

ВОДНЫЙ ОБМЕН ХВОИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

А.А. Уразбахтин, Р.В. Уразгильдин*

Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

* Эл. почта: urv@anrb.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2024; принята к печати 17.10.2024

Обзор публикаций отечественных и зарубежных авторов указывает на различия в адаптивных реакциях параметров водного обмена растений в ответ на различные типы промышленного загрязнения: наблюдались как отрицательные, так и положительные реакции. Однако отсутствуют сравнительная характеристика выявленных адаптивных реакций при разных типах загрязнения и, главное, их качественная оценка при том, что все авторы указывают на безусловно адаптивный характер выявленных ими реакций. Цель настоящей работы – восполнить эти пробелы. Объект исследования – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), хвоя которой служит хорошим всесезонным биоиндикатором в пяти промцентрах с различными типами загрязнения: три с аэротехногенным и два – отвалы вскрышных пород горнодобывающей промышленности. Проанализированы интенсивность транспирации хвои, относительное содержание воды, дефицит водного насыщения. Показано, что аэротехногенные полиметаллическое загрязнение и полиметаллическое с примесью сернистого ангидрида подавляют водный обмен хвои сосны, вызывая стрессовые и умеренно-стрессовые адаптивные реакции, что свидетельствует о низком адаптивном потенциале сосны к данным типам загрязнения, в то время как полиметаллическое загрязнение в условиях медно-колчеданных и бурогоугольных отвалов горнорудной промышленности стимулирует водный обмен хвои, вызывая умеренно-толерантные адаптивные реакции, что свидетельствует о высоком адаптивном потенциале сосны к данным типам загрязнения. Нефтехимическое загрязнение не оказывает влияния на водный обмен хвои, что сопровождается нейтральной адаптивной реакцией. Кроме того, в условиях аэротехногенного полиметаллического загрязнения и отвалов бурогоугольной промышленности нарушена суточная динамика водного обмена, что сопровождается стрессовой адаптивной реакцией в первом случае и толерантной во втором; остальные типы загрязнения не оказывают влияния на суточную динамику водного обмена. Показана относительная независимость между параметрами водного обмена, когда их адаптивные реакции на один и тот же тип загрязнения различаются, что говорит об экологической пластичности сосны по отношению к разным типам загрязнения.

Ключевые слова: промышленное загрязнение, Южно-Уральский регион, сосна обыкновенная, водный обмен, адаптивные реакции, сравнительная характеристика.

WATER RELATIONS IN NEEDLES OF SCOTCH PINE UNDER DIFFERENT POLLUTION CONDITIONS IN SOUTH URALS

A.A. Urazbakhtin, R.V. Urazgildin*

Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

* Email: urv@anrb.ru

Reviewing research articles published in Russia and abroad suggests that the adaptive responses of water relation parameters in plants to different types of industrial pollution are variable: the observed responses may be negative as well as positive. However, there are still no comparative studies of the observed responses to different types of pollution and no qualitative characterization thereof although all authors point out that the responses observed are certainly adaptive. The purpose of the present study is to fill this gap. The object of the study is pine (*Pinus sylvestris* L.). Its needles are believed to be good all-seasons bioindicator of pollution. The water relations of pine needles were assessed in five industrial regions featuring different types of pollution: airborne pollution in three and pollution by mining dumps in two of them. Water relation parameters studies in pine needles were transpiration, relative water content and water saturation deficit. Both airborne poly-metallic pollutions with or without sulfurous anhydride admixture inhibit water relations thus triggering stress-type adaptive responses. This suggests that the adaptive potential of pine to such pollution types is low. Poly-metallic pollutions caused by copper pyrite and brown coal mining dumps stimulates water relation thus triggering moderately tolerant adaptive responses. This suggests that pine adaptive potential to such types of pollution is high. Petrochemical pollution does not affect water relations in pine needles. Besides, the airborne poly-metallic and brown coal mining dumps pollution types cause impairments in the diurnal course of water relation associated with stress-type adaptive responses in the former case and tolerant responses in the latter case. Other variants of pollution do not influence the diurnal course of water relations. The water relation parameters are relatively independent as far as their responses to the same type of pollution may be different. This fact shows pine ecological plasticity under different types of pollution.

Keywords: industrial pollution, South Urals, Scotch pine, water relation, adaptive responses, comparative characteristics.

Введение

Необходимым условием жизнедеятельности растения является поддержание водного баланса. Содержание воды неодинаково в разных органах растения и зависит от условий внешней среды, вида и возраста растения [10, 17]. Различия между показателями водного обмена у различных видов в одинаковых условиях, а также их сходство свидетельствуют о видоспецифичности водного обмена [11]. Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает значительные различия в выявленных результатах в условиях аэротехногенного загрязнения, которые во многом зависят от источников загрязнения и преобладающих загрязнителей. У одних древесных видов в условиях загрязнения наблюдается подавление процессов водного обмена (снижение интенсивности транспирации, устьичной проводимости и устьичного сопротивления, увеличение оводненности, влагоемкости, водоудерживающей способности и водного потенциала, снижение водного дефицита и др.) [3, 4, 12, 18, 19], другие древесные виды при возрастании уровня загрязнения способны либо усиливать процессы водного обмена (увеличение интенсивности транспирации, снижение оводненности, водоудерживающей способности и водного потенциала, увеличение водного дефицита и др.), либо поддерживать его на уровне контрольных значений [3, 4, 12, 13, 15, 20]. Количество исследований водного обмена хвои и листьев древесных видов в условиях отвалов горнорудной промышленности значительно уступает исследованиям влияния аэротехногенного загрязнения на водный обмен, однако следует отметить, что экологические условия, формируемые отвалами горнорудной промышленности, в целом не оказывают подавляющего действия на водный обмен ассимиляционного аппарата древесных видов [9, 16]. Следует также отметить общую малочисленность зарубежных исследований в отношении водного обмена древесных видов в условиях техногенеза.

У растений физиологические процессы без заметных нарушений могут проходить при показателе водного дефицита от 3 до 14%, без ущерба переносится потеря воды до половины массы насыщения, а показатель, вызывающий серьезные нарушения, находится приблизительно между 1/4 и 3/4 общего содержания воды [5, 6]. Таким образом, адаптация водного обмена является одним из важнейших условий выживания растительных организмов, произрастающих в экстремальных лесорастительных условиях [6, 11]. В публикациях последних лет имеется достаточно литературы, дающей ключ к пониманию, как влияет техногенез на водный обмен хвои и листьев древесных видов [6, 10, 11], но практически отсутствует сравнительная характеристика влияния различных типов промышленного загрязнения на водный обмен и качественная оценка выявленных адаптивных реакций.

Цель работы – сравнительная оценка воздействия различных типов аэротехногенного загрязнения и отвалов

горнорудной промышленности в условиях Южно-Уральского региона на водный обмен хвои сосны обыкновенной.

Методика и объекты исследования

Районы исследования – пять промышленных центров Южно-Уральского региона, характеризующихся разными типами промышленного загрязнения^{1, 2}.

Стерлитамакский промышленный центр (СПЦ) – аэротехногенное полиметаллическое загрязнение. Основные загрязнители: полиметаллическая пыль в составе взвешенных веществ, диоксид серы, диоксид азота, оксид азота, оксид углерода, бензапирен и др. Основные предприятия, влияющие на экологическую ситуацию в промышленном центре, – химические и нефтехимические (АО «Башкирская содовая компания», ОАО «Синтез-Каучук»), предприятия электроэнергетики (Стерлитамакская ТЭЦ и Ново-Стерлитамакская ТЭЦ), а также филиал ООО «ХайдельбергЦементРус», ООО «Газпром газораспределение Уфа».

Карабашский медеплавильный комбинат (КМК) – аэротехногенное полиметаллическое загрязнение в сочетании с сернистым ангидридом. Основные загрязнители: полиметаллическая аэрозоль, сернистый ангидрид, оксид азота, оксид углерода, оксид меди, оксид цинка, соединения железа и др. Основной загрязнитель атмосферы города АО «Карабашмедь».

Уфимский промышленный центр (УПЦ) – нефтехимическое загрязнение. Основными загрязнителями являются: оксид углерода, бензапирен, оксид и диоксид азота, оксид и диоксид серы, взвешенные вещества и др. Основные предприятия, влияющие на экологическую ситуацию в промышленном центре, – нефтеперерабатывающие («Башнефть-Уфанефтехим», «Башнефть-Уфимский НПЗ», «Башнефть-Новыйл»), химическая (ПАО «Уфаоргсинтез»), нефтедобывающая (ООО «Башнефть-добыча»), машиностроение и металлообработка (ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение») и др.

Учалинский горно-обогащительный комбинат (УГОК) – полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности. Основными загрязнителями являются газо-аэрозольные и пылевые выбросы, в составе которых присутствуют тяжелые металлы (Cu, Zn, Hg, Fe, Mn и др.), сульфаты. Основное предприятие, относящееся к цветной металлургии, влияющее

¹ Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2022 году. Уфа: Самрау; 2023.

² Реферат по итогам оказания услуг по осуществлению регулярных наблюдений химического загрязнения атмосферного воздуха на территории города Карабаша, где нет государственной наблюдательной сети. Челябинск: Филиал ФГБУ «ЦЛАТИ по УФО» по Челябинской области; 2022.

на экологическую ситуацию в промышленном центре АО, – «Учалинский горно-обогатительный комбинат». К другим предприятиям, имеющим стационарные источники загрязнения атмосферного воздуха, относятся: ООО «Завод Техноплекс», ООО «Завод Николь – Пак», МУП «Учалыводоканал», ОАО «Учалинские тепловые сети», филиал ООО «Газпром газораспределение Уфа».

Кумертауский бурогольный разрез (КБР) – полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород бурогольного разреза. Основными загрязнителями являются пылевые выбросы, в составе которых присутствуют тяжелые металлы (Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Ca, Mn и др.), формальдегид, оксид углерода, диоксид азота, аммиак. Кроме отвалов вскрышных пород горнорудной промышленности, предприятиями, влияющими на экологическую ситуацию в промышленном центре, являются АО «Свердловская энергогазовая компания», Кумертауская ТЭЦ.

В каждом районе исследований в соответствии с розой ветров были условно выделены зоны сильного загрязнения и контроль (рис. 1).

Объект исследования – сосна обыкновенная, является одним из основных лесообразователей Южно-Уральского региона. Хвоя сосны обыкновенной

может считаться универсальным биоиндикатором и всесезонным тест-объектом для оценки загрязнения воздуха и почвы в различных регионах мира. Из таблицы 1 видно, что значительные различия по таксационным показателям между промзоной и контролем наблюдаются только на отвалах вскрышных пород УГОК и КБР. Это объясняется тем, что естественное зарастание отвалов началось в конце прошлого столетия после прекращения отсыпки грунтов и в условиях контроля отсутствуют древостои, близкие по возрасту. В КМК, УПЦ и СПЦ древостои подобраны корректно, однако следует отметить, что запас древостоя в условиях загрязнения во всех случаях снижается относительно контроля практически на 100 м³/га.

Исследования проводились в полевых условиях непосредственно на пробных площадях в древостоях. Для проведения исследований выбирались дни без осадков с приблизительно равномерной облачностью и температурой атмосферного воздуха в течение дня (рис. 2). Согласно литературным источникам, наиболее пригодным для полевых экологических исследований является метод быстрого взвешивания только что срезанных целых растений или их частей. В основе метода лежит учет количества воды, потерянной листом за короткий промежуток времени в результа-

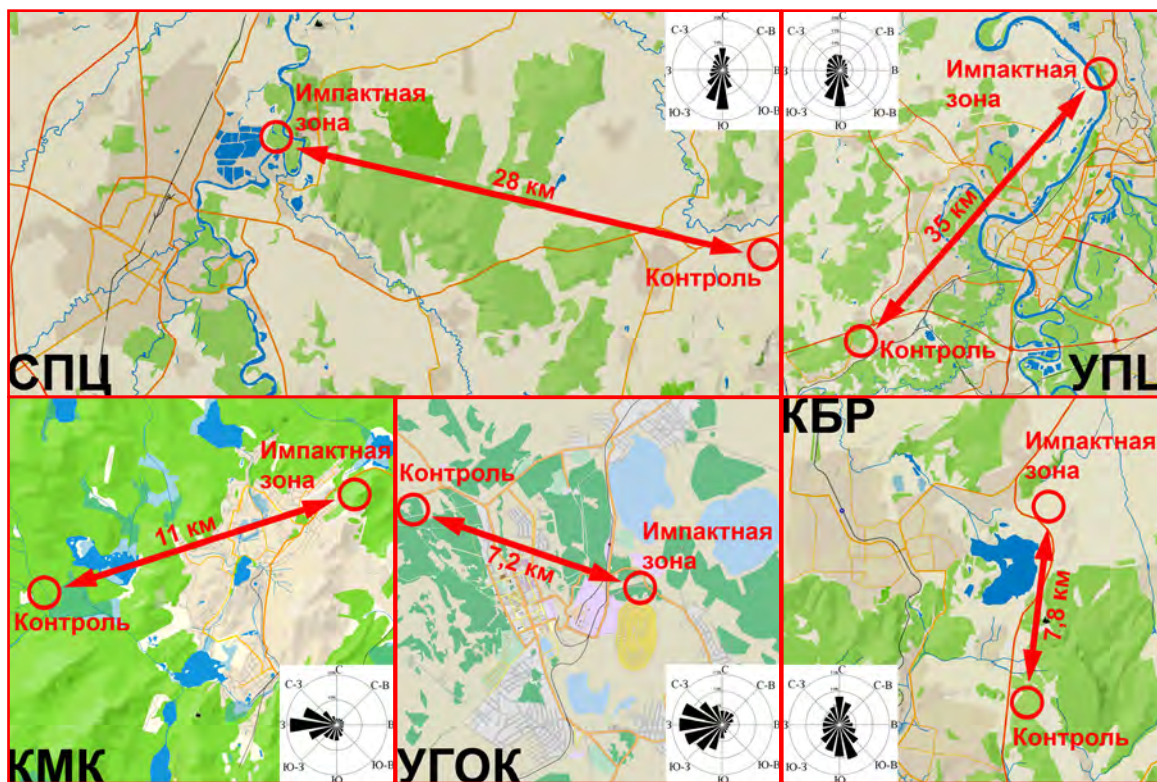


Рис. 1. Схемы расположения пробных площадей в условиях загрязнения и контроля в промышленных центрах Южно-Уральского региона (использованы Яндекс-карты) с годовой розой ветров (<https://ru.meteocast.in>) для каждого промцентра

Табл. 1

Краткая таксационная характеристика древостоев сосны обыкновенной в условиях различных типов загрязнения Южно-Уральского региона

Промцентр	Местоположение, формула древостоя, ТУМ	A _{ср} , лет	D _{ср} , см	H _{ср} , м	Полнота	Густота, шт./га	Запас, м ³ /га
КМК	Загрязнение, 9С1Б, С2	78	24	23	0,9	848	465,488
	Контроль, 8С2Б, С2	71	22	25	0,8	1008	573,296
УПЦ	Загрязнение, 7С3Кл ед. В, С2	63	22	26	0,8	1280	547,808
	Контроль, 8С2Кл ед. В, С2	76	22	25	0,8	1360	670,64
СПЦ	Загрязнение, 10С, В2	62	20	30	0,7	1296	589,36
	Контроль, 10С, В2	38	20	25	0,9	1248	466,304
УГОК	Загрязнение, 5С5Б, А2	35	12	14	0,6	1328	369,76
	Контроль, 10С+Б, D2	55	24	28	0,9	1253	826,3
КБР	Загрязнение, 7С3Б, А2	28	14	18	0,8	1440	247,78
	Контроль, 10С, D2	47	20	25	0,7	1056	529,888

Условные обозначения: ТУМ – тип условия местопроизрастания; A_{ср}, D_{ср}, H_{ср} – средние возраст, диаметр и высота древостоя.

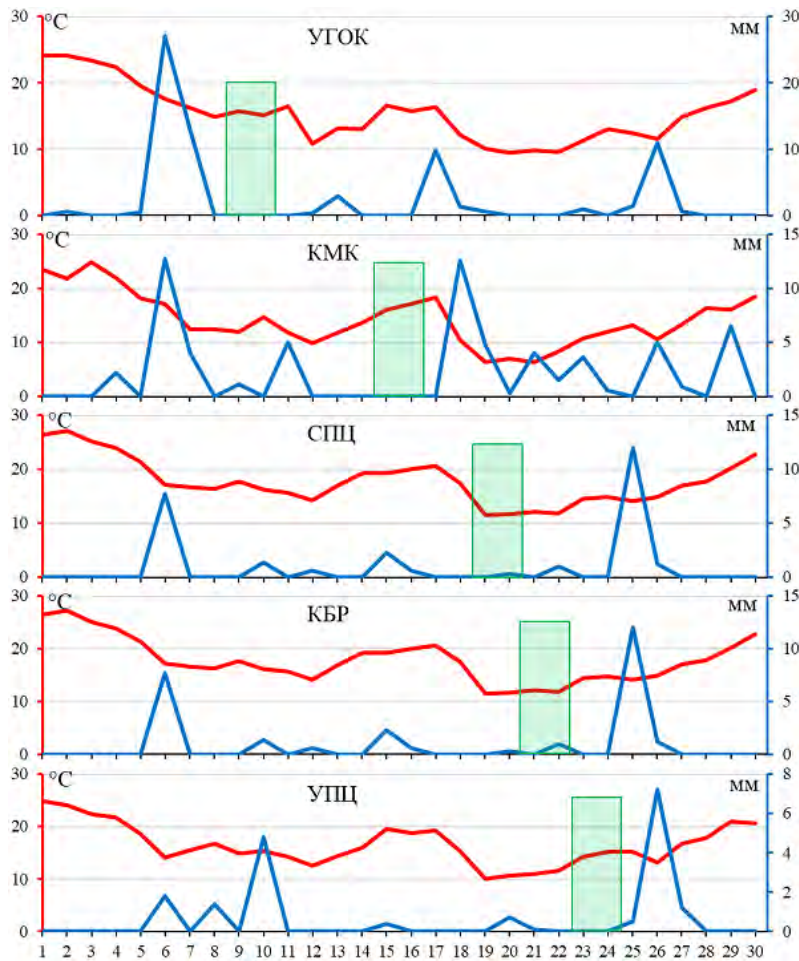


Рис. 2. Климатические данные за июнь 2023 года в промышленных центрах Южно-Уральского региона (<http://aisori-m.meteo.ru>). Условные обозначения: — среднесуточная температура воздуха, °С, — количество осадков, мм; — дни проведения полевых исследований в промзоне и контроле

те транспирации. Повторность – по 20 укороченных побегов сосны обыкновенной текущего года генерации из нижней части кроны с южной стороны дерева. В течение июля проводились измерения интенсивности транспирации (ИТ), относительного содержания воды (ОСВ), дефицита водного насыщения (ДВН). Измерения проводились: утром с 8:00 до 10:00 ч, в полдень с 12:00 до 14:00 ч и вечером с 16:00 до 18:00 ч. ИТ определяли быстрым взвешиванием образцов на высокоточных электронных весах (Diamond 0,001), после чего образцы выдерживали 3 минуты на открытом воздухе, не допуская попадания прямых солнечных лучей, и взвешивали повторно. Расчет ИТ: мг воды на 1 г сырого веса в 1 час (мг/г·час). ОСВ и ДВН хвои определяли быстрым взвешиванием на электронных весах с последующим погружением основания укороченного побега в воду и выдерживанием в закрытом эксикаторе на рассеянном свете в течение 3 часов и повторным взвешиванием. Для вычисления ОСВ определяли вес абсолютно сухих образцов после выдерживания в термосушильном шкафу две недели при температуре +60 °С. Расчет показателей ОСВ и ДВН – в процентах (%) [1, 2, 8].

При качественном определении адаптивных реакций использованы классификация и методика, предложенные Р.В. Уразгильдиным [14]. В дендрэкологии к «классическим» адаптивным реакциям водного обмена древесных растений на усиление промышленного загрязнения относятся [6, 11]: уменьшение интенсивности транспирации (как показатель закрытия устьиц для уменьшения поступления токсикантов в хвою), увеличение относительного содержания воды (как показатель уменьшения интенсивности транспирации) и уменьшение дефицита водного насыщения (как показатель увеличения содержания воды в хвое). Эти изменения в условиях загрязнения относительно контроля, если они значительные количественно (изменения более чем на 30% считали значимыми количественно [5, 6]) и статистически значимые, относили к «стрессовым» адаптивным реакциям, противоположные изменения относили к «толерантным» адаптивным реакциям, а реакции незначительные количественно или статистически незначимые – к «умеренно-стрессовым» и «умеренно-толерантным». Отсутствие изменений определяли «нейтральной» адаптивной реакцией. Статистическая обработка данных проводилась с применением программ Microsoft Excel 2010, Statistica 6.0.

Результаты исследования

ИТ (рис. 3А) на протяжении всего дня в условиях КБР характеризуется снижением относительно контроля значительным по величине и статистически значимым (на 0,12–0,91 мг/г·час, в среднем на 0,62 мг/г·час), в УГОК – незначительным и незначимым (на

0,03–0,37 мг/г·час, в среднем на 0,2 мг/г·час). В остальных промцентрах единая четкая тенденция отсутствует: в течение дня ИТ в условиях загрязнения либо превышает контрольные значения, либо снижается относительно контроля без каких-либо закономерностей, поэтому в этих условиях адаптивные реакции оцениваются по среднесуточным показателям. ИТ незначительно возрастает относительно контроля в УПЦ (на 0,15 мг/г·час), но значительно снижается в СПЦ (на 0,7 мг/г·час) и КМК (на 0,49 мг/г·час). Естественная суточная динамика ИТ (увеличение к полудню и снижение к вечеру) во всех промцентрах отсутствует, что характеризует ее дисбаланс: в СПЦ наблюдается снижение на протяжении всего дня, в КБР обратная реакция – увеличение на протяжении всего дня, в УПЦ уменьшение к полудню и восстановление к вечеру, в КМК и УГОК изменения в течение дня отсутствуют. Следует отметить, что во всех промцентрах уровень ИТ приблизительно одинаковый, за исключением УПЦ, где этот показатель несколько ниже.

ОСВ (рис. 3Б) существенно и статистически значимо возрастает относительно контроля в СПЦ на протяжении всего дня (на 6,25–12,42%, в среднем на 8,85%), а в КБР незначительно и незначимо снижается относительно контроля (на 1,4–4,55%, в среднем на 2,92%). В остальных промцентрах единая тенденция отсутствует, в течение дня ОСВ в условиях загрязнения остается либо выше, либо ниже контроля без каких-либо закономерностей, поэтому в этих условиях адаптивные реакции оцениваются по среднесуточным показателям. ОСВ незначительно снижено относительно контроля в УГОК (на 2,49%) и не меняется в КМК и УПЦ. Суточная динамика ОСВ также различается: в КМК, УПЦ и УГОК наблюдается ее естественный ход – снижение к полудню и восстановление к вечеру, однако в СПЦ наблюдается постоянный рост в течение дня, а в КБР постоянное снижение в течение дня, что характеризует суточный дисбаланс данного параметра в этих условиях. Следует отметить, что ОСВ в УПЦ значительно выше, чем в других промцентрах, и в целом ОСВ снижается в ряду: УПЦ→КБР→СПЦ→КМК→УГОК.

ДВН (рис. 3В) в УГОК значительно и статистически значимо выше контроля на протяжении всего дня (на 2,16–3,81%, в среднем на 3,13%), а в СПЦ значительно и значимо ниже на протяжении всего дня (на 4,05–10,0%, в среднем на 6,72%). В остальных промцентрах единая тенденция отсутствует, в течение дня ДВН в условиях загрязнения либо выше контроля, либо ниже без каких-либо закономерностей, поэтому в этих условиях адаптивные реакции оцениваются по среднесуточным показателям. ДВН незначительно выше контроля в КБР (на 0,65%), незначительно ниже в КМК (на 1,02%) и остается без изменений в УПЦ. Суточная динамика ДВН также разная: в КМК, УПЦ,

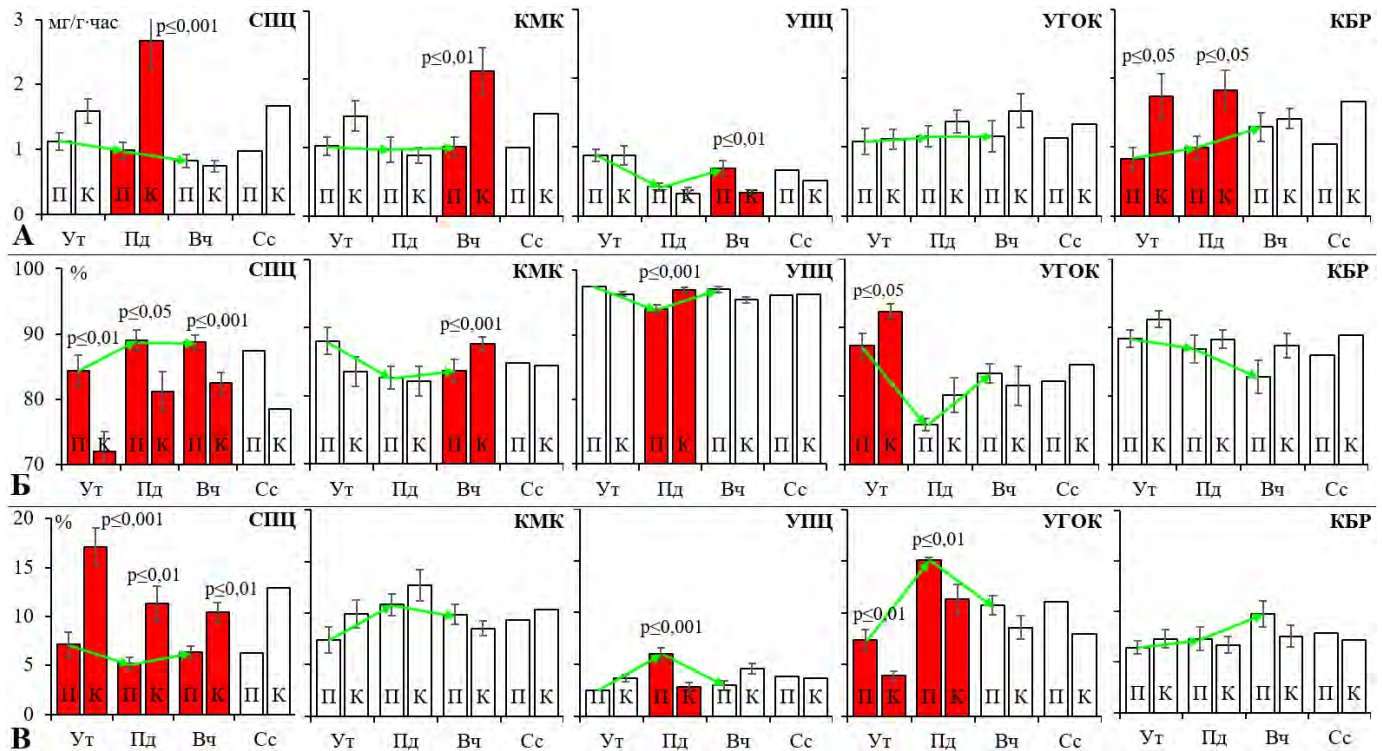


Рис. 3. Интенсивность транспирации (А), относительное содержание воды (Б) и дефицит водного насыщения (В) хвои сосны в условиях разных типов загрязнения. Условные обозначения: П – промзона; К – контроль; Ут – утро; Пд – полдень; Вч – вечер; Сс – среднесуточное значение; ■ ■ – различия статистически значимые; p – уровень значимости; → → – суточная динамика водного обмена в промзоне

УГОК наблюдается ее естественный ход – увеличение к полудню и снижение к вечеру, в КБР наблюдается постоянный рост ДВН в течение дня, а в СПЦ снижение к полудню и восстановление к вечеру, что характеризует суточный дисбаланс ДВН в этих условиях. Следует отметить, что в УГОК ДВН значительно выше, чем в других промцентрах, и в целом ДВН снижается в ряду: УГОК→КМК→КБР→СПЦ→УПЦ.

Полученные данные позволили классифицировать адаптивные реакции водного обмена хвои сосны в различных типах загрязнения Южно-Уральского региона (табл. 2) и показать их относительную независимость.

В условиях СПЦ наблюдается классическая «стрессовая» адаптивная реакция у всех параметров водного обмена – снижение ИТ относительно контроля, в результате происходит увеличение ОСВ и уменьшение ДВН. У всех трех параметров в промзоне нарушена естественная суточная динамика в сторону «стрессовой» реакции, при этом между ИТ и ОСВ наблюдаются согласованные суточные соизменения, а ДВН проявляет относительную независимость. Общая реакция водного обмена в условиях полиметаллического загрязнения «стрессовая».

В условиях КМК наблюдается относительная независимость между адаптивными реакциями: при отсутствии изменений ОСВ происходит уменьшение ИТ и ДВН относительно контроля, таким образом адаптивная реакция в отношении ОСВ «нейтральная», в отношении ИТ «стрессовая», в отношении ДВН «умеренно-стрессовая». В промзоне у ИТ изменения в течение дня отсутствуют, в то время как у ОСВ и ДВН наблюдается естественная ненарушенная суточная динамика, что характеризует реакцию ИТ как «нейтральную», а ОСВ и ДВН как «умеренно-толерантную», при этом между ОСВ и ДВН наблюдаются согласованные суточные соизменения, а ИТ проявляет относительную независимость. Таким образом, наблюдается поливариантность адаптивных реакций, но с определенной долей условности общую реакцию водного обмена в условиях полиметаллического загрязнения с примесью сернистого ангидрита можно характеризовать как «умеренно-стрессовую».

В условиях УПЦ при отсутствии изменений ОСВ и ДВН происходит увеличение ИТ относительно контроля, таким образом адаптивная реакция в отношении ОСВ и ДВН «нейтральная», в отношении ИТ «умеренно-толерантная». В промзоне у ИТ нарушена естественная суточная динамика в сторону «умеренно-

Адаптивные реакции параметров водного обмена хвои сосны обыкновенной при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона

Промцентр	Параметры водного обмена*														
	ИТ					ОСВ					ДВН				
	Утро	Полдень	Вечер	Среднесуточное значение	Суточная динамика	Утро	Полдень	Вечер	Среднесуточное значение	Суточная динамика	Утро	Полдень	Вечер	Среднесуточное значение	Суточная динамика
СПЦ	↓	↓↓	↑	↓↓	↘	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↗	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↗
КМК	↓	↑	↓↓	↓↓	–	↑	–	↓↓	–	↗	↓	↓	↑	↓	↘
УПЦ	–	↑	↑	↑	↗	↑	↓↓	↑	–	↗	↓	↑↑	↓	–	↗
УГОК	↓	↓	↓	↓	–	↓↓	↓	↑	↓	↗	↑↑	↑↑	↑	↑↑	↗
КБР	↓↓	↓↓	↓	↓↓	↗	↓	↓	↓	↓	↘	↓	↑	↑	↑	↗

* Обозначения изменений относительно контроля: ↑↑ – значительное и статистически значимое увеличение; ↑ – незначительное и незначимое увеличение; (–) – изменения отсутствуют; ↓ – незначительное и незначимое уменьшение; ↓↓ – значительное и значимое уменьшение. Обозначения суточной динамики: ↘ – снижение в течение дня; ↗ – увеличение в течение дня; ↙ – снижение к полудню и восстановление к вечеру; ↘ – увеличение к полудню и снижение к вечеру.

стрессовой» реакции, в то время как у ОСВ и ДВН наблюдается естественная ненарушенная суточная динамика, что характеризует их реакцию как «умеренно-толерантную», при этом между ОСВ и ДВН наблюдаются согласованные суточные соизменения, а ИТ проявляет относительную независимость. Здесь также наблюдается поливариантность адаптивных реакций, но с определенной долей условности общую реакцию водного обмена в условиях нефтехимического загрязнения можно характеризовать как «нейтральную».

В условиях УГОК наблюдается относительная независимость между адаптивными реакциями: при незначительном снижении ИТ и ОСВ относительно контроля происходит значительное увеличение ДВН, таким образом адаптивная реакция в отношении ИТ «умеренно-стрессовая», в отношении ОСВ «умеренно-толерантная», в отношении ДВН «толерантная». В промзоне у ИТ изменения в течение дня отсутствуют, в то время как у ОСВ и ДВН наблюдается естественная ненарушенная суточная динамика, что характеризует реакцию ИТ как «нейтральную», а ОСВ и ДВН как «толерантную», при этом между ОСВ и ДВН наблюдаются согласованные суточные соизменения, а ИТ проявляет относительную независимость. Здесь также наблюдается поливариантность адаптивных реакций, но с определенной долей условности общую реакцию водного обмена в условиях полиметаллического загрязнения отвалов медно-колчеданной горно-

рудной промышленности можно характеризовать как «умеренно-толерантную».

В условиях КБР наблюдается относительная независимость между адаптивными реакциями: при значительном снижении ИТ и незначительном ОСВ относительно контроля происходит незначительное увеличение ДВН, таким образом адаптивная реакция в отношении ИТ «стрессовая», в отношении ОСВ и ДВН «умеренно-толерантная». У всех трех параметров водного обмена в промзоне наблюдаются согласованные суточные соизменения, при этом у всех нарушена естественная суточная динамика в сторону «толерантной» реакции. Здесь также наблюдается поливариантность адаптивных реакций, но с определенной долей условности общую реакцию водного обмена в условиях полиметаллического загрязнения отвалов бурогоугольной горнорудной промышленности можно характеризовать как «умеренно-толерантную».

Обсуждение

Анализ публикаций за последние 20 лет, посвященных водному обмену древесных растений в условиях техногенеза, позволил выделить ряд положений. Прежде всего следует отметить, что число исследований водного обмена хвои и листьев древесных видов в условиях отвалов горнорудной промышленности значительно уступает числу исследований влияния аэротехногенного загрязнения на водный обмен. По

имеющимся данным, на отвалах «Кедровского» разреза угольной промышленности Кузбасса (приоритетными загрязнителями являются тяжелые металлы Cd, Pb, Zn, Mg, Ni) показано снижение общей воды у хвой сосны обыкновенной и листьев березы повислой, причем во фракционном составе отмечается снижение ее свободной и повышение связанной формы [9]. Кроме того, у хвой сосны выявлено незначительное повышение водоудерживающей способности относительно контроля (до 3–4%), снижение суточных потерь воды (до 5%) и значительное возрастание водного дефицита (до 20%) [16]. Эти данные полностью согласуются с результатами наших исследований в условиях отвалов горнорудной промышленности Южно-Уральского региона, причем для УГОК (незначительное снижение ИТ и ОСВ и значительное увеличение ДВН) наши данные наиболее близки к результатам, полученным на отвалах «Кедровского» разреза, чем при сравнении с КБР (значительное снижение ИТ, незначительное снижение ОСВ и незначительное увеличение ДВН). Тем не менее, направление адаптивных реакций на всех трех отвалах одинаковое, а различия наблюдаются только в степени их проявления. На данном этапе можно констатировать, что экологические условия, формируемые отвалами горнорудной промышленности, в значительной степени определяют водный обмен и толерантный характер адаптивных реакций сосны.

В отношении аэротехногенного загрязнения анализ отечественных публикаций показывает значительные различия в выявленных результатах, которые во многом зависят от источников загрязнения и преобладающих загрязнителей. Наиболее общими являются результаты, когда разные древесные виды проявляют противоположные адаптивные реакции к одному и тому же типу загрязнения. Так, при усилении загрязнения атмосферы предприятиями черной металлургии, теплоэнергетики и машиностроения г. Ижевска листья березы повислой, клена ясенелистного, липы мелколистной и караганы древовидной значительно увеличивали водоудерживающую способность, а ивы козьей и яблони ягодной – незначительно. Противоположная реакция наблюдалась у тополя бальзамического и розы майской – снижение водоудерживающей способности в условиях загрязнения, а у рябины обыкновенной достоверных отличий не выявлено [3, 4]. В условиях загрязнения Сыктывкарского лесопромышленного комплекса (оксиды углерода, серы, азота, сероводород, сераорганические соединения, минеральная пыль) показано, что при возрастании устьичной проводимости наблюдалось незначительное снижение водного дефицита и значительное снижение интенсивности транспирации хвой ели сибирской при отсутствии изменений по влагоемкости, оводненности и водному потенциалу.

В хвое сосны обыкновенной, напротив, водный дефицит и интенсивность транспирации на загрязненном участке увеличиваются при отсутствии изменений по оводненности и водному потенциалу [12]. Также есть публикации, где водный обмен древесных видов характеризуется только толерантными адаптивными реакциями. Так, при повышении содержания SO₂, NO₂, CO₂, Pb и фторидов в воздухе г. Пскова отмечено увеличение интенсивности транспирации и дефицита водного насыщения, снижение водоудерживающей способности и уменьшение содержания общей воды в листьях у березы повислой, липы мелколистной, сирени обыкновенной и тополя черного, при этом уменьшается количество свободной воды, но увеличивалось количество связанной [15]. Увеличение интенсивности атмосферного загрязнения в районе сосредоточения промышленных предприятий г. Красноярска значительно снижало водоудерживающую способность листьев у березы повислой и яблони лесной, но слабо у черемухи Маака [13]. Анализ этих результатов показывает, что в условиях аэротехногенного загрязнения водный обмен листовых и светлохвойных древесных видов характеризуется главным образом толерантными адаптивными реакциями, стрессовые адаптивные реакции наблюдаются в отдельных случаях и в основном при загрязнении тяжелыми металлами. В наших исследованиях только в условиях полиметаллического аэротехногенного загрязнения СПЦ и КМК наблюдается стрессовая адаптивная реакция водного обмена сосны, ярко выраженная в условиях СПЦ и менее выраженная в КМК. В целом это соответствует литературным данным. Однако нефтехимическое загрязнение практически не оказывает влияния на водный обмен хвой сосны, что сопровождается нейтральной адаптивной реакцией.

Результаты исследований зарубежных авторов входят в противоречие с нашими выводами, однако здесь следует учесть, что в публикациях последних лет обнаружены работы только с листовыми древесными видами, а анализ водного обмена хвойных видов в значительной степени относится к прошлому столетию. Не следует также исключать различия в климатических условиях районов проведенных исследований. Так, в условиях избыточных концентраций Cd, Pb, Zn, Fe и Mn в почвах промышленного центра г. Сосновец (Польша) выявлено пониженное относительно содержание воды (до 76%) в листьях робинии, причем с усилением загрязнения этот показатель значительно снижается (на 9% относительно контроля) со значительной положительной корреляцией с содержанием металлов в почве (до 0,51) [20]. В условиях загрязнения полициклическими ароматическими углеводородами городской среды г. Кракова с усилением загрязнения возрастает оводненность листьев у липы мелколистной и тополя канадского [18]. Обследование деревьев

лагерстремии, растущих вдоль обочины Национального шоссе в городе Дехрадун (Индия) показало, что при сравнении с контролем у листьев снижается интенсивность транспирации на 42,14%, устьичная проводимость на 66,85% и устьичное сопротивление на 212,2%, но при этом наблюдалась повышенная эффективность водопользования на 9,4% [19]. Анализ этих результатов показывает толерантную реакцию водного обмена древесных видов к полиметаллическому загрязнению и стрессовую реакцию к углеводородному, в то время как в условиях Южно-Уральского региона полиметаллическое загрязнение сопровождается стрессовой адаптивной реакцией водного обмена хвои сосны, а углеводородное загрязнение – нейтральной адаптивной реакцией. Следует также отметить общую малочисленность зарубежных исследований в отношении водного обмена древесных видов в условиях техногенеза.

В некоторых исследованиях авторы прямо указывают на отсутствие тесных и прямых взаимосвязей между параметрами водного обмена в условиях загрязнения [12, 15]. За исключением СПЦ данная закономерность показана нами в условиях загрязнения остальных четырех промцентров, наиболее ярко проявляющаяся в КМК, УГОК и КБР. Кроме того: 1) нами показаны нарушение суточной динамики водного обмена в условиях загрязнения и отсутствие тесных и прямых взаимосвязей между параметрами водного обмена в суточной динамике; 2) качественная оценка выявленных реакций позволяет показать направление адаптации водного обмена хвои сосны. В материалах отечественных и зарубежных исследователей такие результаты отсутствуют, притом что в проанализированных публикациях все авторы указывают на безусловно адаптивный характер выявленных ими реакций.

Выводы

Аэротехногенное полиметаллическое загрязнение и полиметаллическое с примесью сернистого ангидрида подавляют водный обмен хвои сосны, вызывая стрессовые и умеренно-стрессовые адаптивные реакции, что свидетельствует о низком адаптивном потенциале сосны к данным типам загрязнения, в то

время как полиметаллическое загрязнение в условиях медно-колчеданных и буроугольных отвалов горнорудной промышленности стимулирует усиление водного обмена хвои, вызывая умеренно-толерантные адаптивные реакции, что свидетельствует о высоком адаптивном потенциале сосны к данным типам загрязнения. Нефтехимическое загрязнение не оказывает значительного влияния на водный обмен хвои, что сопровождается нейтральной адаптивной реакцией. Кроме того, в условиях аэротехногенного полиметаллического загрязнения и отвалов буроугольной промышленности нарушена суточная динамика водного обмена, что сопровождается стрессовой адаптивной реакцией в первом случае и толерантной во втором; остальные типы загрязнения не оказывают значительного влияния на суточную динамику водного обмена. Показана относительная независимость между параметрами водного обмена, когда их адаптивные реакции на один и тот же тип загрязнения различаются, что говорит об экологической пластичности сосны по отношению к разным типам загрязнения. Качественная оценка выявленных реакций позволяет рекомендовать использование сосны для создания защитных насаждений в тех условиях загрязнения, где у нее проявляются толерантные адаптивные реакции и высокий адаптивный потенциал и отказаться от ее использования в условиях, где проявляются стрессовые адаптивные реакции и низкий адаптивный потенциал.

Благодарности. В работе использована приборная база Центра коллективного пользования «Агидель» УФИЦ РАН.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00570-24-01 по теме № 123020700152-5 «Устойчивость лесобразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Андросова АВ. Транспирация как ключевой показатель водного обмена. Научный альманах. 2020;2(64):111-4.
2. Бейдемман ИН. К методике изучения водного режима растений. Бот журн. 1956;41(2):212-9.
3. Бухарина ИЛ, Двоглазова АА. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет»; 2010.
4. Бухарина ИЛ, Поварницина ТМ, Ведерников КЕ. Экологобиологические особенности дре-

- весных растений в урбанизированной среде. Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА; 2007.
5. Веретенников АВ. Фотосинтез древесных растений. Воронеж: ВГУ; 1980.
 6. Гетко НВ. Растения в техногенной среде: Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника; 1989.
 7. Григоренко АВ. Физиологические и морфологические показатели хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения. Вестник КрасГАУ. 2015;4:15-9.
 8. Иванов ЛА, Силина АА, Цельникер ЮЛ. О методе быстрого взвешивания для определения транспирации в естественных условиях. Бот журн. 1950;35(2):171-85.
 9. Колмогорова ЕЮ, Неверова ОА. Изучение водного режима и годичного прироста побегов у древесных растений, произрастающих на породном отвале Кедровского угольного разреза. Вестник КрасГАУ. 2016;9:87-94.
 10. Кузнецов ВВ, Дмитриева ГА. Физиология растений. Том 1: учебник для вузов. М.: Издательство Юрайт; 2024.
 11. Кулагин ЮЗ. Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука; 1974.
 12. Сенькина СН. Влияние техногенного загрязнения на показатели водного обмена *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. В кн.: Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем. Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием; 05 декабря 2019. Киров: Вятский государственный университет; 2019. С. 254-7.
 13. Сунцова ЛН, Иншаков ЕМ, Козик ЕВ. Оценка состояния городской среды методом фитоиндикации (на примере г. Красноярск). Лесной журн. 2011;4:29-32.
 14. Уразгильдин РВ. Лесообразующие виды Предуралья в условиях техногенеза: сравнительная эколого-биологическая характеристика, видоспецифичность, адаптивные реакции, адаптивные стратегии (диссертация). Уфа: УИБ УФИЦ РАН; 2021.
 15. Хмелевская ИА. Эколого-физиологические исследования древесных пород в г. Пскове. Вестн Псковского гос педагогич ун-та сер естеств физ-мат науки. 2008;6:37-57.
 16. Цандекова ОЛ, Колмогорова ЕЮ. Особенности адаптационных перестроек хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях породного отвала угольного разреза «Кедровский». Вестник Оренбургского государственного университета. 2016;6(194):81-5.
 17. Эржапова РС, Эржапова РС. Физиология растений. Водный режим растений. Учебное пособие. Грозный: Издательство ЧГУ; 2015.
- Общий список литературы/References**
1. Androsova AV. [Transpirations as a key indicator of water metabolism]. Nauchnyi Almanakh. 2020;2(64):111-4. (In Russ.)
 2. Beydeman IN. [On a method for studying the water regimen of plants]. Bot Zhurn. 1956;41(2):212-9. (In Russ.)
 3. Bukharina IL, Dvoyeglazova AA. Bioekologivheskiye Osobennosti Travianistykh i Drevesnykh Rasteniy v Gorodskigh Nasazhdeniyakh. [Bioecological Features of Herbaceous and Woody Plants in Urban Plantations]. Izhevsk: Udmurtskiy Universitet; 2010. (In Russ.)
 4. Bukharina IL, Povarnitsina TM, Vedernikov KE. Ekobiologicheskiye Osobennosti Drevesnykh Rasteniy v Urbanizirovannoy Srede. [Ecological and Biological Features of Woody Plants in an Urbanized Environment]. Izhevsk: FGOU VPO Izhevskaya GSKHA; 2007. (In Russ.)
 5. Veretennikov AV. Fotosintez Drevesnykh Rasteniy. [Photosynthesis of woody plants]. Voronezh: VGU; 1980. (In Russ.)
 6. Getko NV. Rasteniya v Teknogennoy Srede: Struktura i Funktsiya Assimiliatsionnogo Apparata. [Plants in technogenic environment: Structure and function of assimilation apparatus]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1989. (In Russ.)
 7. Grigorenko AV. [Physiological and morphological indicators of the scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) In the conditions of aero-anthropogenic pollution]. Vestnik KrasGAU. 2015;4:15-19. (In Russ.)
 8. Ivanov LA, Silina AA, Cel'niker YuL. [On the method of rapid weighing for determination of transpiration under natural conditions]. Bot Zhurn. 1950;35(2):171-85.
 9. Kolmogorova YeYu, Neverova OA. [Study of water regime and annual growth of shoots in woody plants growing on spoil dump Kedrovskiy coal mine]. Vestnik KrasGAU. 2016;9:87-94. (In Russ.)
 10. Kuznecov VV, Dmitrieva GA. Fiziologiya Rasteniy. Tom 1. [Physiology of Plants. Vol. 1]. Moscow: Izdatelstvo Yurayt; 2024. (In Russ.)
 11. Kulagin YuZ. Drevesnye Rasteniya i Promyshlennaya Sreda. [Woody plants and industrial environment]. Moscow: Nauka; 1974. (In Russ.)
 12. Sen'kina SN. [Impact of technogenic pollution on water metabolism indicators *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb]. In: Biodiagnostika Sostoyaniya Prirodnykh i Prirodno-Tekhnogennykh Sistem. Kirov: Vyatskiy Gosudarstvennyj Universitet; 2019. P. 254-27. (In Russ.)

13. Suntsova LN, Inshakov YeM, Kozik YeV. [Assessment of urban environment state by phytoindication method (as exemplified with Krasnoyarsk)]. *Lesnoy Zhurnal*. 2011;4:29-32. (In Russ.)
14. Urazgildin RV. *Lesoobrazuyushchiye Vidy Preduralya v Usloviyakh Tekhnogeneza: Sravnitel'naya Ekologo-Biologicheskaya Kharakteristika, Vidospecifichnost', Adaptivnye Rreaktsii, Adaptivnye Strategii*. PhD Theses Ufa: UIB UFIC RAN; 2021. (In Russ.)
15. Khmelevskaya IA. [Ecological and physiological studies of tree species in Pskov city]. *Vestnik Pskovskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Universiteta Seriya Yestestvennyye i Fiziko-Matematicheskkiye Nauki*. 2008;6:37-57. (In Russ.)
16. Tsandekova OL, Kolmogorova YeYu. [Characteristics of adaptation reformations of *Pinus sylvestris* L. needles under the conditions of the rock dump of the Kedrovsky coal mine]. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2016;6(194):81-5. (In Russ.)
17. Erzhapova RS, Erzhapova RS. *Fiziologiya Rasteniy Vondyi Rezhim Rasteniy*. [Plant physiology. Water regime of plants] Izdatelstvo ChGU; 2015. (In Russ.)
18. Klamerus-Iwan A, Błońska E, Lasota J, Waligórski P, Kalandyk A. Seasonal variability of leaf water capacity and wettability under the influence of pollution in different city zones. *Atmosph Pollut Res*. 2018;9(3):455-63.
19. Singh H, Savita, Sharma R, Sinha S, Kumar M, Kumar P, Verma A, Sharma SK. Physiological functioning of *Lagerstroemia speciosa* L. under heavy roadside traffic: an approach to screen potential species for abatement of urban air pollution. *Biotech*. 2017;7(1):61.
20. Skrynetska I, Ciepał R, Kandziora-Ciupa M, Barczyk G, Nadgórska-Socha A. Ecophysiological responses to environmental pollution of selected plant species in an industrial urban area. *Int J Environ Res*. 2018;12:255-67.

