Карельский окатыш» // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Г.А. Воронова, Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка, Пермь. 25–27 апреля 2024 года. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2024. С. 292-296.

4. Опекунова М. Г., Гайдыш И. С., Никулина А. Р. Биологические реакции сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. на изменение условий местообитания под влиянием природных и антропогенных факторов // Биология растений в эпоху глобальных изменений климата: тезисы докладов X Съезда общества физиологов растений России (Уфа, 18-23 сентября 2023 г.). Уфа : УИБ УФИЦ РАН, 2023. С. 277.

5. Методы физико-химического анализа почв и растений: Метод. указания /М. Г. Опекунова [и др.]. СПб. : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2015. 86 с.

6. Сайт АО «Карельский окатыш» [Электронный ресурс]. URL: <https://severstal.com/rus/about/structure/businesses/karelskiy-okatysh> (дата обращения: 12.08.2024).

7. Специализированные массивы для климатических исследований [Электронный ресурс]. URL: aisori-m.meteo.ru (дата обращения: 20.10.2023).

8. *Ярмишко В. Т.* Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на европейском севере. СПб. : Изд-во НИИ химии СПбГУ, 1997. 210 с.

9. *Seftigen K., Moldan F., Linderholm H. W.* Radial growth of Norway spruce and Scots pine: effects of nitrogen deposition experiments // *European Journal of Forest Research*. 2013. Vol. 132. P. 83–92.