
СТРАНИЧКА МОЛОДОГО УЧЕНОГО

УДК 550.42:634.948

Влияние промышленного загрязнения на накопление серы в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в юго-западном ЗабайкальеЛ. В. АФАНАСЬЕВА¹, В. К. КАШИН¹, Т. А. МИХАЙЛОВА²¹Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ 670047 (Россия)

E-mail: afanl@mail.ru

²Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения РАН, а/я 1243, Иркутск 664033 (Россия)

E-mail: mikh@sifibr.irk.ru

(Поступила 14.07.04)

Аннотация

Исследовано влияние аэропромышленных выбросов основных промышленных узлов Бурятии на сосновые леса водосборной территории оз. Байкал. Загрязнение древостоев оценено по накоплению в хвое сосны обыкновенной приоритетного элемента-загрязнителя – серы. В зависимости от удаленности от источников промвыбросов выделены зоны различной интенсивности загрязнения лесов. В зоне сильного загрязнения обнаружены наиболее высокие корреляционные связи между содержанием серы в хвое и морфометрическими параметрами деревьев.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия мощным фактором отрицательного воздействия на окружающую среду являются атмосферные выбросы промышленных предприятий. Этот фактор служит причиной нарушения устойчивого функционирования экосистем, в том числе лесных, вызывая частичную или полную их деградацию. Негативное влияние аэропромвыбросов на важнейшие биологические и экологические процессы в лесных экосистемах приводит к снижению биосинтеза органического вещества, изменению баланса CO₂ и O₂ в биосфере, а вместе с этим – к усилению “парникового эффекта”. Поэтому очевидна необходимость количественного анализа и оценки риска избыточного поступления загрязня-

ющих веществ в экосистемы с учетом реакции различных компонентов экосистем на эти воздействия.

К основным загрязнителям промышленного происхождения относятся оксиды серы и азота. Эти соединения и обусловленные ими кислые осадки влияют на лесные фитоценозы, как непосредственно, так и косвенно, изменяя важные для растений характеристики почвы. Одним из наиболее информативных индикаторных показателей воздействия на растения поллютантов служит накопление их в растительных тканях, в первую очередь в ассимиляционных органах. Многие исследователи используют содержание серы в хвое деревьев в качестве основного диагностического признака при оценке аэропромышленного загрязнения лесов [1–3]. Это связано с тем,

что уровень серы в ассимиляционных органах, как правило, адекватно отражает степень эмиссионной нагрузки, как на растения, так и лесную экосистему в целом.

На обследованной территории Забайкалья леса испытывают влияние промышленных эмиссий, в составе которых преобладают оксиды серы и азота, а также тяжелые металлы. Преимущественное распространение имеют выбросы диоксида серы, составляющие свыше 30 тыс. т в год [4]. Однако исследования по воздействию аэропромвыбросов на леса западного Забайкалья, которые занимают свыше 80 % территории Бурятии и служат основой устойчивого функционирования ее природных комплексов, ранее не проводились. Эта территория представляет собой бассейн р. Селенги – основного притока оз. Байкал, формирующего 50 % водного стока озера. Здесь сосредоточен основной промышленный и сельскохозяйственный потенциал Бурятии.

Цель настоящей работы – изучение накопления серы в хвое сосны, произрастающей на разном расстоянии от промышленных центров, выявление пространственного распространения загрязнения лесов юго-западного Забайкалья, а также оценка состояния сосновых древостоев по изменению ряда морфометрических параметров.

РАЙОН, ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обследования сосновых лесов юго-западного Забайкалья выполнялись в 2001–2004 гг. Регион характеризуется невысоким потенциалом самоочищения атмосферы от вредных примесей, что обусловлено горно-котловинным рельефом, инверсионной стратификацией атмосферы, длительным периодом низких температур воздуха и почвы. Это способствует накоплению поллютантов в приземном слое атмосферы и повышению уровня ее загрязненности.

На территории Забайкалья распространены сосновые, лиственничные, пихтовые, кедровые, березовые и смешанные леса. Нами исследованы древостои одной из основных лесообразующих пород – сосны обыкновенной, отличающейся высокой чувствительностью к атмосферным токсикантам. Общая площадь обследованных лесов составила около 500 тыс. га.

В районе исследований распространены приспевающие и спелые разнотравно-брусничные, рододендроновые, остепненные сосняки III–IV класса бонитета, запас которых оценивается в 150–250 м³/га. Почвы преимущественно горные дерново-лесные супесчаные и боровые пески. Жесткие лесорастительные условия: малое (200–400 мм в год) количество осадков, сухость воздуха, маломощный (10–20 см) снеговой покров, глубокое промерзание почвы – обуславливают формирование здесь сосняков низкой производительности и, как следствие, слабой устойчивости к негативным факторам.

Обследование древостоев проводилось на пробных площадях (ПП), заложенных в соответствии с методиками, которые приняты государственными органами лесного хозяйства [5, 6]. Для выявления особенностей пространственного распространения загрязнения лесов диоксидом серы заложены трансекты от крупных промышленных центров в сторону преобладающего атмосферного переноса. Пробные площади располагались на расстояниях 2, 10, 16, 40, 60, 100, 180 км от источников выбросов.

На ПП во второй половине вегетационного периода (начало августа) у деревьев сосны обыкновенной 2 класса возраста определяли основные морфометрические параметры, характеризующие состояние кроны и побегов. Хвою второго года жизни анализировали на содержание серы. Определение серы в хвое и подстилке проводилось по [7], в почве определяли подвижную форму серы (вытяжка KCl) по методике, описанной в [8]. Фоновое содержание этого элемента определялось на ПП, заложенных в сосняках, расположенных на расстоянии 50–200 км от промышленных центров. Коэффициент концентрации серы рассчитан по Саету [9]. Статистическая обработка данных проводилась по методике, описанной в [10], с использованием пакета программ Microsoft Excel 2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание серы в фоновых условиях

Атмосферное загрязнение оказывает как прямое воздействие на формирование химического состава ассимилирующих органов (на-

копление поллютантов, выщелачивание элементов питания), так и косвенное – через изменение питательного режима почвы. Однако для того чтобы оценить степень этого воздействия, необходимо знание исходного (фоновое) содержания элементов в исследуемом объекте. Фоновое содержание химического элемента представляет собой оценку среднего содержания и показателей варьирования содержания этого элемента, рассчитанных для участков, находящихся за пределами области природной или техногенной концентрации элемента [9].

Содержание подвижной серы в фоновых почвах региона в верхнем (0–30 см) слое изменялось от 0.16 до 0.63 мг/100 г. Среднее содержание элемента во всей совокупности почв составляло (0.43 ± 0.06) мг/100 г. Согласно шкале обеспеченности почв серой [11], рассмотренные почвы следует отнести к ряду низкообеспеченных. Наименьшее количество серы содержат боровые пески (0.16 мг/100 г), в горной дерново-лесной почве ее содержание почти в 4 раза выше.

Содержание серы в подстилке на этих же ПП изменялось от 0.025 до 0.08 % от массы сухого вещества. Среднее количество серы в подстилке составило (0.06 ± 0.01) %. Выявлена тесная сопряженность в содержании серы между почвой и подстилкой, о чем свидетельствует высокий коэффициент линейной корреляции (0.89 ± 0.17, $P = 0.99$, $t_{\text{факт}} = 5.1$, $t_{\text{теор}} = 3.5$).

Анализ литературных данных показывает, что фоновое содержание серы в хвое сосны обыкновенной варьирует в широких пределах

(0.016–0.06 % от массы сухого вещества) и для каждого региона имеет свой размах колебаний [1, 12]. Среднее содержание серы в хвое сосны обыкновенной в фоновых древостоях Забайкалья составило (0.032 ± 0.001) %, пределы варьирования 0.026–0.036 % (коэффициент вариации равен 11.6 %) (табл. 1). Согласно шкале обеспеченности элементами питания Вермана [цит. по 13], такое содержание серы в хвое считается достаточным.

Корреляционный анализ не выявил существенной зависимости содержания серы в хвое от ее содержания в почве ($r = 0.17$) или подстилке ($r = -0.26$). Это подтверждает выводы ряда авторов о том, что химический состав хвои сосны обыкновенной в фоновых условиях слабо зависит от содержания элементов в почве, возможно, из-за способности корневой системы деревьев поглощать элементы не только из почвы, но и из горной породы [13]. Кроме того, растения обладают способностью к фолитарному поглощению таких летучих элементов, как сера, фтор, йод из атмосферы.

Содержание серы в условиях промышленного загрязнения

Накопление серы в хвое сосны при аэро-техногенном загрязнении определялось нами в древостоях, подвергающихся влиянию трех главных и нескольких второстепенных промышленных узлов. Улан-Удэнский промузел характеризуется наибольшим количеством выбросов полиметалльного характера вслед-

ТАБЛИЦА 1
Содержание серы в хвое сосны обыкновенной в фоновых условиях

Место отбора проб	Расстояние от источника выбросов, км	Содержание серы, % от массы сухого вещества	Отношение к среднему содержанию*
пос. Таежный (Селенгинский р-н)	60	0.032 ± 0.002	1.0
с. Ониноборск (Хоринский р-н)	160	0.026 ± 0.001	0.8
пос. Удинск (Хоринский р-н)	100	0.034 ± 0.001	1.1
с. Ушхайта (Кижингинский р-н)	120	0.034 ± 0.002	1.1
пос. Окино Ключи (Бичурский р-н)	80	0.034 ± 0.001	1.1
с. Малая Кудара (Кяхтинский р-н)	100	0.026 ± 0.001	0.8
пос. Улекчин (Закаменский р-н)	80	0.036 ± 0.001	1.1

*Среднее содержание составляет (0.032 ± 0.001) % от массы сухого вещества.

стве развитого топливно-энергетического комплекса, машиностроительной промышленности, наличия предприятий по производству строительных материалов. Основным источником аэропромвыбросов Гусиноозерского промузла служит Гусиноозерская ГРЭС, которая длительное время работает на местных бурых углях с высоким содержанием серы. (Следует отметить, что в настоящее время этот промузел находится на стадии спада производства.) В Нижнеселенгинском промузле основными источниками аэропромзагрязнения выступают Селенгинский целлюлозно-картонный комбинат (СЦКК), предприятия по производству строительных материалов, в том числе цемента и асбеста.

Одна из основных характеристик геохимической или биогеохимической техногенной аномалии – это ее интенсивность, которая определяется степенью накопления элемента-загрязнителя по сравнению с природным фоном. Показатель уровня аномальности содержания элементов – коэффициент концентрации K_c , который рассчитывается как отношение содержания элемента C в исследуемом объекте при техногенной нагрузке к среднефоновому его содержанию $C_{\text{ф}}$: $K_c = C/C_{\text{ф}}$ [9]. К элементам аномального содержания относятся такие, K_c которых равен или больше 1.5.

Определение содержания серы в почве в окрестностях промышленных центров показало, что уровень этого элемента превышает фоновое значение в 1.5–2 раза. Наибольшее содержание отмечено в окрестностях СЦКК – 1.2 мг/100 г ($K_c = 2$) и Гусиноозерской ГРЭС – 1.0 мг/100 г ($K_c = 1.5$). С увеличением расстояния от источников выбросов концентрация серы в почве снижается и достигает фоновых значений на расстоянии свыше 40 км.

Концентрация серы в подстилке в окрестностях источников выбросов составляет 0.12 % (СЦКК), 0.1 % (ГРЭС) и 0.9 % (Улан-Удэ), что в 2–1.5 раза превышает среднефоновое ($K_c = 2, 1.6, 1.5$ соответственно). С увеличением расстояния до более 40 км ее концентрация снижается до 0.05 %.

В условиях промышленного загрязнения содержание серы в хвое сосны может в несколько раз превосходить фоновое значение. Появление видимых признаков повреждения хвои, угнетение роста вегетативных органов, снижение длины и массы хвои и побегов от-

мечается при превышении фонового значения по одним данным на 40–60 % [1, 14], по другим – в 1.5–2 раза [3, 15]. При сильном угнетении хвойных деревьев содержание серы значительно возрастает и превышает фоновое в 3–5 раз [1, 2, 16].

Анализ содержания серы в хвое сосны промышленных районов Бурятии (табл. 2) показал, что загрязнение лесной растительности этим элементом охватывает значительную территорию и имеет мозаичный характер. Его широкому распространению в регионе способствует наличие разнообразных источников серосодержащих эмиссий – предприятий топливной энергетики, целлюлозно-бумажной промышленности, строительной индустрии, лесоперерабатывающих производств. Кроме того, значительные количества серы поступают в атмосферу при сжигании бурых углей на теплоэлектростанциях городов. Концентрация серы в хвое сосны из промышленных районов варьирует от 0.044 до 0.088 %.

Наиболее высокое ее содержание, превышающее фоновый уровень в 2–2.5 раза, обнаруживается вблизи городов Улан-Удэ, Гусиноозерск и пос. Селенгинск. Их выбросы способствуют формированию ореолов среднего или сильного загрязнения лесов. Так, содержание серы в окрестностях Улан-Удэ превышает фоновое в 2.3 раза, а расположение в полузамкнутой котловине способствует скоплению аэропромвыбросов на прилегающих хребтах и их распространению по долине р. Уды – одного из крупных притоков р. Селенги. Меридиальное расположение Гусиноозерской котловины, закрытой с северо-запада и юго-востока хребтами, также способствует осаждению аэропромвыбросов в пределах этой котловины и на прилегающих хребтах, где и обнаруживаются наиболее высокие концентрации серы в хвое сосны. Нижнеселенгинский промузел относится к одному из наиболее загрязненных диоксидом серы районов, особенно в окрестностях поселков Селенгинск и Каменск. Содержание серы в хвое сосны превышает здесь среднефоновое в 2.7 и 1.8 раза соответственно, а отсутствие естественных препятствий на пути аэропромвыбросов способствует их переносу на значительное расстояние. Следует отметить, что исполь-

ТАБЛИЦА 2

Содержание серы и коэффициент концентрации K_c ее в хвое сосны обыкновенной в условиях влияния атмосферных выбросов промышленных узлов

Место отбора проб, расстояние от источника загрязнения	Содержание серы, % от массы сухого вещества	K_c
<i>Зоны сильного загрязнения (50 тыс. га)</i>		
Гусиноозерский промузел:		
2 км от ГРЭС	0.088 ± 0.001	2.8
8 км от ГРЭС	0.064 ± 0.001	2.0
Нижнеселенгинский промузел,		
пос. Селенгинск	0.086 ± 0.002	2.7
Улан-Удэнский промузел:		
Улан-Удэ, 4 км от ТЭЦ-1	0.075 ± 0.001	2.3
ТЭЦ-2	0.064 ± 0.001	2.0
<i>Зоны среднего загрязнения (80 тыс. га)</i>		
Нижнеселенгинский промузел:		
пос. Каменск	0.057 ± 0.001	1.8
8 км от пос. Селенгинск	0.054 ± 0.001	1.7
Гусиноозерский промузел,		
16 км от ГРЭС	0.055 ± 0.002	1.7
Улан-Удэнский промузел,		
15 км от Улан-Удэ	0.048 ± 0.002	1.5
Кяхтинский промузел,		
г. Кяхта	0.050 ± 0.002	1.6
Закаменский промузел,		
г. Закаменск	0.048 ± 0.002	1.5
<i>Зоны слабого загрязнения (250 тыс. га)</i>		
Гусиноозерский промузел,		
40 км от ГРЭС	0.044 ± 0.002	1.4
Нижнеселенгинский промузел,		
40 км от пос. Селенгинск	0.044 ± 0.001	1.4
Улан-Удэнский промузел,		
40 км от Улан-Удэ	0.040 ± 0.001	1.3
Джидинский промузел		

зование серной кислоты в производстве СЦКК при разложении древесины также может оказывать значительное влияние на загрязнение серой не только растительности, но и почв.

Локальные участки обследованной территории, где концентрация серы в хвое превышает фоновую в 1.5–1.8 раза, расположены в окрестностях менее крупных городов и поселков, источниками аэропромвыбросов в которых служат системы отопления и ряд местных производств (города Кяхта, Закаменск, пос. Джидида). При удалении от промышленных центров содержание серы в

хвое сосны постепенно снижается. Тем не менее на расстоянии 15–20 км ее уровень превышает фоновые значения в среднем в 1.6 раза ($K_c = 1.7–1.5$), т. е. является аномальным. На ПП, расположенных на расстоянии 40 км от источников выбросов, содержание серы в хвое сосны не превышает 0.04 % ($K_c = 1.2$), варьируя от 0.041 до 0.036 %, что, вероятно, слабо сказывается на метаболизме деревьев [3]. Концентрации серы в хвое сосны, близкие к фоновым, выявлены в районах, удаленных свыше 60 км от промышленных центров.

ТАБЛИЦА 3

Коэффициенты корреляции между содержанием серы в хвое и морфометрическими показателями крон деревьев сосны, произрастающих на разном удалении от источника загрязнения

Расстояние от источника выбросов, км	Степень дефолиации крон, %	Коэффициент корреляции					
		Продолжительность жизни хвои	Длина побега	Масса побега	Число хвоинок	Длина одной хвоинки	Масса 50 хвоинок
2–8	0.71	-0.96	-0.98	-0.94	-0.83	-0.85	-0.32
20–40	0.47	-0.56	-0.59	-0.34*	-0.55	-0.22	-0.1*
Фон (80–100)	0.17*	-0.26*	-0.37*	-0.35*	-0.24*	0.1*	0.12*

*Недостовверные данные.

На основании данных об изменении показателя K_c серы в хвое сосны под влиянием атмосферных выбросов можно условно выделить четыре уровня (зоны) загрязнения сосновых лесов Забайкалья серосодержащими эмиссиями:

1) фоновый ($K_c = 0.8-1.1$), на расстоянии более 60 км от источников выбросов, загрязнение отсутствует;

2) слабый ($K_c = 1.3-1.4$), на расстоянии 40–60 км;

3) средний ($K_c = 1.5-1.9$), на расстоянии 10–20 км;

4) сильный ($K_c = 2.0-2.8$), на расстоянии до 10 км от промузлов.

Представляло интерес выявить взаимосвязи между содержанием серы в хвое сосны, почве и подстилке в условиях промышленного загрязнения. Корреляционный анализ показал наличие прямой зависимости содержания серы в почве от ее содержания в подстилке ($r = 0.86$, $P = 0.95$), слабой положительной зависимости между уровнем серы в хвое и подстилке ($r = 0.47$, $P = 0.95$) и отсутствие связи между концентрацией серы в почве и хвое ($r = 0.14$, $P = 0.95$). Это позволяет сделать вывод о том, что в условиях техногенного загрязнения данные о содержании серы в почве имеют меньшее индикаторное значение по сравнению с показателями накопления серы в хвое, что, вероятно, объясняется неоднородностью структуры и буферных свойств почв.

Накопление поллютантов в хвое вызывает изменение ее физиолого-биохимических показателей, функционального состояния, что отражается на морфометрических параметрах и, как следствие, вызывает снижение продуктивности древостоя. Результаты проведенного корреляционного анализа вы-

явили зависимость между содержанием серы в хвое и изменением ряда морфометрических параметров деревьев (табл. 3). Наиболее высокие коэффициенты корреляции между содержанием серы в хвое и степенью дефолиации крон, продолжительностью жизни хвои, длиной и массой побегов, числом хвоинок и их длиной обнаруживаются в зоне сильного загрязнения (2–8 км от источников выбросов). При снижении уровня загрязнения, на удалении 20–40 км от промышленных центров, достоверность корреляционных связей между рассматриваемыми параметрами снижается, а в фоновых условиях коэффициенты корреляции недостоверны. Следовательно, в условиях сильного загрязнения сера выступает одним из существенных факторов, влияющих на угнетение древостоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенных исследований можно заключить, что загрязнение лесов Забайкалья серосодержащими поллютантами охватывает значительную территорию и имеет сложный мозаичный характер. Наиболее высокие концентрации серы в хвое сосны выявлены в непосредственной близости от крупных источников выбросов, на расстоянии до 10 км от них.

Тенденция к увеличению количества серы в хвое сохраняется на территориях, прилегающих к промышленным зонам, на расстоянии 10–40 км. Содержание серы в хвое сосны, близкое к фоновому уровню или незначительно превышающее его, обнаруживается на удалении 80–100 км от промузлов, а также в подветренных южной и западной частях Забайкалья.

Выявлена зависимость между содержанием серы в хвое и изменением ряда морфометрических параметров деревьев. В зоне сильного загрязнения обнаруживаются наиболее высокие коэффициенты корреляции между содержанием серы в хвое и степенью дефолиации крон, продолжительностью жизни хвои, длиной и массой побегов, числом хвоинок, их длиной. При снижении уровня загрязнения достоверность корреляционных связей между рассматриваемыми параметрами снижается.

Негативное воздействие повышенных концентраций диоксида серы техногенного происхождения на сосновые леса важнейшей для оз. Байкал водосборной территории диктует необходимость постоянного мониторинга содержания серы в информативном для этой цели биообъекте – хвое сосны обыкновенной. Кроме того, в перспективе при проведении природоохранных мероприятий необходимо снижать техногенные нагрузки на окружающую среду Байкальского региона, имеющего особый режим природопользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Р. Гудериан, Загрязнение воздушной среды, Мир, Москва, 1979.
- 2 П. С. Пастернак, В. П. Ворон, Т. Ф. Стельмахова, *Лесоведение*, 2 (1993) 28.
- 3 Лесные ландшафты Беларуси, Наука и техника, Минск, 1992.
- 4 Состояние и охрана окружающей среды в Республике Бурятия в 2002 г., Улан-Удэ, 2003.
- 5 Инструкция по экспедиционному лесопатологическому обследованию лесов СССР, Гослесхоз СССР, Москва, 1983.
- 6 Методика организации и проведения работ по мониторингу лесов СССР, Пушкино, ВНИИЛМ, Москва, 1987.
- 7 А. Д. Мочалова, *Сел. хоз-во за рубежом*, 4 (1975) 17.
- 8 Р. Х. Айдинян, М. С. Иванова, Т. Г. Соловьева, Методы извлечения и определения различных форм серы в почвах и растениях, изд. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, Москва, 1968.
- 9 Ю. Е. Саев, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др., Геохимия окружающей среды, Недра, Москва, 1990.
- 10 Н. А. Плохинский, Биометрия, Наука, Москва, 1970.
- 11 Методические указания по применению удобрений, содержащих серу, Изд-во МСХ СССР, Москва, 1983.
- 12 Х. Я. Пярн, Влияние промышленного загрязнения на лесные экосистемы и мероприятия по повышению их устойчивости, Гирионис, Каунас, 1984.
- 13 В. П. Фирсова, Т. С. Павлова, Почвенные условия и особенности биологического круговорота веществ в горных сосновых лесах, Наука, Москва, 1983.
- 14 Ю. З. Кулагин, Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование, Наука, Москва, 1980.
- 15 Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение, Наука, Ленинград, 1990.
- 16 Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского п-ова, Под ред. Б. Норина, В. Ярмишко, БИН АН СССР, Ленинград, 1990.