

УДК 630\*116.12 + 551.578.46 + 504.5:502.3

## ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ДЕРЕВЬЕВ НА СТРУКТУРУ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Е. Л. Воробейчик, П. Г. Пищулин

Институт экологии растений и животных УрО РАН

### Введение

Влияние леса на структуру снежного покрова (СП) обсуждается еще с конца 19 века (Воейков, 1949); к настоящему времени выявлены основные закономерности как на уровне отдельных деревьев, так и целых лесных массивов (Кузьмин, 1960). Наиболее подробно исследованы различия по влагозапасу между открытыми территориями и участками леса разной структуры, густоты, конфигурации и размера, что связано с практической значимостью этого вопроса (сельское и лесное хозяйство, прогноз паводковой ситуации и т.д.). В тоже время почти все работы по изучению влияния деревьев на структуру СП выполнены на фоновых территориях, не испытывающих действия сильных антропогенных нагрузок, в частности промышленного загрязнения.

Хотя снег давно рассматривается как «стандартная» депонирующая среда («природный планшет») для улавливания поллютантов (Василенко, 1985), а его использование для оценки уровня промышленного загрязнения территории уже стало рутинной процедурой, традиционные параметры СП (высота, влагозапас, плотность) редко составляют предмет специального изучения в районах действия промышленных предприятий. Также мало внимания уделено рассмотрению микромасштабного пространственного варьирования параметров СП. В частности, для загрязненных территорий нам неизвестны работы, посвященные анализу роли отдельных деревьев в распределении снега.

Необходимо подчеркнуть, что работы в районах с высоким уровнем загрязнения выходят далеко за рамки чисто прикладной проблематики, связанной с угрозой здоровью человека и охраной природы. Территории возле точечных источников промышленных выбросов – это удобный модельный объект для исследования влияния сильных внешних воздействий на экосистемы. Фактически на них реализованы длительные натурные эксперименты, заложенные помимо воли исследовате-

лей в момент пуска предприятия. Результаты таких «непроизвольных» экспериментов перспективны для фундаментальной экологии, поскольку позволяют раскрыть механизмы устойчивости экосистем к стрессирующим факторам, проверить следствия теоретических построений, верифицировать модели реакции на внешние воздействия (Воробейчик, 2004).

На территориях, подверженных сильному промышленному загрязнению, особенно возле заводов с первичной плавкой цветных металлов, хорошо документирован факт угнетения древесных растений, которое выражается, в числе прочего, в изреживании их кроен, уменьшении продукции и снижении густоты насаждений (Innes, 1993). Логично предположить, что все это должно уменьшать влияние деревьев на СП. Другими словами, участки возле источника выбросов могут рассматриваться как аналоги территорий с разреженным древостоем. Это предположение и составляет рабочую гипотезу, которая проверяется нами. Цель данной работы – анализ роли деревьев в формировании структуры СП на территории, подверженной длительному загрязнению выбросами медеплавильного завода. Пространственное распределение снега рассмотрено в двух вариантах биотопов – хвойных и лиственных, что позволяет оценить различия между более сильными и более слабыми видами-эдикаторами.

### Материал и методы

Отбор образцов проводили в конце снежного периода (11–13 марта 2008 г.) в окрестностях Среднеуральского медеплавильного завода – одного из крупнейших медеплавильных комбинатов России (расположен на окраине г. Ревды, в 50 км к западу от Екатеринбурга). На основе ранее выполненных исследований (Воробейчик, 1994) выделили три зоны техногенной нагрузки, соответствующих разным уровням промышленного загрязнения. В пределах каждой зоны рассматривали два варианта лесных биотопов: хвойные (ельники-пих-

тарники) и лиственные (березняки). Импактная зона характеризует максимальный уровень загрязнения (1 км к западу от завода для березняка, 2 км – для ельника-пихтарника), буферная – средний (5 км и 4 км соответственно), фоновая – минимальный, который принимается за региональный фон (20 км и 30 км соответственно).

В каждом варианте биотопа подобрали серии из 5 модельных деревьев (ели и березы соответственно). Минимальное расстояние между соседними деревьями составило 10 м, крайние деревья на участке отстоят друг от друга на 100 м. Критерий подбора – взрослые деревья с хорошо развитой кроной без видимых механических повреждений, каждое дерево хотя бы с одной стороны граничит с окном в полог, но не с опушкой или поляной. Возле каждого дерева рассматривали три варианта микроучастков, расположенных на разном удалении от ствола: приствольный (20–25 см от ствола), подкроновый (середина проекции кроны) и оконный (между кронами деревьев). В пределах каждого микроучастка отбирали по 3 пробы снега на расстоянии 40–50 см друг от друга, всего – 9 проб возле дерева; общий объем работы – 270 проб.

Отбор снега проводили пластиковой трубой диаметром 10 см на всю глубину покрова. Высоту снега измеряли нанесенной на трубу линейкой с точностью 1 см. Пробы снега отбирали в двойные полиэтиленовые пакеты и хранили до проведения измерений в морозильной камере (-20 °С). Для определения влагозапаса (в мм, 1 мм эквивалентен 1 г/м<sup>2</sup>) и плотности (в г/см<sup>3</sup>) образцы взвешивали в лаборатории на электронных технических весах с

точностью 0,1 г.

## Результаты

Роль деревьев можно рассматривать в двух масштабах – на уровне биотопа (различия между ельниками-пихтарниками и березняками без учета положения точки опробования относительно ствола) и на уровне отдельного дерева (различия между тремя положениями относительно ствола в пределах каждого из вариантов леса).

На уровне биотопа, как и ожидалось, во всех зонах нагрузки средняя высота и влагозапас СП выше в лиственном лесу по сравнению с хвойным (табл. 1, 2). Разница между вариантами биотопов по этим показателям увеличивается при приближении к заводу: на фоновой территории она составляет лишь 14%, тогда как на буферной – 34%, импактной – 42%. Увеличение разницы происходит из-за того, что при приближении к заводу высота и влагозапас в хвойном лесу снижаются (на 36% и 25% соответственно), а в лиственном – почти не меняются. Плотность снега на фоновой территории также выше в березняке по сравнению с ельником-пихтарником (на 7%), а на импактной территории – примерно одинакова. В обоих вариантах биотопов плотность снега значительно выше на загрязненной территории по сравнению с фоновой (табл. 2), при этом с увеличением техногенной нагрузки плотность в большей степени повышается в хвойном лесу (на 20%) по сравнению с лиственным (на 10%).

Таблица 1

Параметры снежного покрова в разных биотопах и зонах нагрузки

Биотоп	Зона	Высота, м	Влагозапас, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Ельник-пихтарник	Фоновая	0.61 ± 0.03	110.30 ± 6.39	0.177 ± 0.004
	Буферная	0.45 ± 0.01	90.46 ± 2.49	0.201 ± 0.001
	Импактная	0.39 ± 0.02	82.63 ± 4.94	0.213 ± 0.005
Березняк	Фоновая	0.71 ± 0.01	135.37 ± 2.26	0.191 ± 0.003
	Буферная	0.68 ± 0.01	146.85 ± 2.16	0.215 ± 0.001
	Импактная	0.67 ± 0.01	142.38 ± 3.42	0.210 ± 0.004

Примечание. Приведено среднее ± стандартная ошибка, n = 5, учетная единица – круговая площадка возле отдельного дерева (усреднение по 9 пробам).

Таблица 2

Результаты двухфакторных дисперсионных анализов различий параметров снежного покрова между биотопами и зонами нагрузки

Источник изменчивости	df	Высота		Влагозапас		Плотность	
		F	p	F	p	F	p
Биотоп	1	257.75	<0.000001	214.53	<0.000001	9.99	0.004228
Зона	2	37.08	<0.000001	3.48	0.046916	41.86	<0.000001
Биотоп × Зона	2	19.04	0.000011	11.81	0.000269	4.32	0.025024

Примечание. df Error = 24, учетная единица – круговая площадка возле отдельного дерева (усреднение по 9 пробам).

На уровне отдельного дерева хвойные и лиственные биотопы существенно различаются по характеру влияния деревьев на структуру СП (рис. 1, табл. 3). В ельниках-пихтарниках во всех зонах на-

грузки при переходе от оконного микроучастка к приствольному четко видно постепенное снижение высоты и влагозапаса: различия между крайними микроучастками очень контрастны (составляют 36–

47% по высоте и 37–50% по влагозапасу). В березняках подкروновые и оконные микроучастки почти не различимы, а влияние дерева на СП сказывается только непосредственно возле ствола; при этом разница между крайними микроучастками существенно меньше по сравнению с ельниками-пихтарниками (всего 3–13% по высоте и 9–24% по влагозапасу). На плотность снега положение относительно ствола

дерева влияет только в фоновых условиях: в хвойном лесу плотность ниже возле ствола на 11%, в лиственном – на 8%. На загрязненных участках влияние положения относительно ствола на плотность незначимо (табл. 3), за исключением березняка в импактной зоне, где абсолютная величина различий между микроучастками даже выше, чем на фоновой территории (12%).

Таблица 3

Влияние положения относительно ствола дерева на параметры снежного покрова (на основании результатов двухфакторных дисперсионных анализов)

Биотоп	Зона	Высота		Влагозапас		Плотность	
		F	p	F	p	F	p
Ельник-пихтарник	Фоновая	112.15	<0.000001	48.53	<0.000001	4.24	0.022244
	Буферная	62.71	<0.000001	46.52	<0.000001	0.34	0.711478
	Импактная	63.92	<0.000001	73.04	<0.000001	1.48	0.241138
Березняк	Фоновая	1.36	0.267886	5.70	0.006933	4.29	0.021145
	Буферная	48.19	<0.000001	16.05	0.000009	0.71	0.495688
	Импактная	33.98	<0.000001	28.90	<0.000001	10.49	0.000236

Примечание. В модель включены только главные эффекты, переменные предварительно модифицированы (квадратный корень), df Factor = 2, df Error = 38, учетная единица – проба.

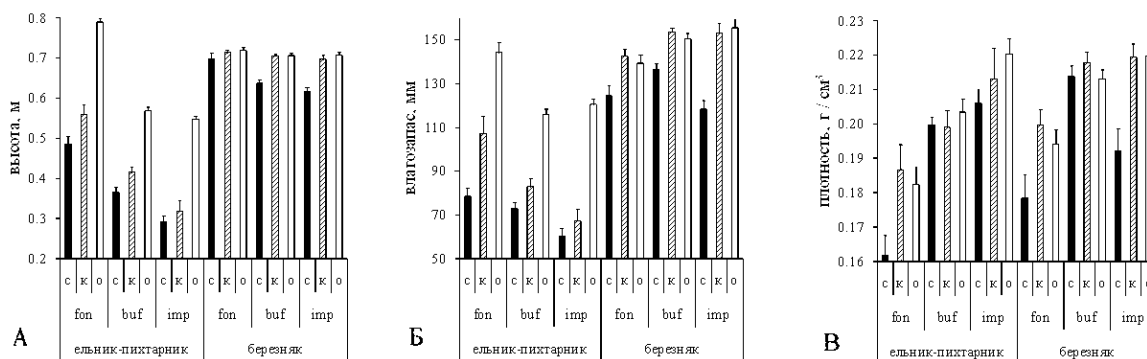


Рис. 1. Высота (А), влагозапас (Б) и плотность (В) снежного покрова в ельниках-пихтарниках и березняках в фоновой (fon), буферной (buf) и импактной (imp) зонах нагрузки. Положения относительно ствола дерева: с – приствольный участок, к – середина проекции кроны, о – окно в пологе. Вертикальная линия – стандартная ошибка, учетная единица – проба (n=15)

Вклад отдельных деревьев в микромасштабное пространственное варьирование СП количественно можно оценить путем разложения общей дисперсии на компоненты. Методическая схема, использованная в данной работе, позволяет разделить общую пространственную дисперсию на три компонента: связанную с положением точки относительно ствола дерева, связанную с положением дерева на участке и остаточную. Первый из этих компонентов может быть интерпретирован как степень влияния отдельного дерева на пространственное распределение СП, второй характеризует пространственную неоднородность (пятнистость) в масштабе рассматриваемого участка, обусловленную различиями между разными деревьями, третий – не связанную с деревьями изменчивость СП. Если справедлива наша рабочая гипотеза, то на техногенных территориях по сравнению с фоновыми, доля первого компонента дисперсии должна уменьшаться, а второго и треть-

го – увеличиваться.

В ельниках-пихтарниках влияние дерева на распределение высоты и влагозапаса СП значимо (табл. 3) и сохраняется неизменным в условиях загрязнения. Во всех зонах различия между отдельными деревьями малы (не более 10% от всего варьирования), а положение относительно ствола дерева объясняет основную часть (70–80%) общей дисперсии высоты и влагозапаса СП (рис. 2). В противоположность ожидаемому, в лиственных биотопах отсутствие влияния деревьев на высоту и влагозапас СП, наблюдаемое на фоновой территории, сменяется значимым, хотя и менее сильным по сравнению с хвойным лесом, влиянием в буферной и импактной зонах нагрузки (объясняет 45–65% общей дисперсии). При этом влияние распространяется только на приствольный участок и не затрагивает середину проекции кроны (рис. 1). В обоих вариантах биотопов влияние дерева на

плотность СП либо вовсе не выражено (буферная зона), либо выражено слабо (фоновая и импактная

зоны, только 20–40% дисперсии связано с положением относительно ствола).

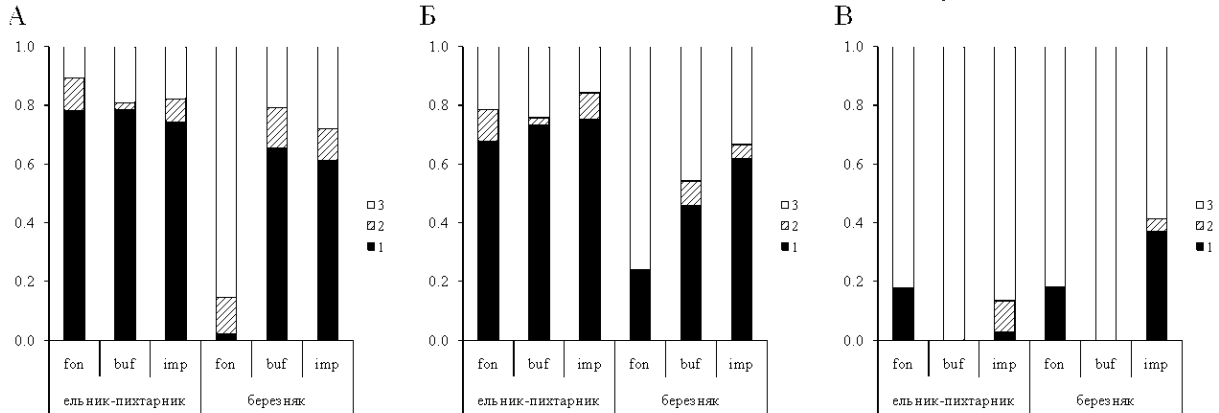


Рис. 2. Компоненты пространственной дисперсии (доли единицы) высоты (А), влагозапаса (Б) и плотности (В) снежного покрова в разных биотопах и зонах нагрузки. Зоны: fon – фоновая, buf – буферная, imp – импактная. Дисперсия, обусловленная: 1 – положением точки отробования относительно ствола дерева, 2 – положением дерева на площадке, 3 – влиянием неучтенных факторов (остаточная дисперсия)

### Обсуждение результатов

Наша исходная рабочая гипотеза, предполагающая уменьшение влияния деревьев на СП на техногенных территориях, не подтвердилась. Оказалось, что в хвойных лесах, несмотря на вызванную загрязнением трансформацию экосистем, роль отдельных деревьев в формировании микромасштабной структуры СП не снижается. В импактной и буферной зонах кроны хвойных деревьев задерживают снег столь же эффективно, как и в фоновой зоне, формируя типичную концентрическую структуру, особенно выраженную для низко расположенных крон ели. Более того, в лиственных биотопах мы зарегистрировали даже увеличение вклада отдельных деревьев в микромасштабное пространственное варьирование параметров СП. Последнее вероятнее всего связано с «турбулентными воронками» возле ствола дерева, характерными для разреженных древостоев, что можно считать косвенным следствием техногенной трансформации лесных биотопов.

Обнаруженные различия средних значений высоты и влагозапаса между ельниками-пихтарниками и березняками соответствуют многочисленным наблюдениям для фоновых районов (Кузьмин, 1960). Если исходить из предположения увеличения схожести лесных участков техногенной территории с открытыми местообитаниями, можно было бы ожидать нивелирования межбиотопических различий. Однако мы, напротив, наблюдаем их усиление, обусловленное снижением высоты снега и влагозапаса в ельнике-пихтарнике. Учитывая, что сбор снега на всей территории проводился практически одновременно, такие различия между биотопами не могут быть связаны с методической погрешностью, а объясняются либо разницей в динамике теплового режима сравниваемых участков (более раннее весеннее таяние снега в хвойном лесу импактной и бу-

ферной зон), либо более интенсивным в условиях загрязнения таянием снега, задержанного кронами хвойных (во время оттепелей).

Хорошо известно, что заводы с первичной плавкой металлов – это мощные источники пылевых выбросов. Увеличение запыленности снега снижает его альбедо и, как следствие, увеличивает интенсивность таяния во время оттепелей. Это может играть роль не только для собственно СП, но и, что даже более важно, для снега, удерживаемого кронами хвойных деревьев после снегопадов. В пользу этого говорит то обстоятельство, что в березняках на загрязненных участках не наблюдается уменьшения высоты и влагозапаса СП, хотя из-за отсутствия листвы логично предположить как более сильное по сравнению с ельниками-пихтарниками запыление СП, так и лучшее проникновение солнечных лучей. Кроме того, повышение интенсивности снеготаяния, приводящее к снижению высоты СП в хвойном лесу (и соответствующему увеличению плотности), может быть связано с сочетанным действием высокой запыленности снега (не только техногенной минеральной пылью, но и органическими включениями) и уменьшения суммарного экранирующего действия крон от солнечных лучей из-за изреживания древостоя.

В масштабе биотопа мы обнаружили хорошо выраженное, хотя и относительно небольшое по абсолютной величине, увеличение плотности снега вблизи источника выбросов. Возможными причинами этого могут быть как усиление ветра, который оказывает уплотняющее действие на снег, так и более интенсивное таяние из-за увеличения запыленности СП. Ранее увеличение плотности снега было описано для района действия никелеплавильного завода на Кольском полуострове (Kozlov, 2001), что по данным прямых инструментальных измерений (Kozlov, 2001) автор, в первую очередь, связал со специфическим ветровым режимом тех-

ногенных пустошей. В нашем случае снижение плотности снега в импактной зоне зарегистрировано в сохранившихся лесных массивах, где уплотняющее действие ветра из-за большей открытости участков должно быть менее выражено по сравнению с техногенными пустошами, занимающими обширные пространства в десятки квадратных километров. Следовательно, более вероятной причиной увеличения плотности мы считаем увеличение запыленности снега.

Слабые различия плотности снега между вариантами положения относительно ствола могут быть связаны с большей ошибкой измерения данного показателя по сравнению с исходными величинами (высота и масса образца), что сочетается с относительно узким общим диапазоном варьирования плотности. Тем не менее, выявленные различия также укладываются в описанную схему влияния запыленности на СП: минимальные значения плотности в ельниках-пихтарниках зарегистрированы в приствольных участках, лучше экранированных как от солнечных лучей, так и от пыли.

Таким образом, на техногенных территориях влияние леса на СП на уровне отдельного дерева не уменьшается, а на уровне биотопа – даже увеличивается. Учитывая значение СП в жизни леса, гидрологии и биогеохимии ландшафтов, полученные результаты важны для лучшего понимания закономерностей организации лесных экосистем в условиях действия техногенных нагрузок (смещение фенологических ритмов, изменение функционирования почвенной биоты из-за различий в тем-

пературном режиме почвы, уточнение моделей миграции веществ).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (08-05-00980) и Программы развития ведущих научных школ (НШ-1022.2008.4).

### Библиографический список

- Василенко, В.Н.* Мониторинг загрязнения снежного покрова / В.Н. Василенко, Н.М. Назаров, Ш.О. Фридман. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 180 с.
- Воейков, А.И.* Снежный покров, его влияние на почву, климат и погоду и способы исследования / А.И. Воейков. Избр. соч. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 2. С. 15–157.
- Воробейчик, Е.Л.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем / Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов. Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
- Воробейчик, Е.Л.* Экология импактных регионов: перспективы фундаментальных исследований // Материалы VI семинара «Фундаментальные и прикладные проблемы популяционной биологии». Нижний Тагил, 2004. С. 36–45.
- Кузьмин, П.П.* Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов / П.П. Кузьмин. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 171 с.
- Innes, J.L.* Forest Health: Its Assessment and Status / J.L. Innes. Wallingford: CAB International, 1993. 677 p.
- Kozlov, M.V.* Snowpack changes around a nickel-copper smelter at Monchegorsk, northwestern Russia // Can. J. For. Res. 2001. Vol. 31. P. 1684–1690.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пермский государственный университет»

Пермское отделение Русского ботанического общества

# **Ботанические исследования на Урале**

Материалы региональной с международным участием  
научной конференции, посвященной памяти П. Л. Горчаковского

Ответственный редактор  
С. А. Овеснов

Пермь  
2009

УДК 581.9  
ББК 28.58. (2р36)  
Б86

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

О. Г. Баранова, Е. И. Демьянова, О. З. Еремченко, Е. Г. Ефимик (секретарь),  
М. М. Ишмуратова, С. А. Овеснов (гл. редактор), Л. А. Чудинова

Б86

**Ботанические** исследования на Урале: материалы регион. с  
междунар. участием науч. конф., посвящ. памяти  
П. Л. Горчаковского / отв. ред. С.А. Овеснов; Перм. гос. ун-т. –  
Пермь, 2009. – 397 с. : ил.

ISBN 978–5–7944–1347–2

Настоящий сборник научных трудов включает материалы, пред-  
ставленные участниками конференции. Включенные в него статьи знакомят с  
характером работ ботаников в Уральском регионе.

Сборник адресован научным сотрудникам, преподавателям, аспиран-  
там и студентам профильных специальностей.

**УДК 581.9**  
**ББК 28.58. (2р36)**

Печатается по решению оргкомитета конференции

ISBN 978–5–7944–1347–2

© Пермский государственный университет, 2009