

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХВОИ ЕЛИ СИБИРСКОЙ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМБИНАТА «СЕВЕРОНИКЕЛЬ»

Александрова Евгения Юрьевна

К.п.н., доцент, ФГБОУ ВО «Мурманский арктический
государственный университет» (г. Мурманск)
dzhessika_www@mail.ru

Воронов Алексей Александрович

Главный специалист-эксперт, Балтийско-
Арктическое межрегиональное управление Федеральной
службы по надзору в сфере природопользования

MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF SIBERIAN SPRUCE (PICEA OBOVATA) NEEDLES IN THE DISTRICTS OF INDUSTRIAL COMPLEX «SEVERONIKEL» IMPACT

**E. Alexandrova
A. Voronov**

Summary. The estimation of a condition of Siberian spruce located around the industrial enterprise "Severonikel" is given on the basis of phytoindication methods in the article. Morphometric indices of Siberian spruce fir needles are studied. The anthropogenic degradation initial stage of spruce plantations in the zone of Monchegorsk industry influence is revealed. It is shown that the chronic pollution of forest communities has a detrimental effect on the growth, development and condition of trees. The data obtained as part of study allow us to identify the negative trends associated with the systematic atmospheric air pollution on the territory of Murmansk region. Captured data suggests the ways of the air quality monitoring system improvements at the regional level.

Keywords: technogenic pollution, phytoindication, Siberian spruce, damage degree of fir needles drying, morphometric characteristics.

Аннотация. В статье приведены результаты фитоиндикационной оценки состояния популяции ели сибирской, произрастающей вблизи промышленного комбината «Североникель». Изучены морфометрические показатели хвои ели сибирской, выявлена начальная стадия антропогенной дигрессии еловых насаждений в зоне влияния промышленности г. Мончегорска. Показано, что хроническое загрязнение лесных сообществ оказывает негативное влияние на рост, развитие и состояние деревьев. Данные, полученные в ходе исследования, позволяют выявить негативные тенденции, связанные с систематическим загрязнением атмосферного воздуха на территории Мурманской области, и предложить пути совершенствования системы контроля за качеством атмосферного воздуха на региональном уровне.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, фитоиндикация, ель сибирская, степень повреждения и усыхания хвои, морфометрические характеристики.

Активное развитие горнодобывающей и металлургической промышленности, сопровождающееся высокой степенью аэротехногенного загрязнения, обуславливает увеличение сбоев в гомеостатических механизмах компонентов биоценозов. При этом северные экосистемы подвергаются разрушительному воздействию в большей степени. Это связано с природно-климатическими условиями, которые обуславливают специфику северных экосистем: снижение устойчивости к загрязнению среды, уязвимость, замедление процессов самоочищения. В связи с этим актуальность приобретает систематическая оценка качественного состояния северных фитоценозов в условиях аэротехногенного загрязнения.

На Кольском полуострове находится предел в пространстве хвойных растений, что обуславливает их особую чувствительность к дополнительным стрес-

совым факторам, и делает удобными объектами для экологических исследований. Визуально наблюдаемые изменения хвои (отклонения в развитии кроны, хлорозы и некрозы, снижение линейных и площадных параметров, общая сухая масса и др.) могут рассматриваться как информативные показатели аэротехногенного загрязнения.

Целью исследования являлось изучение морфометрических характеристик хвои ели сибирской в районе воздействия комбината «Североникель» (промышленная площадка АО «Кольская горно-металлургическая компания»).

Исследование проводилось в июле 2019 г.: определялась степень повреждения хвои ели сибирской в ходе дигрессионной сукцессии, проводился анализ морфометрических характеристик хвои как параметров ростовых

процессов, осуществлялась оценка жизненного состояния и отклонений в архитектонике кроны ели сибирской в районе воздействия комбината «Североникель».

Образцы ели сибирской собирались на территории Мончегорского района Мурманской области, в тундровой зоне. Климат в данном районе умеренно суровый (средняя температура января составляет — 13 °С, сильные морозы бывают редко, господствуют северные, северо-восточные и северо-западные ветра, холодное короткое лето (средняя температур июня +13 °С), суточный ход температур плавный, климат сильно влажный (годовое количество осадков — 410 мм, треть из которых — в виде снега). Снежный покров лежит более 200 дней в году. В лесной зоне преобладают маломощные подзолистые почвы. На юге и западе полуострова преобладают сосновые и елово-березовые леса [1].

Древесный ярус представлен елью, сосной и березой. Древостой, в основном, одноярусный, подлесок не выражен. В травянисто-кустарничковом ярусе доминируют водяника обоеполая (*Empetrum hermaphroditum*), черника миртолистная (*Vaccinium myrtillus*), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea*). Также встречается голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum*), вереск обыкновенный (*Calluna vulgaris*) и багульник болотный (*Ledum palustre*). Разнотравья и злаковых не много. Мохово-лишайниковый ярус сформирован зелеными мхами: плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi*), дикранум многоножковый (*Dicranum polysetum*), лишайниками: многочисленные представители из р. *Cladonia* — кладония дюймовая (*Cladonia uncialis*), кладония курчавая (*Cladonia crispata*), кладония рогатая (*Cladonia cornuta*), кладония стройная (*Cladonia gracilis*).

Исследования Т.В. Арсеньевой и Т.А. Сухаревой подтверждают, что основным источником загрязнения в исследуемом районе является крупнейший на Севере Европы медно-никелевый комбинат «Североникель». В составе выбросов в атмосферу обнаруживается медь, никель, кобальт, двуокись серы и пыль [1, 7].

Исследования, проводимые сотрудниками ПАБСИ КНЦ РАН, показали, что за последние несколько десятков лет наблюдалось снижение выбросов загрязняющих веществ со стороны комбината «Североникель». Однако концентрации металлов в снежном покрове, почве и осадках, по-прежнему, превышают допустимые нормы.

Г.М. Кашулиной и Н.В. Салтан совместно с Кольским геологическим информационно-лабораторным центром показано, что в исследуемом районе наблюдается высокая ассимиляция растениями никеля, меди, марган-

ца и цинка [3]. Более поздними работами данных авторов подтверждена многолетняя негативная тенденция накопления металлов в 2002–2012 гг. [6]. Отмечается, что отношение медианы концентраций металлов в хвое ели сибирской к фону в исследуемом районе варьирует от 0,5 (для марганца и цинка) до 32 (по никелю).

Объектом исследования являлась одна из наиболее распространенных пород региона — ель сибирская (*Picea obovata Ledeb.*), которая участвует в формировании древостоя северо-таежных ельников кустарничково-зеленомошных на северном пределе распространения хвойных растений.

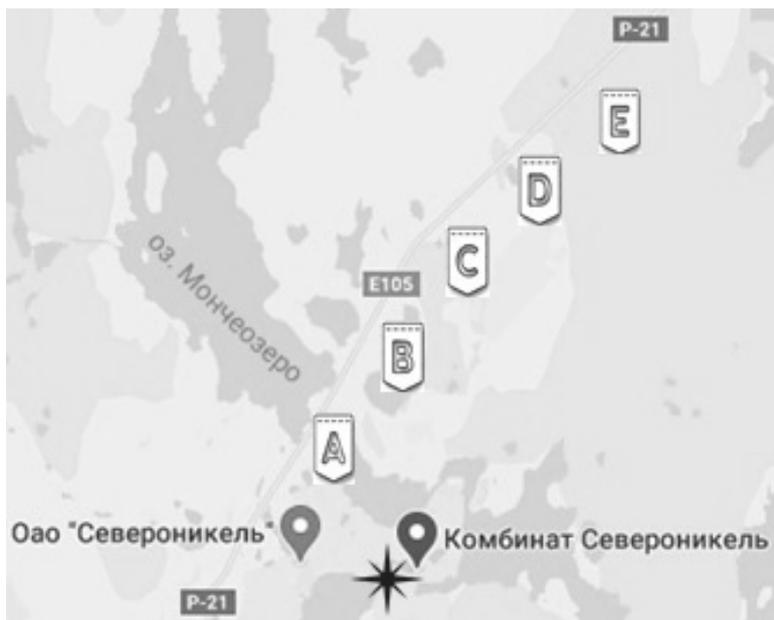
В лесных сообществах Кольского Севера древесный ярус сформирован елью сибирской и березой пушистой, с участием ивы козьей и сосны обыкновенной. Доля ели сибирской в древесном ярусе не более 15% по запасу, еловых лесов — 60–90%. В составе подроста ель занимает подчиненное положение (не более 30% по плотности) [4].

Ель сибирская — вечнозеленое однодомное дерево высотой до 30 м с узкой конусовидной кроной и прямым стволом, имеет мелкие яйцевидно-цилиндрические шишки с выпуклыми широкими, закругленными по краю, цельнокрайними чешуями. Побеги покрыты короткими рыжими волосками, хвоя темно-зеленая, четырехгранная. Размер хвои варьирует в пределах 7–20 мм. Корневая система поверхностная, стержневой корень слабо развит, что обуславливает значительную ветровальность елей. В условиях Кольского полуострова из-за сильных ветров приобретает стланиковую форму, способна выдерживать вечную мерзлоту. Продолжительность жизни ели сибирской составляет 250–300 лет [1].

Северо-таежным еловым лесам Кольского Севера свойственна высокая степень разреженности и низкая плотность посадки. В связи с этим кроны елей опушены намного ниже, чем в южно-таежных и хвойно-широколиственных лесах [4].

Еловые леса Мурманской области с преобладанием ели сибирской занимают около 38% всего лесопокрытия. Чистые еловые насаждения, как правило, не встречаются. Семенной зрелости ель в северных насаждениях достигает в возрасте 50–70 лет, на вырубках и опушках — в 30–40 лет. Ель сибирская предпочитает влажные почвы, не выносит иссушения, отличается слабой дымо- и газоустойчивостью.

Ухудшение условий произрастания усиливает защитную реакцию ели сибирской, в то же время она обладает более узкой адаптивной амплитудой, чем другие хвойные. В связи с этим ель сибирская более чувствительна



* — источник загрязнения (комбинат «Североникель»);

А — пробные площади (А-Е).

Рис. 1. Размещение пробных площадей

к промышленному загрязнению среды, чем, например, сосна обыкновенная [1].

Материалы и методы

Для организации исследования было заложено пять пробных площадей (А-Е) в Мончегорском районе по оси факела выбросов комбината «Североникель» с учетом преобладающего северо-восточного направления ветра (рис. 1).

Пробные площади были заложены на удалении 2,5 км друг от друга по принципу зонирования территории по комплексному показателю загрязнения атмосферного воздуха в импактной (0–5 км) и буферной (7,5–12,5 км) зонах.

Для каждой пробной площади устанавливалась стадия дигрессионной сукцессии: стадия техногенной пустоши — 0–2 км, стадия техногенного редколесья (А-В) — 2,5–5 км, стадия затухающей дефолиации (С-Д) — 7,5–10 км, стадия интенсивной дефолиации (Е) — 12,5 км. Также были выбраны зоны слабого загрязнения, приближенные к фоновой: (F) — вблизи оз. Чайка (в лесополосе, 8 км от Восточно-Объездной дороги) и (G) — оз. Лапоть (Кольский Район, 16-й км Серебрянского шоссе).

На каждой пробной площади анализировали 20 деревьев. Отбор хвои производился из верхней трети кроны в вегетационный период. Хвоя сортировалась

по возрастным группам. Морфометрическое обследование включало замеры длины и ширины хвои, оценку степени повреждений ассимилирующих органов (хлорозы, некрозы). Длина хвои различных возрастных классов измерялась с точностью до 1 мм. Также определялась максимальная продолжительность жизни хвои и рассчитывалась общая сферическая поверхность хвои по А. И. Уткину [9]. Класс повреждения хвои устанавливались по Т. А. Сухаревой: неповрежденная (1 класс, 0%), слабо-поврежденная (2 класс, до 25%), умеренно-поврежденная (3 класс, до 75%), сильно-поврежденная (4 класс, более 75%) [7].

Отклонения в архитектонике кроны ели сибирской определяли визуально. Оценка категории жизненного состояния хвойных растений проводилась по Е. Г. Мозолевской: без признаков ослабления, ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие, сухостой текущего года, сухостой прошлый лет. Исследуемым деревьям присваивался класс устойчивости: 1 класс — биологически устойчивые, 2 класс — нарушенная устойчивость, 3 класс — утратившие устойчивость [5].

Полученные результаты и их обсуждение

Хвоя ели сибирской в фоновых условиях имеет продолжительность жизни 8–13 лет. Количество возрастных классов хвои зависит от ветвления побега, обычно не превышает 5.

Таблица 1. Морфометрические характеристики хвои ели сибирской в зоне воздействия комбината (для побегов 1–2 года)

Параметр / Пробная площадь		A	B	C	D	E
Длина хвои (фон: 10–12 мм)	Диапазон длины, мм	8–10	9–11	10–11	10–12	12–14
	Медиана/фон	0,82	0,91	0,95	1,0	1,18
Общая поверхность хвои, мм ²	Медиана общей поверхности	20,63	20,08	29,78	34,25	44,84
	Медиана/фон	0,57	0,55	0,82	0,94	1,24
Повреждение хвои (фон: 15%)	Медиана повреждения, %	78,2	68,2	59,1	46,6	24,0
	Медиана/фон	5,21	4,54	3,94	3,11	1,6

Таблица 2. Жизнеспособность ели сибирской (%)

Пробная площадь	без признаков ослабления	ослабленные	сильно ослабленные	усыхающие	сухой текущий год	сухой прошлый лет
A	0%	0%	79,20%	20,80%	0%	0%
B	0%	6%	90,40%	3,20%	0,40%	0%
C	22,80%	58,40%	16,80%	0,80%	0,40%	0%
D	26,40%	64%	8%	0,80%	0,40%	0,40%
E	30%	63,20%	6%	0,40%	0,40%	0%
F _{фон}	88,80%	10%	1,20%	0%	0%	0%
G _{фон}	85,20%	12,80%	2%	0%	0%	0%

Максимальных размеров хвоя достигает на побегах I–II порядков, минимальная — V порядка. В фоновых условиях средний возраст хвои ели сибирской составляет: 10,2±2,2 лет (I порядок), 10,5±1,7 лет (II порядок), 8,6±1,8 лет (III порядок), 5,4±2,1 лет (IV порядок), 1,8±0,6 лет (V порядок). Большая часть хвои не обнаруживает признаков повреждения, доля хлорозов и некрозов не превышает 15%. Наиболее поврежденной оказывается хвоя последних лет жизни (старовозрастная). На молодой хвое не более 2% повреждений.

Средняя длина хвои в фоновых условиях составляет 11,4±0,05 мм (минимальная длина — не более 3 мм, максимальная — 20 мм). Длина и общая поверхность хвои возрастает по мере старения побега.

В ходе деградиционной сукцессии зафиксирована нелинейная изменчивость морфометрических характеристик хвои ели сибирской. На начальной стадии дигрессии (интенсификация дефолиации) медиана общей поверхности (44,84 мм²) и длины хвои (12–14 мм) больше, чем в фоновой зоне (36,28 мм² и 10–12 мм). Это обусловлено увеличением подвижности минеральных эле-

ментов в почвенном покрове. На последующих стадиях (стадия затухающей дефолиации и стадия техногенного редколесья) отмечается ухудшение морфометрических характеристик: соотношение медианы к фоновому значению постепенно уменьшается (таблица 1).

Как показало исследование, вблизи источника загрязнения (A) степень повреждения хвои достигает 78,2%, хвоя отнесена к 4-му класса повреждения. Здесь преобладает однолетняя хвоя с длиной 8–10 мм, в то время как в фоновой зоне ее размер составляет 10–12 мм. В зоне интенсификации дефолиации (E) — 12–14 мм (2 класс повреждения), в зоне затухающей дефолиации и редколесья (B–D) — 9–12 мм (3 класс повреждения).

В условиях сильного аэротехногенного загрязнения отмечено снижение длины и общей поверхности хвои по сравнению с фоном. Для ширины такая зависимость проявляется не во всех случаях: в ряде проб ширина хвои приближается к фоновым значениям.

Сравнительный анализ площадей A–B показывает, что при значительном различии в размерах хвои, пло-

щади их поверхностей могут быть близкими по значениям. Это подтверждает результаты более ранних морфометрических исследований [2]. Исходя из этого, интегральные показатели для оценки хвои более удобны в экологических исследованиях. Также отмечено, что наиболее информативны данные по хвое первого года жизни, так как с возрастом в хвое формируется адаптация биосинтетических процессов к условиям среды.

Как показало исследование, в ходе интенсивной дефолиации продолжительность жизни хвои не отличается от фоновых значений. Для стадии затухающей дефолиации и техногенного редколесья этот показатель снижается (уменьшается число возрастных классов до 2-х, снижается порядок ветвления побегов до IV).

На расстоянии 0–2,0 км от источника загрязнения наблюдается стадия техногенной пустоши: хвойные растения отсутствуют. На пробных площадях А-В (2,5–5 км, стадия техногенного редколесья) большая часть растений отнесена к категории «утратившие устойчивость», на пробных площадях С-Е (7,5–12,5 км, стадия затухающей и интенсивной дефолиации) отмечается «нарушенная устойчивость». Фоновые объекты (F-G) отнесены к классу «биологически устойчивых».

Анализ состояния хвойных растений на исследуемой территории свидетельствует о том, что преобладающие средневозрастные деревья имеют значительные различия в жизнеспособности при удалении от источника загрязнения (таблица 2). Полученные данные подтверждают результаты ранее проводимых нами исследований (2018 г.) с использованием ели сибирской [10].

Исходя из классификации жизненных форм, ель сибирская относится к одноствольным деревьям. В то же время обнаруживаются и немногоствольные формы (2–3 ствола, раздвоение верхней части кроны от центра или на высоте до 0,5–1,3 м): (В) — 13%, (С) — 19%, (D) — 14%. Это обусловлено задержкой роста главной оси и раннего развития побегов из боковых (спящих) почек. При исследовании архитектоники ели сибирской на расстоянии до 7,5 км от источника загрязнения были обнаружены следующие отклонения: 1) ажурность (сквозистость) кроны — крона средней плотности с 25–50% просветов; 2) отклонения в пропорциях (нарушение пирамидальной формы кроны, непропорциональный рост побегов); 3) неравномерность отмирания нижних побегов до 0,5 м высоты (по одной из сторон главной оси), отмирание побегов по главной оси за исключением верхушки, отмирание центральной части кроны (по типу «песочные часы»); 4) нарушение ортотропного роста главной оси (искривление верхушки кроны, изменение угла роста); 5) слабая опушенность подроста, малорослость (до 2 м)

деревьев (на расстоянии до 7,5 км от комбината «Североникель»).

Заключение

Аэротехногенное загрязнение в Мончегорском районе оказывает существенное влияние на все компоненты лесной растительности: происходит отмирание древостоя, разрушение нижних ярусов и внеярусной растительности.

При этом региональное загрязнение коррелирует с ответной реакцией биоценозов на техногенное загрязнение. Так, вблизи источника загрязнения (0–2,0 км) хвойные растения не произрастают вообще, наблюдается высокая степень деградации лесного биоценоза (стадия техногенной пустоши).

В условиях серьезного аэротехногенного загрязнения со стороны комбината «Североникель» морфометрические характеристики хвои ели значительно отклоняются от естественных пределов: уменьшаются размеры хвои, сокращается продолжительность жизни хвои, увеличивается густота побегов. Сильное атмосферное загрязнение усиливает дехромацию и дефолиацию кроны ели, у подростка они выражены слабее. Хлорозы приурочены, в основном, к верхушечной части хвоинок, также обнаруживаются микроскопические пятна некрозов из-за проникновения загрязняющих веществ через устьица и разрушенную кутикулу. Хлорозы отсутствуют у одно- и двухлетних побегов.

В ходе дигрессионной сукцессии зафиксирована нелинейная изменчивость морфометрических характеристик хвои ели сибирской. На территориях с интенсивной дефолиацией длина и общая сферическая поверхность хвои больше, чем в фоновых условиях (хвоя крупнее). На последующих стадиях дигрессии наблюдается уменьшение длины и общей сферической поверхности. Наименьшую общую сферическую поверхность имеет хвоя текущего года и однолетняя хвоя на стадии техногенного редколесья.

На стадии интенсивной дефолиации обнаруживается увеличение длины и общей сферической поверхности хвои, которое обусловлено повышенным содержанием в ассимилирующих органах элементов питания и снижением количества фенолов. Как отмечает Т.А. Сухарева [7], при снижении концентрации элементов питания (магния и кальция) до уровня дефицита наблюдается обратная тенденция, когда размеры хвои уменьшаются, усиливается синтез вторичных метаболитов — фенолов (на стадии техногенного редколесья и затухающей дефолиации).

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсеньева Т.В., Чавчавадзе Е. С. Эколого-анатомические аспекты изменчивости древесины сосновых из промышленных районов Европейского Севера. СПб: Наука, 2001, 109 с.
2. Есякова О.А., Степень Р. А. Индикация загрязнения атмосферы Красноярска по морфометрическим и химическим показателям хвои ели сибирской // Химия растительного сырья, 2008, № 1, с. 143–148.
3. Кашулина Г.М., Салтан Н. В. Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината «Североникель», Апатиты: КНЦ РАН, 2008, 239 с.
4. Катютин П.Н., Ставрова Н. И. Взаимосвязь возраста и величины диаметра особей в ценопопуляциях ели сибирской на разных стадиях послепожарных сукцессий // Известия Самарского научного центра РАН, 2012, т. 14, № 1(5), с. 1257–1260.
5. Мозолевская, Е. Г. Первичные и интегральные показатели состояния насаждений, используемые при мониторинге // Лесной вестник, 2000, № 6, с. 65–67.
6. Салтан Н. В. Динамика содержания тяжелых металлов в ассимилирующих органах растений локальной зоны воздействия комбината «Североникель» // Вестник МГТУ, 2013, т. 16, № 4, с. 793–802.
7. Сухарева Т. А. Химический состав и морфометрические характеристики хвои ели сибирской в условиях воздушного промышленного загрязнения. Автореферат дис. на соиск. учен. степ. к.б.н. Петрозаводск, 2004, 32 с.
8. Сухарева Т.А., Лукина Н. В. Химический состав и морфометрические характеристики хвои ели сибирской на Кольском полуострове в процессе деградиционной сукцессии лесов // Лесоведение, 2004, № 2, с. 36–43.
9. Уткин А. И. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008, 292 с.
10. Aleksandrova E. Yu., Trotsenko A. A., Minchenok E. E., Kovaleva T. O., Katansky A. A. Bioindication potential of conifers for environmental assessment // AGRITECH-II—2019: IOP Conference Series: Earth and Environment Science. 2020. Vol. 421(1). P. 011001 (1–10). DOI: 10.1088/1755–1315/421/2/ 022036.

© Александрова Евгения Юрьевна (dzhessika_www@mail.ru), Воронов Алексей Александрович.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Мурманский арктический государственный университет