

УДК 911.2:[581.9:582.475]:504.5

**Е. В. Матюшевская,**  
кандидат географических наук,  
доцент кафедры общего земледования  
и агрометеорологии БГУ;

**В. Н. Киселев,**  
доктор географических наук,  
профессор кафедры физической географии БГПУ;

**А. Е. Яротов,**  
кандидат географических наук,  
доцент кафедры физической географии мира  
и образовательных технологий БГУ;

**П. А. Митрахович,**  
кандидат биологических наук,  
доцент кафедры физической географии мира  
и образовательных технологий БГУ

## **ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА СОСНЫ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ МИНСКА**

**В**ведение. Сосновые насаждения, сохранившиеся в городской среде Минска и являющиеся естественным природным компонентом города, представляют благодатный объект для целенаправленных экологических исследований. Анализ их состояния посвящено множество публикаций, перечень которых приведен в монографиях [1–4].

Проблемой, требующей своего решения, осталось выявление способности насаждений сосны, находящихся в условиях техногенного загрязнения воздушной среды, реагировать на изменчивость погодно-климатических условий. Выполненные исследования посвящены поиску ответа на этот проблемный вопрос.

**Материал и методика исследования.** Для достижения поставленной цели в лесопарке имени 50-летия Октября с наиболее интенсивным загрязнением воздушной среды в Минске, по данным Белгидромета, были выбраны два тест-участка. В отличие от типологических пробных площадей, применяемых в лесоведении, с определенной размерностью, пересчетом деревьев, с отбором образцов древесины по ступеням толщины и выбором среднего модельного дерева, на тест-участках отбор кернов (по 12 на каждом из них при необходимом количестве 10 [5]) возраст-

ным буровом на высоте 1,3 м нами выполнен у наиболее развитых (по визуальному определению) деревьев в апреле 2014 г.

На двух тест-участках одна и та же дерново-подзолистая песчаная почва, подстилаемая с глубины 56 см супесью моренной.

Тип леса – сосняк мшистый, но напочвенный покров претерпел значительные антропогенные нагрузки, отразившиеся во вселении злаков и разнотравья. Кустарники и листовенный подрост обильны: крушина, бузина красная, рябина, калина, боярышник, клен остролистный, береза, осина и др., что исключает санитарный уход за насаждением (сгребание листы). Несмотря на педотопическое однообразие, тест-участки различаются по положению в рельефе. Тест-участок 1 занимает нижнюю треть склона слабовыпуклой локальной возвышенности, тест-участок 2 – среднюю треть этого склона.

В насаждении 90-летнего возраста (дендрошкалы с 1930 г.) диаметр стволов от 36 до 46 см при высоте 24–28 м. Многолетний ход изменчивости радиального прироста (в мм) представлен на рисунке 1, индексного прироста (в %), определенного с применением пятилетнего скользящего осреднения – на рисунке 2. Статистическая характеристика радиального прироста приведена в таблице 1.

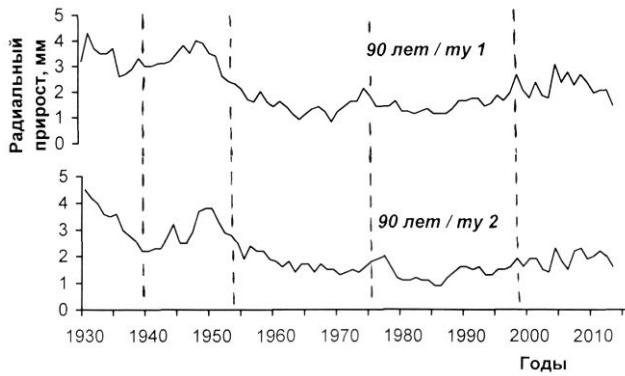


Рисунок 1 – Многолетний ход изменчивости радиального прироста сосны в лесопарке имени 50-летия Октября. 90 лет – возраст сосны, т/у – тест-участок

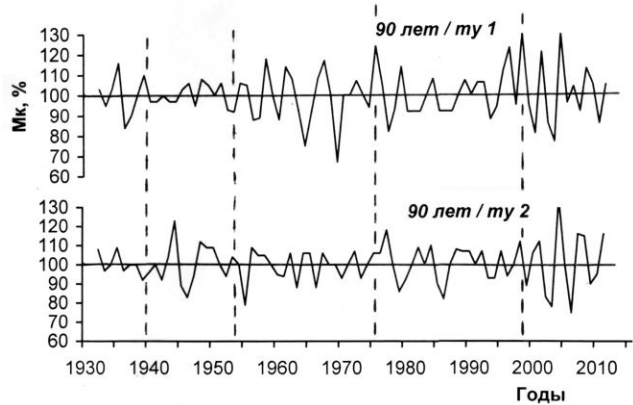


Рисунок 2 – Многолетний ход изменчивости индексного прироста сосны в лесопарке имени 50-летия Октября

Таблица 1 – Статистическая характеристика радиального прироста сосны в лесопарке имени 50-летия Октября

Тест-участок	Радиальный прирост, мм			Мк, %	Кч
	$\bar{x}$	$\sigma$	max	$\sigma$	
<b>1930–1953 гг.</b>					
1	3,3	0,5	7,5	7,2	0,17
2	3,1	0,7	8,7	8,9	0,19
<b>1954–1976 гг.</b>					
1	1,5	0,4	3,7	13,4	0,33
2	1,7	0,3	3,2	7,6	0,20
<b>1977–1998 гг.</b>					
1	1,5	0,4	3,0	11,8	0,19
2	1,4	0,3	2,5	9,0	0,20
<b>1998–2013 гг.</b>					
1	2,1	0,4	4,4	15,7	0,39
2	1,9	0,3	3,8	17,8	0,33

На дендрограммах вертикальными штриховыми линиями показаны 1940 г. – переход от влажной к неустойчиво влажной климатической эпохе [6], 1976 г., за которым последовало резкое сокращение притока прямой солнечной радиации, и 1998 г. – противоположно резкое ее увеличение и потепление климата, которое оказалось результативным для каждого из месяцев вегетации (по наблюдениям Белгидромета). Май стал теплее на 0,6 °С, июнь – на 0,9 °С, июль – на 2,5 °С, вегетационный период в целом – на 1,2 °С и безлиственный период (октябрь – апрель) – на 0,9 °С.

**Результаты и их обсуждение.** Осредненный радиальный прирост указывает на то, что до 1953 г. сосна не находилась в угнетенном состоянии. Аномальные зимние холода 1941–1943 гг. вызвали заметную депрессию в изменчивости ширины годичных колец только у деревьев, расположенных выше по рельефу

(тест-участок 2). Однако потенциал стволовой продуктивности сосны в климатических условиях до 1953 г., отраженный в максимальном радиальном приросте одного дерева (8,7 мм), был реализован именно в этом морфотопе.

Резкое увеличение промышленных эмиссий в воздушный бассейн началось, в сущности, с введением в эксплуатацию МАЗа, МТЗ и общим ростом промышленного производства в Минске. К середине 1950-х гг. его объем значительно превысил довоенный уровень. Как итог экологического воздействия промышленных поллютантов на сосну, ее радиальный прирост в исследованном экотопе начал результативно сокращаться до минимальных значений к середине 1970-х гг. с максимальным загрязнением воздушной среды.

В среднем ширина годичного кольца за 1954–1976 гг. сократилась в два раза по сравнению с предшествующим периодом. Очевидной причиной послужило воздействие техногенных

газообразных поллютантов на ассимиляционный аппарат сосны. В возникших экологических условиях потенциал ее стволовой продуктивности (максимально возможный радиальный прирост) сократился более чем в два раза.

Чувствительность сосны к климатическим факторам, по А. Е. Дугласу [11], в этот отрезок времени различалась по ее принадлежности к морфотопу. Она оказалась более чувствительной в их погодичной изменчивости, располагаясь ниже по рельефу ( $Kч = 0,33$ ), чем на относительно повышенном положении ( $Kч = 0,20$ ).

Позднее за 25-летие (1976–2000 гг.) загрязнение воздуха в Минске, по данным Белгидромета, уменьшилось: по выбросам пыли в 15–20 раз, диоксиду серы в 25 раз и по диоксиду азота менее чем в 2 раза. Значительное оздоровление воздушной среды после ее максимального загрязнения в первой половине 1970-х гг. должно было бы привести к улучшению состояния сосны и увеличению ее стволовой продуктивности. Но этого не произошло, хотя в середине этого десятилетия возник всплеск радиального прироста, за которым последовало дальнейшее угнетение древостоя, продолжавшееся до 1998 г. (рисунок 1).

При снижении техногенной нагрузки (загрязнение) прогностическая оценка стабильности запасов соснового древостоя должна была возрасти до  $S_n = 0,90–0,92$  (полная ста-

бильность наступает при  $S_j = 1,0$ ) по сравнению с  $S_n = 0,68–0,80$  [4]. Однако ожидаемые перемены к лучшему не оправдались, но и существенных изменений к худшему (полной деградации насаждения) не произошло. Угнетение радиального прироста сохранилось на том же уровне (1,5 мм на тест-участке 1) или ниже (на 0,3 мм на тест-участке 2) при сохранении низкой чувствительности к климатическим факторам.

Причину продолжившейся в 1977–1998 гг. стагнации жизненного состояния сосны, по всей видимости, следует искать в погодноклиматических условиях этого временного отрезка с актинометрической аномалией. Инструментальные наблюдения на метеостанции «Минск» за поступлением солнечной радиации, начатые в 1954 г., предоставили возможность использовать важнейший фактор – фотосинтетически активную радиацию (ФАР) – для определения состояния и стволовой продуктивности сосны в условиях техногенного загрязнения воздушной среды. Перевод интегральной радиации в ФАР сделан по понижающим коэффициентам, определенным метеостанцией «Минск», для прямой 0,44, для рассеянной 0,61 [8]. Поступление прямой, рассеянной и суммарной ФАР за вегетационный период (май – сентябрь) характеризуется значительной погодичной изменчивостью (рисунок 3).

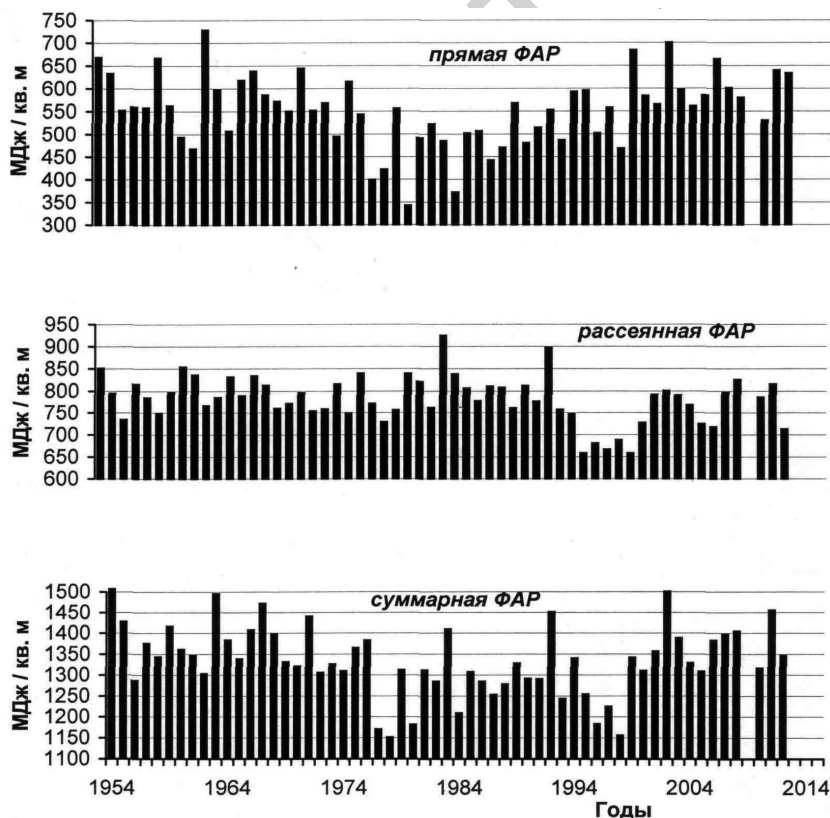


Рисунок 3 – Динамика ФАР (по наблюдениям на метеостанции «Минск», данные за 2010 г. отсутствуют)

В 1977–1998 гг. радиальный прирост сосны приобрел отрицательную корреляцию с рассеянной ФАР: статистически значимую на тест-участке 1 в месяцы с наиболее длительным фотопериодом (таблица 2).

В эти годы преобладание рассеянной ФАР над прямой за вегетационный период было наиболее значительным (на 58 %), чем до (на 35 %) и после них (на 25 %), и ее участие в физическом воздействии на растение при сокращении поступления прямой радиации оказывалось более результативным.

После 1998 г., при потеплении климата, физическое воздействие на хвою прямой ФАР возросло, хотя перегрев хвои у сосны

мало вероятен. Усиление этого воздействия привело к обратной связи радиального прироста от этой радиации. Потепление вегетационного периода, особенно мая, на который приходится наиболее высокая интенсивность фотосинтеза [1], вызвало обратную зависимость радиального прироста не только от прямой ФАР, но и от температуры воздуха (таблица 3).

Температурные условия безлиственного периода (октябрь – апрель) оказались значимыми для состояния древостоя только в 1977–1998 гг. на относительно повышенном морфотопе в текущем и последующем (lg 1) году, отвечая двухлетней продолжительности хвои.

**Таблица 2 – Коэффициенты корреляции радиального прироста сосны в лесопарке Минска с ФАР**

Тест-участок	Коэффициенты корреляции с ФАР, $r = 0, \dots$								
	прямой			рассеянной			суммарной		
	месяцы								
	V	VI–VII	V–IX	V	VI–VII	V–IX	V	VI–VII	V–IX
<b>1954–1976 гг.</b>									
1	08	–30	02	13	21	13	15	–18	08
2	05	02	01	08	30	16	03	18	10
<b>1977–1998 гг.</b>									
1	–07	30	04	–17	–55	<b>–49</b>	–22	–12	–21
2	–02	06	05	–32	–34	–34	–22	–20	–32
<b>1999–2013 гг.</b>									
1	<b>–58</b>	24	–20	40	11	–08	–37	37	–15
2	–46	–44	–53	01	50	36	–46	–17	–13

**Таблица 3 – Коэффициенты корреляции радиального прироста сосны в лесопарке Минска с температурой воздуха и осадками**

Тест-участок	Коэффициенты корреляции, $r = 0, \dots$									
	с $t \text{ } ^\circ\text{C}$					с осадками, мм				
	V	VI–VII	V–IX	X–IV		V	VI–VII	V–IX	X–IV	
				тек.	lg 1				тек.	lg 1
<b>1954–1976 гг.</b>										
1	–02	–11	01	22	23	–29	34	24	–26	04
2	–18	–06	–15	–16	–23	–19	–09	07	–44	–27
<b>1977–1998 гг.</b>										
1	–12	34	29	<b>48</b>	<b>50</b>	–02	–16	–20	–04	–19
2	–18	10	–10	40	29	08	27	25	14	28
<b>1999–2013 гг.</b>										
1	<b>–76</b>	–36	–48	11	–18	–17	10	40	–15	36
2	–34	–34	–26	39	–05	05	30	17	11	22

*Примечание:* полужирным обычным шрифтом выделены значения  $r$  при  $P = 0,95$ , полужирным курсивом при  $P = 0,99$ .

При сильном недостатке влаги и при вынужденном снижении транспирации листья сильно перегреваются, устьица закрываются, что обычно снижает интенсивность фотосинтеза [9]. Одной из возможностей для сопротивления подавлению фотосинтеза является улучшение условий охлаждения листа (хвои) за счет повышения эвапотранспирации [10]. Ее интенсивность выступает как фактор регулирования температуры листьев [9].

Возрастающая потребность в воде при увеличении эвапотранспирации могла быть компенсирована только почвенной влагой, резервные запасы которой определяются осадками, режим выпадения которых в анализируемые отрезки времени изменялся мало. Транспирационный ток определяет интенсивность фотосинтеза [9]. Количество выпадающих осадков, определяемое облачностью, обратно поступлению солнечной радиации. Их погодичная изменчивость не привела к возникновению связи ствольной продуктивности сосны с этим гидрометеорофактором.

Суммация солнечной радиации с температурой и осадками проявилась в обратной связи с ней радиального прироста сосны на автоморфной почве в городской среде. В результате выстраивается цепь последовательно зависимых процессов: возрастание поступления солнечной радиации → рост температуры воздушной среды и хвои → использование ограниченных запасов почвенной влаги → сокращение эвапотранспирации → обратная корреляция радиального прироста с ФАР и температурой вегетационного периода.

Возникшее противоречие между обратной связью радиального прироста сосны с ФАР и температурой и ее возросшей ствольной продуктивности при потеплении климата можно снять, допустив улучшение минерального питания. Увеличение транспирации вовлекает в биологический круговорот минеральные ресурсы почвы.

Как утверждал К. А. Тимирязев [11], растение вынуждено много испарять, чтобы хорошо питаться. Потепление климата после 1998 г., по всей видимости, вызвало активизацию микробиологической минерализации богатого листового опада и обогащение ресурсного потенциала почвы. Как следствие, улучшение азотного и минерального питания сосны привело к увеличению ее ствольной продуктивности.

**Заключение.** Выполненные исследования показали, что в условиях техногенного загрязнения воздушной среды не существует абсолютной нейтральности сосны к такому мощному фактору, как ФАР, что привело к необходимости использовать ее для уточнения причин угнетения сосны в лесопарке Минска на фоне погодно-климатических флуктуаций (температуры воздуха и осадков) во второй половине XX и начале XXI в. Суммация солнечной радиации с температурой и осадками проявилась в статистически обратной связи с ней радиального прироста сосны на автоморфной почве в городской среде.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гетко, Н. В. Растение в техногенной среде / Н. В. Гетко. – Минск : Наука и техника, 1989. – 208 с.
2. Сергейчик, С. А. Устойчивость древесных растений в техногенной среде / С. А. Сергейчик. – Минск : Наука и техника, 1994. – 279 с.
3. Лесные ландшафты Белоруссии – функциональная организация и устойчивость к техногенным нагрузкам / под общ. ред. Е. А. Сидоровича. – Минск : Наука и техника. – 1992. – 295 с.
4. Чубанов, К. Д. Природная среда в зоне влияния промышленных центров: сосновые леса Белоруссии / К. Д. Чубанов, В. Н. Киселев, А. В. Бойко. – Минск : Наука и техника, 1989. – 180 с.
5. Матвеев, С. М. Эталонные дендрохронологические шкалы ЦЧР: построение, хранение, применение / С. М. Матвеев, Ю. А. Нестеров // Вестник ВГУ. Сер. География и экология. – 2003. – № 2. – С. 77–85.
6. Киселев, В. Н. Экология ели / В. Н. Киселев, Е. В. Матюшевская. – Минск : Издат. центр БГУ, 2004. – 217 с.
7. Douglass, A. E. Climatic cycles and tree growth / A. E. Douglass. Wash. Publ., 1936. Vol. 3. – 289 p.
8. Материалы по радиационному режиму Белоруссии (дополнение к «Справочнику по климату СССР, вып. 7, ч. 1»). – Минск, 1977. – 38 с.
9. Ничипорович А. А. Световое и углеродное питание растений (фотосинтез) / А. А. Ничипорович. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 288 с.
10. Цельникер, Ю. Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений. / Ю. Л. Цельникер. – М. : Наука, 1978. – 212 с.
11. Тимирязев, К. А. Жизнь растения. Пятнадцатое издание / К. А. Тимирязев. – М. : Сельхозгиз, 1949. – 334 с.

#### SUMMARY

*Pine-trees do not have absolute neutrality to solar radiation in terms of man-made air pollution. Tree-ring growth of pine has statistic feedback with direct solar radiation and air temperature on the automorphic soils.*

Поступила в редакцию 13.11.2014 г.