

УДК 574.24

DOI: 10.31040/2222-8349-2025-0-3-92-102

**ВОДНЫЙ ОБМЕН ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА**

© Р.Р. Галимов, Р.В. Уразгильдин

Исследование посвящено качественной оценке адаптивных реакций водного обмена листьев березы повислой (широко распространенный лесообразователь района исследований) в условиях воздействия промышленных центров Южно-Уральского региона с различными типами загрязнения (три с преимущественно аэротехногенным и два – отвалы горнодобывающей промышленности) и их сравнительная характеристика. Проанализированы интенсивность транспирации, относительное содержание воды, дефицит водного насыщения. Показано, что аэротехногенное полиметаллическое загрязнение, полиметаллическое с примесью сернистого ангидрида и нефтехимическое подавляют водный обмен листьев березы, вызывая «умеренно-стрессовые» и «стрессовые» адаптивные реакции, что свидетельствует о низком адаптивном потенциале березы к данным типам загрязнения, в то время как полиметаллическое загрязнение в условиях медно-колчеданных и буроугольных отвалов горнорудной промышленности увеличивает водный обмен листьев, вызывая «умеренно-толерантные» и «толерантные» адаптивные реакции, что свидетельствует о высоком адаптивном потенциале березы к данным типам загрязнения. В условиях аэротехногенных полиметаллического с примесью сернистого ангидрида и нефтехимического загрязнений нарушена суточная динамика водного обмена, что сопровождается «умеренно-стрессовой» адаптивной реакцией; остальные типы загрязнения не нарушают суточную динамику водного обмена, что сопровождается «умеренно-толерантной» и «толерантной» адаптивными реакциями. Показана относительная независимость между параметрами водного обмена, когда наблюдаются различия в их адаптивных реакциях к одному и тому же типу промышленного загрязнения, что свидетельствует об экологической пластичности березы по отношению к разным типам загрязнения.

Ключевые слова: промышленное загрязнение, береза повислая, водный обмен листьев, адаптивные реакции, сравнительная характеристика.

**Введение.** В условиях промышленного загрязнения к климатическим факторам, влияющим на водный обмен (интенсивность ФАР, температура и относительная влажность воздуха, дефицит упругости водяного пара, запасы влаги в почве и др.), добавляется антропогенный фактор, способный в значительной степени изменить физиологические процессы, протекающие в листьях растений. Исследований, посвященных оценке различных параметров водного обмена растений в условиях техногенеза, имеется достаточно, как зарубежных, так и российских, однако, полученные результаты практически во всех различаются. В качестве причин указываются различия в источниках загрязнения и состав загрязнителей в валовом объеме. Промышленное загрязнение вызывает либо

подавление водного обмена у растений (снижение интенсивности транспирации, устьичной проводимости, увеличение оводненности, влагоемкости, водоудерживающей способности и водного потенциала, снижение водного дефицита и др.) [1–5], либо усиление или отсутствие различий по сравнению с контролем [1–3, 6–8]. Многими исследованиями показаны противоположные реакции разных видов растений на один и тот же тип загрязнения. В указанных публикациях показано как влияет промышленное загрязнение на водный обмен растений, выявлены специфические и неспецифические адаптивные реакции, определяется ключевая роль физиологических адаптаций для успешного произрастания растений в техногенных условиях, но при этом отсутст-

ГАЛИМОВ Рамиль Раилович, Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,  
e-mail: ramil\_galimov\_98@mail.ru

УРАЗГИЛЬДИН Руслан Вилисович – д.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,  
e-mail: urv@anrb.ru

вует качественная оценка выявленных адаптивных реакций и сравнение влияния разных типов промышленного загрязнения на один древесный вид. Цель работы – качественная оценка адаптивных реакций водного обмена листьев березы повислой в условиях воздействия различных типов аэротехногенного загрязнения и отвалов горнорудной промышленности Южно-Уральского региона и их сравнительная характеристика.

**Районы, объект и методика исследования.** В качестве полигонов для исследования выбраны пять различающихся по типу загрязнения [9–10] и объемами выбросов (табл. 1) промышленных центров Южно-Уральского региона: 1. Стерлитамакский промышленный центр (СПЦ) – полиметаллическое загрязнение (полиметаллическая пыль в составе взвешенных веществ, диоксид серы, диоксид азота, оксид азота, оксид углерода, бензапирен и др.); 2. Карабашский медеплавильный комбинат (КМК) – полиметаллическое загрязнение в сочетании с сернистым ангидридом (полиметаллическая аэрозоль, сернистый ангидрид, оксид азота, оксид углерода, оксид меди, оксид цинка, соединения железа и др.); 3. Уфимский промышленный центр (УПЦ) – нефтехимическое загрязнение (оксид углерода, бензапирен, оксид и диоксид азота, оксид и диоксид серы, взвешенные вещества и др.); 4. Учалинский горно-обогатительный комбинат (УГОК) – полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности (газо-аэрозольные и пылевые выбросы, в составе которых присутствуют тяжелые металлы (Cu, Zn, Hg, Fe, Mn и др.), сульфаты); 5. Кумертауский бурогольный разрез (КБР) – полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород бурогольного разреза (пылевые выбросы, в составе которых присутствуют тяжелые металлы (Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Ca, Mn и др.), формальдегид, оксид углерода, диоксид азота, аммиак).

В каждом промышленном центре в непосредственной близости от источников загрязнения были подобраны древостои импактной зоны, а древостои контрольной зоны подбирались на значительном удалении с наветренной стороны по отношению к господствующим ветрам (рис. 1). Исследованный вид – береза повислая (*Betula pendula* Roth) – является одним из основных лесообразующих видов Южно-Уральского региона. Древостои березы представлены в импактной зоне и контроле во всех пяти полигонах, кроме того, в условиях отвалов горно-

рудной промышленности этот вид является пионерным лесообразователем.

Измерение параметров водного обмена проводилось непосредственно на пробных площадях методом быстрого взвешивания только что отделенных от стебля листьев. Метод основан на измерении массы воды, испаренной листом в процессе транспирации. На основании прогнозных данных метеостанций (<https://www.gismeteo.ru>) подбирались дни с приблизительно одинаковыми климатическими показателями (отсутствие осадков, минимальная облачность, одинаковая температура воздуха в дни измерения в импактной зоне и контроле одной промзоны). Повторность – по 20 листьев из нижней части кроны с южной экспозиции дерева от 5–10 опушечных деревьев. В течение июля проводились измерения интенсивности транспирации (ИТ), относительного содержания воды (ОСВ) и дефицита водного насыщения (ДВН) 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 листьев определяли методом быстрого взвешивания образцов, на высокоточных электронных весах (Diamond 0,001) с последующим экспонированием на рассеянном свете в течение 3 минут и повторным взвешиванием. Экспонирование на рассеянном свете, согласно методике, требует отсутствие прямых солнечных лучей, поэтому измерения и экспонирование проводились в подпологовых условиях. Расчет ИТ – в мг воды на 1 г сырого веса за 1 час (мг/г·час). Исследования ОСВ и ДВН листьев проводились методом быстрого взвешивания на электронных весах с последующим экспонированием на рассеянном свете в эксикаторе с погруженными в воду черешками в течение 3 часов и повторным взвешиванием. Кроме того, для вычисления ОСВ определяли вес абсолютно сухих образцов. Для этого образцы помещались в термосушильный шкаф на две недели при температуре +60°C. Расчет показателей ОСВ и ДВН – в процентах (%) [11–13].

Для каждого из трех параметров водного обмена из 20 повторностей рассчитаны выпадение данных из генеральной совокупности, среднее арифметическое значение и ошибка среднего арифметического значения. Для определения достоверности различий между загрязнением и контролем проведен *t*-тест Стьюдента отдельно для утренних, полуденных и вечерних измерений. Статистическая обработка полученных данных проводилась общепринятыми в биологических науках методами с применением пакетов прикладных программ Microsoft Excel 2010, Statistica 6.0.

Объемы валовых выбросов от стационарных источников  
в исследуемых промышленных центрах за период 2018–2023 гг.

| Промцентр                                                     |                     | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. |
|---------------------------------------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Объем валовых выбросов от стационарных источников, тыс. т     |                     |         |         |         |         |         |         |
| УПЦ                                                           |                     | 130.2   | 175.6   | 141.5   | 136.6   | 132.3   | 135.9   |
| СПЦ                                                           |                     | 45.8    | 48.1    | 51.0    | 52.2    | 51.4    | 50.0    |
| УГОК                                                          |                     | –       | 2.6     | 2.6     | 2.6     | –       | –       |
| КБР                                                           |                     | 7.3     | 6.9     | 8.4     | 11.2    | 7.1     | 3.4     |
| Наибольшие уровни загрязнения среднесуточными значениями, ПДК |                     |         |         |         |         |         |         |
| КМК                                                           | Диоксид серы        | 0.73    | 0.66    | 3.7     | 10.8    | 3.02    | –       |
|                                                               | Взвешенные вещества | 0.93    | 0.93    | 2.5     | 8.7     | 0.48    | –       |
|                                                               | Свинец              | 1.1     | 2.8     | 3.46    | 25.5    | 5.3     | –       |
|                                                               | Медь                | 0.95    | 0.36    | 0.52    | 4.77    | 0.65    | –       |
|                                                               | Железо              | 1.6     | 0.37    | 0.52    | 1.46    | 1.8     | –       |

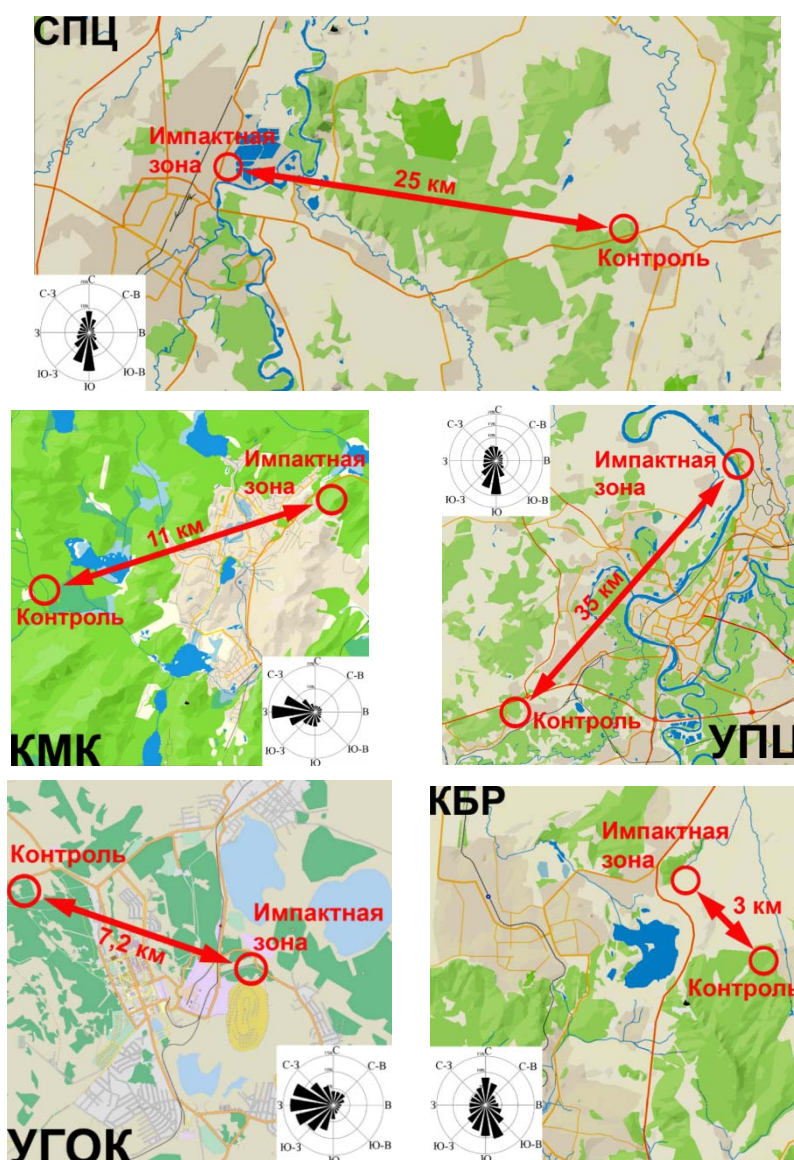


Рис. 1. Промышленные полигоны Южно-Уральского региона и размещение пробных площадей (использованы Яндекс-карты) с учетом годовой розы ветров (<https://ru.meteocast.in>)

При качественном определении адаптивных реакций использована классификация и методика, предложенная Р.В. Уразгильдиным [14]. В дендрэкологии «классическими» адаптивными реакциями водного обмена древесных растений на усиление степени промышленного загрязнения принято считать: уменьшение интенсивности транспирации (как показатель закрытия устьиц для уменьшения поступления токсиантов в листья), увеличение относительного содержания воды (как показатель уменьшения интенсивности транспирации) и уменьшение дефицита водного насыщения (как показатель увеличения относительного содержания воды в листе). Эти изменения, значительные и статистически достоверные, относили к «стрессовым» адаптивным реакциям, противоположные изменения относили к «толерантным» адаптивным реакциям, а реакции, выраженные незначительно или статистически недостоверно – к «умеренно-стрессовым» и «умеренно-толерантным». При отсутствии изменений адаптивные реакции определяли как «нейтральные».

**Результаты и обсуждение.** Оценка ИТ (рис. 2А) листьев березы при сравнении загрязненных условий с контрольными показала, что в УГОК утром, в полдень и вечером она характеризуется снижением относительно контроля, незначительно и недостоверно утром и вечером (на 16.87 и 65.11 мг/г·час соответственно) и значительно и достоверно в полдень (на 204.1 мг/г·час), однако в КБР она напротив увеличивается относительно контроля, также незначительно и недостоверно утром и вечером (на 113.79 и 58.68 мг/г·час соответственно) и значительно и достоверно в полдень (на 634.03 мг/г·час). В остальных промцентрах в течение дня наблюдаются перепады ИТ, когда в разное время суток в условиях загрязнения этот параметр либо превышает контрольные значения, либо снижается относительно контроля без видимых закономерностей, поэтому для этих промцентров оценка адаптивных реакций дается по среднесуточным показателям: выявлено подавление ИТ относительно контроля, причем в КМК и УПЦ незначительное (на 19.26 и 23.47 мг/г·час соответственно), а в СПЦ значительное (на 219.19 мг/г·час). Естественная суточная динамика ИТ (увеличение к полудню и снижение к вечеру) наблюдается только в СПЦ, КМК и КБР, а в остальных промцентрах наблюдается нарушение суточной динамики: в УПЦ происходит снижение к полудню и увеличение к вечеру, а в УГОК изменения в течение дня отсутствуют. Следует отметить, что в целом ИТ листьев березы в условиях КБР и СПЦ

значительно выше, чем в других промцентрах, и наблюдается снижение этого параметра в ряду: КБР→СПЦ→УГОК→КМК→УПЦ.

Анализ ОСВ (рис. 2Б) листьев березы показал, что в условиях КБР этот параметр характеризуется снижением относительно контроля, незначительным и недостоверным утром (на 2.11%) и значительным и достоверным в полдень и вечером (на 20.45 и 4.56% соответственно). В условиях УПЦ наблюдается обратная реакция – увеличение ОСВ относительно контроля, незначительное, но достоверное утром (на 0.7%) и значительное и достоверное в полдень и вечером (на 2.6 и 3.0% соответственно). В остальных промцентрах в течение дня наблюдаются перепады ОСВ, поэтому здесь мы рассматриваем среднесуточные показатели: ОСВ характеризуются незначительным увеличением относительно контроля в СПЦ (на 2.21%), незначительным снижением в УГОК (на 1.22%) и отсутствием изменений в КМК. Суточная динамика ОСВ различается во всех промцентрах: в УГОК и КБР наблюдается естественный суточный ход – снижение к полудню и восстановление к вечеру, однако в СПЦ, КМК и УПЦ наблюдается нарушение суточной динамики – увеличение к полудню и снижение к вечеру. Следует отметить, что в целом в УПЦ ОСВ значительно выше, чем в других промцентрах, и наблюдается снижение этого параметра в ряду: УПЦ→УГОК→КМК→СПЦ→КБР.

ДВН (рис. 2В) листьев березы в условиях КБР характеризуется увеличением относительно контроля, незначительным и недостоверным утром (на 1.09%) и значительным и достоверным в полдень и вечером (на 7.33 и 2.23% соответственно), но в УПЦ наблюдается обратная реакция – снижение ДВН относительно контроля, незначительное и достоверное утром (на 0.7%) и значительное и достоверное в полдень и вечером (на 2.4 и 2.9% соответственно). В остальных промцентрах в течение дня наблюдаются перепады ДВН, поэтому здесь мы рассматриваем среднесуточные показатели: ДВН характеризуются незначительным увеличением относительно контроля в УГОК (на 0.84%), незначительным подавлением в КМК (на 0.98%) и отсутствием изменений в СПЦ. Суточная динамика ДВН также различается во всех промцентрах: в СПЦ, УГОК и КБР наблюдается естественный суточный ход – увеличение к полудню и снижение к вечеру, однако в КМК и УПЦ наблюдается нарушение суточной динамики – снижение к полудню и увеличение к вечеру. Следует отметить, что в целом в КБР ДВН значительно выше, чем в других промцентрах, и наблюдается снижение этого параметра в ряду: КБР→СПЦ→УГОК→КМК→УПЦ.

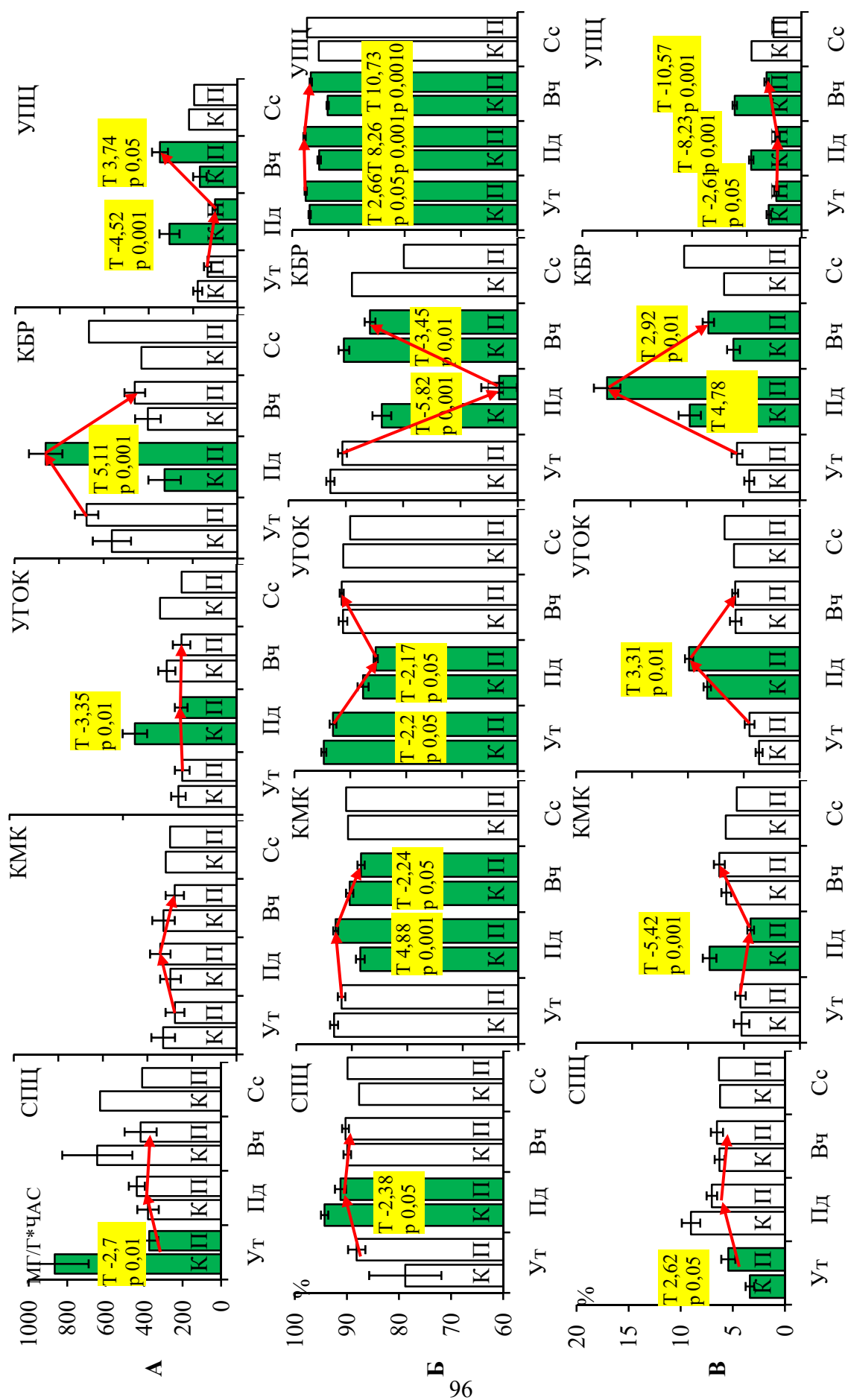


Рис. 2. Интенсивность транспирации (А), относительное содержание воды (Б) и дефицит водного насыщения (В) листьев березы повислой в условиях разных типов загрязнения (среднее арифметическое значение и ошибка среднего арифметического значения). Условные обозначения: К – контроль, П – промзона, Ут – утро, Пд – полдень, Вч – вечер, Сс – среднесуточное значение, T – различия достоверны по критерию Стьюдента, p – критерий Стьюдента, p – уровень значимости, → – суточная динамика водного обмена в промзоне

Адаптивные реакции параметров водного обмена листьев березы повислой при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона

| Промышленный центр | 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                | ↓                        | ↑       | ↓     | ↓                       | ↘                 | ↓    | ↑↑      | ↓↓    | (-)                     | ↘                 | (-)  | ↓↓      | ↑     | ↓                       | ↘                 |
| УГОК               | ↓                        | ↓↓      | ↓     | ↓                       | (-)               | ↓↓   | ↓↓      | (-)   | ↓                       | ↘                 | ↑    | ↑↑      | (-)   | ↑                       | ↘                 |
| КБР                | ↑                        | ↑↑      | ↑     | ↑                       | ↘                 | ↓    | ↓↓      | ↓↓    | ↓↓                      | ↘                 | ↑    | ↑↑      | ↑↑    | ↑↑                      | ↘                 |
| УПЦ                | ↓                        | ↓↓      | ↑↑    | ↓                       | ↘                 | ↑↑   | ↑↑      | ↑↑    | ↑↑                      | ↘                 | ↓↓   | ↓↓      | ↓↓    | ↓↓                      | ↘                 |

Условные обозначения изменения параметров водного обмена в промцентрах относительно контроля: ↑↑ – значительное и достоверное увеличение; ↑ – незначительное или недостоверное увеличение; (-) – изменения отсутствуют; ↓ – незначительное или недостоверное уменьшение; ↓↓ – значительное и достоверное уменьшение. Условные обозначения суточной динамики параметров водного обмена: (-) – изменения в течение дня отсутствуют; ↘ – снижение к полудню и восстановление к вечеру; ↗ – увеличение к полудню и снижение к вечеру.

Полученные результаты дают возможность классифицировать адаптивные реакции водного обмена листьев березы в изученных типах промышленного загрязнения (табл. 2).

Оценка изменения параметров водного обмена листьев березы в условиях загрязнения относительно контроля показывает, что в СПЦ наблюдается относительная независимость между адаптивными реакциями: при отсутствии изменений ДВН («нейтральная» адаптивная реакция) происходит уменьшение ИТ («умеренно-стрессовая» адаптивная реакция) и увеличение ОСВ («умеренно-стрессовая» адаптивная реакция). Оценка изменения параметров водного обмена в промзоне в течение дня показывает, что у ОСВ нарушена естественная суточная динамика и она характеризуется «умеренно-стрессовой» адаптивной реакцией, в то время как у ИТ и ДВН наблюдается естественная ненарушенная суточная динамика, характеризующаяся в обоих случаях «умеренно-толерантной» адаптивной реакцией, при этом между ИТ и ДВН наблюдаются согласованные суточные соизменения, а ОСВ проявляет относительную независимость. Таким образом, наблюдается поливариантность адап-

тивных реакций, но общую реакцию водного обмена в условиях полиметаллического загрязнения следует оценивать как «умеренно-стрессовую».

В условиях КМК также наблюдается относительная независимость между адаптивными реакциями: в условиях загрязнения происходит уменьшение ИТ и ДВН относительно контроля (в обоих случаях «умеренно-стрессовая» адаптивная реакция) при отсутствии изменений ОСВ («нейтральная» адаптивная реакция). В промзоне наблюдается естественная ненарушенная суточная динамика изменения ИТ, характеризующаяся «умеренно-толерантной» адаптивной реакцией, в то время как у ОСВ и ДВН нарушена естественная суточная динамика и она характеризуется «умеренно-стрессовой» адаптивной реакцией в обоих случаях, при этом между ОСВ и ДВН наблюдаются согласованные суточные соизменения, а ИТ проявляет относительную независимость. Таким образом, наблюдается поливариантность адаптивных реакций, но общую реакцию водного обмена в условиях полиметаллического загрязнения с примесью сернистого ангидрида следует оценивать как «умеренно-стрессовую».

В условиях УГОК также наблюдается относительная независимость между адаптивными реакциями: в условиях загрязнения выявлено снижение ИТ относительно контроля («умеренно-стрессовая» адаптивная реакция), снижение ОСВ («умеренно-толерантная» адаптивная реакция) и увеличение ДВН («умеренно-толерантная» адаптивная реакция). В промзоне наблюдается естественная ненарушенная суточная динамика изменения ОСВ и ДВН, характеризующаяся в обоих случаях «умеренно-толерантной» адаптивной реакцией, в то время как у ИТ изменения отсутствуют, что характеризуется «нейтральной» адаптивной реакцией, при этом между ОСВ и ДВН наблюдаются согласованные суточные соизменения, а ИТ проявляет относительную независимость. Таким образом, наблюдается поливариантность адаптивных реакций, но общую реакцию водного обмена в условиях полиметаллического загрязнения отвалов медно-колчеданной горнорудной промышленности следует оценивать как «умеренно-толерантную».

В условиях КБР наблюдается классическая «толерантная» адаптивная реакция у всех параметров водного обмена при отсутствии относительной независимости между ними: в условиях загрязнения выявлено увеличение ИТ относительно контроля («умеренно-толерантная» адаптивная реакция), значительное снижение ОСВ («толерантная» адаптивная реакция) и значительное увеличение ДВН («толерантная» адаптивная реакция). У всех трех параметров в промзоне наблюдаются согласованные суточные соизменения при отсутствии нарушения естественной суточной динамики, а значительные перепады в течение дня свидетельствуют о проявлении «толерантной» адаптивной реакции во всех случаях. Таким образом, общую реакцию водного обмена в условиях полиметаллического загрязнения отвалов бурогоугольной горнорудной промышленности следует оценивать как «толерантную».

В условиях УПЦ наблюдается классическая «стрессовая» адаптивная реакция у всех параметров водного обмена при отсутствии относительной независимости между ними: в условиях загрязнения выявлено уменьшение ИТ относительно контроля («умеренно-стрессовая» адаптивная реакция), значительное увеличение ОСВ («стрессовая» адаптивная реакция) и значительное снижение ДВН («стрессовая» адаптивная реакция). У всех трех параметров в промзоне

наблюдаются нарушения естественной суточной динамики и согласованные суточные соизменения, а незначительные перепады в течение дня свидетельствуют о проявлении «умеренно-стрессовой» адаптивной реакции во всех случаях. Таким образом, общую реакцию водного обмена в условиях нефтехимического загрязнения следует оценивать как «умеренно-стрессовую».

Обзор исследований, характеризующих водный обмен хвои и листьев древесных растений в условиях промышленного загрязнения, выделяет несколько ключевых моментов. Во-первых, количество исследований в условиях отвалов горнорудной промышленности значительно меньше по сравнению с условиями аэротехногенного загрязнения. Так, в породных отвалах «Кедровского» разреза низкозольных коксующихся каменных углей Кузбасса наибольшее загрязнение составляют тяжелые металлы Cd, Pb, Zn, Mg, Ni. В этих условиях идет интенсивное естественное зарастание и в древостоях березы повислой и сосны обыкновенной показано снижение общей воды в хвое и листьях (при этом фракция свободной воды снижается, а фракция связанной воды повышается) [15], незначительное увеличение водоудерживающей способности, снижение суточных транспирационных потерь и значительное увеличение водного дефицита [16]. Эти результаты в значительной степени согласуются с нашими данными в условиях отвалов горнорудной промышленности Южно-Уральского региона, причем в УГОК (незначительное снижение ИТ и ОСВ и незначительное увеличение ДВН) наши данные наиболее близки к результатам в условиях «Кедровского» разреза, по сравнению с КБР (значительное увеличение ИТ и ДВН и значительное снижение ОСВ). Однако, общее направление адаптации водного обмена листьев березы на отвалах Кузбасса и Южно-Уральского региона характеризуется одинаковыми тенденциями лишь с разной степенью их проявления. Из данного анализа следует, что экологические условия, формируемые отвалами горнорудной промышленности, в значительной степени определяют водный обмен листьев березы и толерантный характер адаптивных реакций.

Анализ отечественных публикаций показывает, что исследователи получают разноречивые результаты при оценке водного обмена листьев и хвои древесных видов в условиях аэротехногенного промышленного загрязнения, что в значительной степени зависит от вида загрязнения и токсикантов в составе выбросов.

Как правило, древесные виды демонстрируют противоположные адаптивные реакции к одному и тому же типу загрязнения, что характеризует их адаптивный потенциал. К примеру, в условиях загрязнения атмосферы предприятиями черной металлургии, теплоэнергетики и машиностроения г. Ижевска наблюдается значительное увеличение водоудерживающей способности у листьев березы повислой, клена ясенелистного, липы мелколистной и караганы древовидной, у ивы козьей и яблони ягодной незначительное, у рябины обыкновенной изменения в водоудерживающей способности отсутствуют, а у тополя бальзамического и розы майской наблюдается противоположная адаптивная реакция – снижение водоудерживающей способности [1–2]. На территории Сыктывкарского лесопромышленного комплекса, где преобладающими загрязнителями являются оксиды углерода, серы, азота, сероводород, сераорганические соединения, минеральная пыль, выявлено возрастание устьичной проводимости, незначительное снижение ДВН и значительное снижение ИТ хвои ели сибирской, однако влияния на влагоемкость, оводненность и водный потенциал не обнаружено. При этом у сосны обыкновенной наблюдается противоположная реакция – увеличиваются ДВН и ИТ, а влияния на оводненность и водный потенциал также не обнаружено [3]. Другая группа публикаций характеризует водный обмен древесных видов со стороны толерантных адаптивных реакций. К примеру, в условиях загрязнения воздушного бассейна г. Пскова  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , Pb и фторидами в листьях у березы повислой, липы мелколистной, сирени обыкновенной и тополя черного наблюдается увеличение ИТ и ДВН, снижение водоудерживающей способности и уменьшение ОСВ (при этом во фракционном составе происходит перераспределение – уменьшение свободной воды и увеличение связанной воды [7]. В промышленной зоне г. Красноярска выявлено значительное снижение водоудерживающей способности листьев березы повислой и яблони лесной, но слабо у черемухи Маака [6]. Таким образом, можно констатировать, что при аэротехногенном загрязнении у древесных видов проявляются в основном толерантные адаптивные реакции, а стрессовые проявляются главным образом в условиях загрязнения тяжелыми металлами. Данное обобщение так же в полной мере согласуется с результатами наших исследований, когда в условиях полиметалли-

ческого аэротехногенного загрязнения СПЦ и КМК и в условиях нефтехимического загрязнения УПЦ наблюдаются стрессовые и умеренно-стрессовые адаптивные реакции водного обмена березы.

Зарубежные публикации представляют результаты противоположные нашим исследованиям, однако следует учитывать различия в климатических условиях районов проведенных исследований. Также следует отметить, что зарубежных публикаций по водному обмену древесных растений в условиях промышленного загрязнения за последние десятилетия очень мало, а основная их масса относится к прошлому столетию. Показано, что в промышленном центре г. Сосновец (Польша) при загрязнении почвы избыточными концентрациями Cd, Pb, Zn, Fe и Mn в листьях робинии наблюдается снижение ОСВ до 76%, которое коррелирует с содержанием металлов в почве с коэффициентом до 0.51 [8]. В условиях загрязнения воздушного бассейна г. Кракова полициклическими ароматическими углеводородами наблюдается увеличение оводненности листьев у липы мелколистной и тополя канадского [4]. Автотранспортное загрязнение вдоль Национального шоссе в городе Дехрадун (Индия) привело к снижению ИТ на 42.14%, устьичной проводимости на 66.85% и устьичного сопротивления на 212.2% у листьев лагестремии, в то же время выявлено повышение эффективности водопользования на 9.4% [5]. Таким образом, в условиях полиметаллического загрязнения проявляются толерантные реакции водного обмена древесных видов, в то время как наши исследования в условиях Южно-Уральского региона указывают на стрессовые реакции березы. Однако в условиях углеводородного загрязнения наши результаты исследований согласуются с данными зарубежных исследователей.

Некоторые исследователи указывают на отсутствие тесных и прямых взаимосвязей между параметрами водного обмена в условиях загрязнения [3, 7], что в полной мере наблюдается и в наших результатах, когда у ИТ, ОСВ и ДВН наблюдаются разные адаптивные реакции к одному и тому же типу промышленного загрязнения.

Адаптивные реакции, описанные выше авторами в обсуждаемых публикациях, на наш взгляд связаны с реализацией адаптивного потенциала древесных видов в тех или иных условиях загрязнения и видоспецифичностью каж-

дого древесного вида к тому или иному типу загрязнения. В одних стрессовых условиях адаптивный потенциал конкретного древесного вида реализуется в полной мере, что дает возможность «включения» комплекса адаптивных механизмов на биохимическом, физиологическом, клеточном и других уровнях. Это обеспечивает толерантное отношение древесного вида к данному стрессовому фактору и позволяет поддерживать водный обмен либо на контрольном уровне, либо повышать его. В других условиях загрязнения адаптивный потенциал реализуется не в полной мере, что ограничивает комплекс адаптивных механизмов и адаптивные реакции водного обмена приобретают стрессовый характер.

**Заключение.** Таким образом, аэротехногенные полиметаллическое загрязнение, полиметаллическое с примесью сернистого ангидрида и нефтехимическое подавляют водный обмен листьев березы, вызывая «умеренно-стрессовые» и «стрессовые» адаптивные реакции, что свидетельствует о низком адаптивном потенциале березы к данным типам загрязнения, в то время как полиметаллическое загрязнение в условиях медно-колчеданных и бурогольных отвалов горнорудной промышленности стимулирует усиление водного обмена листьев, вызывая «умеренно-толерантные» и «толерантные» адаптивные реакции, что свидетельствует о высоком адаптивном потенциале березы к данным типам загрязнения. Кроме того, в условиях аэротехногенных полиметаллического с примесью сернистого ангидрида и нефтехимического загрязнений нарушена суточная динамика водного обмена, что сопровождается «умеренно-стрессовой» адаптивной реакцией; остальные типы загрязнения не нарушают суточную динамику водного обмена, что сопровождается «умеренно-толерантной» и «толерантной» адаптивными реакциями. Показана относительная независимость между параметрами водного обмена, когда наблюдаются различия в их адаптивных реакциях к одному и тому же типу промышленного загрязнения, это свидетельствует об экологической пластичности березы по отношению к разным типам загрязнения. Качественная оценка выявленных реакций позволяет рекомендовать использование березы для создания защитных насаждений в тех условиях загрязнения, где у нее проявляются толерантные адаптивные реакции и высо-

кий адаптивный потенциал и отказаться от ее использования в условиях, где проявляются стрессовые адаптивные реакции и низкий адаптивный потенциал.

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

### Литература

1. Бухарина И.Л., Двоглазова А.А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск: Издательство «Удмуртский университет», 2010. 184 с.
2. Бухарина И.Л., Поварничина Т.М., Ведерников К.Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2007. 216 с.
3. Сенькина С.Н. Влияние техногенного загрязнения на показатели водного обмена *Pinussylvestris* L. и *Piceaobovata* Ledeb. // Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». Киров, 2019. С. 254–257.
4. 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 // *Atmospheric Pollution Research*. 2018. V. 9. No. 3. P. 455–463.
5. Singh H., Savita, Sharma R., Sinha S., Kumar M., Kumar P., Verma A., Sharma S.K. Physiological functioning of *Lagerstroemia speciosa* L. under heavy roadside traffic: an approach to screen potential species for abatement of urban air pollution // *3 Biotech*. 2017. V. 7. No. 1. Article 61.
6. Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М., Козик Е.В. Оценка состояния городской среды методом фитоиндикации (на примере г. Красноярск) // *Лесной журнал*. 2011. № 4. С. 29–32.
7. Хмелевская И.А. Эколого-физиологические исследования древесных пород в г. Пскове // *Вестник Псковского государственного педагогического университета*. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2008. № 6. С. 37–57.
8. Skrynetska I., Ciepał R., Kandziora-Ciupa M., Barezzyk G., Nadgórska-Socha A. Ecophysiological responses to environmental pollution of selected plant spe-

cies in an industrial urban area // International Journal of Environmental Research. 2018. No. 12. P. 255–267.

9. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2023 году. Уфа: Самрау, 2024. 330 с.

10. 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. 6 с.

11. Андросова А.В. Транспирации, как ключевой показатель водного обмена // Научный альманах. 2020. № 2-2(64). С. 111–114.

12. Бейдеман И.Н. К методике изучения водного режима растений // Ботанический журнал. 1956. Т. 41. № 2. С. 212–219.

13. Иванов Л.А., Силина А.А., Цельникер Ю.Л. О методе быстрого взвешивания для определения транспирации в естественных условиях // Ботанический журнал. 1950. Т. 35. № 2. С. 171–185.

14. Уразгильдин Р.В. Лесообразующие виды Предуралья в условиях техногенеза: сравнительная эколого-биологическая характеристика, видоспецифичность, адаптивные реакции, адаптивные стратегии / дисс. докт. биол. наук. Уфа: УИБ УФИЦ РАН, 2021. 367 с.

15. Колмогорова Е.Ю., Неворова О.А. Изучение водного режима и годичного прироста побегов у древесных растений, произрастающих на породном отвале Кедровского угольного разреза // Вестник КрасГАУ. 2016. № 9. С. 87–94.

16. Цандекова О.Л., Колмогорова Е.Ю. Особенности адаптационных перестроек хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях породного отвала угольного разреза «Кедровский» // Вестник Оренбургского государственного университета. 2016. Т. 6. № 194. С. 81–85.

## References

1. Bukharina I.L., Dvoeglazova A.A. Bioekologicheskie osobennosti travyanistyykh i drevesnykh rasteniy v gorodskikh nasazhdeniyakh. Izhevsk: Izdatel'stvo «Udmurtskiy universitet», 2010, 184 p.

2. Bukharina I.L., Povarnitsina T.M., Vedernikov K.E. Ekologo-biologicheskie osobennosti drevesnykh rasteniy v urbanizirovannoy srede. Izhevsk: Izhevskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya, 2007, 216 p.

3. Sen'kina S.N. Vliyaniye tekhnogennogo zagryazneniya na pokazateli vodnogo obmena Pinussylvestris L. i Piceaobovata Ledeb. // Materialy KhVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Biodiagnostika sostoyaniya prirodnikh i prirodno-tekhnogennykh sistem». Kirov, 2019, pp. 254–257.

4. Klamerus-Iwan A., Błońska E., Lasota, J., Waligórski P., Kalandyk A. Seasonal variability of leaf wa-

ter capacity and wettability under the influence of pollution in different city zones // Atmospheric Pollution Research, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 455–463.

5. Singh H., Savita, Sharma R., Sinha S., Kumar M., Kumar P., Verma A., Sharma S.K. Physiological functioning of *Lagerstroemia speciosa* L. under heavy roadside traffic: an approach to screen potential species for abatement of urban air pollution // 3 Biotech., 2017, vol. 7, no. 1, article 61.

6. Suntsova L.N., Inshakov E.M., Kozik E.V. Otsenka sostoyaniya gorodskoy sredy metodom fitoindikatsii (na primere g. Krasnoyarska) // Lesnoy zhurnal, 2011, no. 4, pp. 29–32.

7. Khmelevskaya I.A. Ekologo-fiziologicheskie issledovaniya drevesnykh porod v g. Pskove // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki, 2008, no. 6, pp. 37–57.

8. 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 // International Journal of Environmental Research, 2018, no. 12, pp. 255–267.

9. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii prirodnikh resursov i okruzhayushchey sredy respubliky Bashkortostan v 2023 godu. Ufa: Samrau, 2024, 330 p.

10. Referat po itogam okazaniya uslug po osushchestvleniyu regul'yarnykh nablyudeniye khimicheskogo zagryazneniya atmosfernogo vozdukha na territorii goroda Karabasha, gde net gosudarstvennoy nablyudatel'noy seti. Chelyabinsk: Filial FGBU «TsLATI po UFO» po Chelyabinskoy oblasti, 2022, 6 p.

11. Androsova A.V. Transpiratsii, kak klyuchevoy pokazatel' vodnogo obmena // Nauchnyy al'manakh, 2020, no. 2-2(64), pp. 111–114.

12. Beydeman I.N. K metodike izucheniya vodnogo rezhima rasteniy // Botanicheskii Zhurnal, 1956, vol. 41, no. 2, pp. 212–219.

13. Ivanov L.A., Silina A.A., Tsel'niker Yu.L. O metode bystrogo vzveshivaniya dlya opredeleniya transpiratsii v estestvennykh usloviyakh // Botanicheskii Zhurnal, 1950, vol. 35, no. 2, pp. 171–185.

14. Urazgil'din R.V. Lesoobrazuyushchie vidy Predural'ya v usloviyakh tekhnogeneza: sravnitel'naya ekologo-biologicheskaya kharakteristika, vidospetsifichnost', adaptivnye reaktsii, adaptivnye strategii / diss. dokt. biol. nauk. Ufa: UIB UFITs RAN, 2021, 367 p.

15. Kolmogorova E.Yu., Neverova O.A. Izuchenie vodnogo rezhima i godichnogo prirosta pobegov u drevesnykh rasteniy, proizrastayushchikh na porodnom otvale Kedrovskogo ugol'nogo razreza // Vestnik KrasGAU. 2016, no. 9, pp. 87–94.

16. Tsandekova O.L., Kolmogorova E.Yu. Osobennosti adaptatsionnykh perestroek khvoi Pinus sylvestris L. v usloviyakh porodnogo otvala ugol'nogo razreza «Kedrovskiy» // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2016, vol. 6, no. 194, pp. 81–85.



**WATER EXCHANGE OF BIRCH LEAVES IN CONDITIONS OF VARIOUS TYPES  
OF INDUSTRIAL POLLUTION OF THE SOUTH URAL REGION**

© R.R. Galimov, R.V. Urazgil'din

Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences,  
69, prospect Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

**Abstract:** The study is devoted to a qualitative assessment of the adaptive reactions of water exchange of birch leaves (a widespread forest-former of the research area) under the conditions of exposure to industrial centers of the South Ural region with different types of pollution (three with mainly aerotechnogenic and two – mining dumps) and their comparative characteristics. The transpiration intensity, relative water content, and water saturation deficit were analyzed. It has been shown that polymetallic, polymetallic with an admixture of sulfur anhydride and petrochemical types of aerotechnogenic pollutions inhibit the water exchange of birch leaves, causing “moderately-stressful” and “stressful” adaptive reactions, which indicates a low adaptive potential of birch to these types of pollution, while polymetallic pollution in the conditions of copper-pyrite and brown coal dumps of the mining industry stimulates increased water exchange of leaves, causing “moderately-tolerant” and “tolerant” adaptive reactions, which indicates a high adaptive potential of birch to these types of pollution. In conditions of polymetallic with an admixture of sulfurous anhydride and petrochemical types of aerotechnogenic pollutions, the daily dynamics of water exchange is disturbed, which is accompanied by a “moderately-stressful” adaptive reaction; other types of pollution do not violate the daily dynamics of water exchange, which is accompanied by “moderately-tolerant” and “tolerant” adaptive reactions. The relative independence between the parameters of water exchange is shown, when there are differences in their adaptive reactions to the same type of industrial pollution are observed. This indicates the ecological plasticity of birch in relation to different types of pollution.

**Keywords:** industrial pollution, birch, water exchange of leaves, adaptive reactions, comparative characteristics.