

УДК 630*18:574.4

ВЛИЯНИЕ ПОЛОГА СОСНОВОГО И БЕРЕЗОВОГО ЛЕСА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОСАДКОВ В ЗАПОВЕДНИКЕ «КИВАЧ»

Г. В. ШИЛЬЦОВА, В. Г. ЛАСТОЧКИНА

Институт леса Карельского научного центра РАН

Приведены некоторые результаты стационарных исследований 1996–2000 гг. химического состава атмосферных осадков в сосновых и березовых лесах региона в естественных условиях (заповедник «Кивач», средняя подзона тайги, Республика Карелия). Рассматриваются вопросы преобразования осадков под воздействием полога леса.

G. V. SHILTSOVA, V. G. LASTOCHKINA. EFFECT OF PINE AND BIRCH FOREST CANOPY ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF PRECIPITATION IN THE «KIVACH» RESERVE

The paper presents some results of permanent plot studies of the chemical composition of atmospheric precipitation in undisturbed pine and birch forests of the region (Kivach Strict Nature Reserve, middle taiga, Republic of Karelia) carried out in 1996–2000. Problems of precipitation transformation by forest canopy are considered.

Ключевые слова: мониторинг, химизм осадков, макро- и микроэлементы, сосновые и березовые насаждения.

Атмосферные выпадения являются одним из регулярно действующих факторов, систематически приносящих на поверхность почвы различные растворенные вещества. Они играют важную роль в формировании питательного режима бореальных лесов. Поступление элементов из атмосферы рассматривают как компенсатор потерь биогеоценозом (БГЦ) элементов-биофилов в условиях гумидного режима.

Разная древесная растительность оказывает неодинаковое воздействие на формирование кислотности дождевых вод и содержание в них тех или иных компонентов (Мина, 1965; Карпачевский, 1977, 1981; Морозова, Куликова, 1974; Стрелкова, 1974; Глазовский и др., 1978; Медведев и др., 1986; Петров и др., 1988; Шильцова, 1996 и др.). Для всех элементов существуют как фациальные различия в их поступлении на подстилающую поверхность, так и

внутрифациальные – под разными деревьями и в пределах их подкронового пространства. Это является следствием биохимических особенностей дерева и собственно ландшафтно-геохимических условий их произрастания.

Если в отношении макроэлементов в литературе имеется значительный материал, то вопрос о трансформирующем влиянии древесной растительности на формирование микроэлементного состава осадков является малоизученным (Цинк и кадмий..., 1992; Учватов, 1994; Карпачевский и др., 1998; Шильцова, Ласточкина, 2001 и др.). Не получило должной экспериментальной оценки поступление элементов с осадками под полог разных древостоев; не выяснен до конца механизм преобразования осадков растительностью; противоречивы данные о влиянии на химизм осадков различных древесных пород. Систематические

наблюдения за содержанием микроэлементов в осадках являются весьма актуальными в связи с усиливающимся загрязнением атмосферы веществами техногенного происхождения, которое приобрело в настоящее время региональный, а по некоторым ингредиентам – глобальный характер.

Целью данной работы является определение и оценка роли древесной растительности в преобразовании состава осадков в естественных условиях Карелии.

С 1991 г. на территории Государственного природного заповедника «Кивач» нами исследуются кислотность и состав атмосферных осадков на стационарных мониторинговых площадях Института леса КарНЦ РАН, заложенных в 1985 г. и представляющих сосновые и березовые леса региона в естественных условиях.

Приведем краткую характеристику пробных площадей. Сосняк черничный, средний возраст 60 лет, по производительности относится к I классу бонитета. Состав древостоя 9С1Б, полнота 0,7, общая сомкнутость полога 0,6. Сформирован на двучленных озерно-ледниковых отложениях. Почва – подзол иллювиально-железистый песчаный с прослоями утяжеленного механического состава в профиле. Березняк разнотравный, средний возраст 60 лет, по производительности относится к I классу бонитета. Состав древостоя 10Б, ед. С, полнота 0,8, сомкнутость 0,7. Сформирован на элювиально-поверхностно-глееватой почве на древнеозерных ленточных глинах.

Приемники для сбора осадков (стеклянные или пластмассовые банки с воронками) располагались равномерно по 10 шт. на каждой пробной площади размером 50 × 50 м². Осадки собирались и анализировались ежемесячно. Одновременно учет и анализ атмосферных осадков проводили на поляне. Наблюдения за выпавшей влагой (на поляне) осуществляли круглогодично, в лесных БГЦ – в теплый период года (июнь – сентябрь). Учитывая трудности в методике изучения микроэлементов в атмосферных осадках, обусловленные крайне низкими их концентрациями и затрудненным химико-аналитическим определением, соблюдали следующие правила. Места установки коллекторов под пологом леса не менялись, все полевые работы проводились одними исследователями (авторами статьи) по единой методике в течение 12 лет. Поэтому можно считать, что результаты исследования химического состава атмосферных осадков и осадков, трансформированных древесной растительностью, отражают объективные природные процессы в биосфере региона и закономерности формирования и поступления элементов из атмосферы в заповедных лесах.

В фильтрате определяли следующие компоненты: Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb и pH. Определение валового содержания Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, а также

Ca и Mg производили на атомно-абсорбционных спектрофотометрах С-115М в пламени и КВАНТ-Z.ЭТА с электротермическим атомизатором. K⁺ и Na⁺ определяли методом пламенной фотометрии, NH₄⁺ – спектрофотометрически, pH – потенциометрически. Для определения содержания анионов в воде (SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻) использовался ионный хроматограф фирмы Waters (США). Полученные в результате химических анализов массивы данных были обработаны статистически с использованием стандартного пакета программ Microsoft Office.

Ранее, в течение 1966–1970 гг., в заповеднике «Кивач» исследовался химический состав природных вод А. А. Стрелковой (1974, 1978), наблюдения проводились в сосняках лишайниковом и брусничном. В число определенных показателей микроэлементы не входили.

Сведения по содержанию микро- и макроэлементов в дождевых водах до и после взаимодействия их с пологом соснового леса частично нами опубликованы (Шильцова, 1996; Шильцова, Ласточкина, 2001), данные по поступлению водорастворимых микроэлементов в березовых лесах Карелии представлены впервые. Сравнительный анализ воздействия полога соснового и березового леса на состав осадков выполнен на основе синхронных наблюдений в заповеднике «Кивач» в 1996–2000 гг.

Одним из важнейших показателей химического состава атмосферных осадков является их кислотность. В годы исследования в зоне заповедника дождевые воды были слабокислыми со средней величиной pH 5,5. Присутствие в атмосфере примесей терригенного происхождения расширяет диапазон варьирования pH в месячных пробах до 4–6,8. При этом выявлено, что более половины (60%) проб осадков имели pH ниже 5,6, т. е. были подкисленными, что указывает на загрязнение атмосферы кислыми компонентами. Осадки с такой величиной pH преобладают зимой. В это время существенно уменьшается поступление пылевых частиц, которые способны в известной мере нейтрализовать кислотные компоненты в атмосфере.

В период вегетации в результате взаимодействия атмосферных осадков с древесной растительностью происходит их преобразование под влиянием активно функционирующего биоценоза. Дождевые воды, стекая с крон сосен, смывают с них и растворяют частицы пыли, органические и минеральные вещества кислотной природы, в результате величина pH осадков снижается в среднем с 5,8 до 5,5, таким образом, относительно «кислые» дожди, проходя через кроны исследуемого соснового насаждения, еще более подкисляются. Такая тенденция уже отмечена исследователями.

В дождевых водах, прошедших через кроны сосны, значительно повышается содержание растворимого углерода, до 22,05 мг/л, что практически равно концентрации водорастворимых

соединений всех других рассматриваемых элементов в сумме. Высокое содержание $S_{орг}$ в подкроновых водах определяет их кислый характер. В меньшей мере под влиянием сосны повышается содержание сульфатов (табл. 1). Поступление сульфатной серы связывают со способностью сосны поглощать серу из атмосферы в количестве тем большем, чем больше ее содержится в воздухе. Отмечается связь между содержанием серы в осадках и в подкроновых водах (коэффициент корреляции 0,57). Следовательно, чем больше выпадает серы с осадками, тем больше ее поступает под полог леса на поверхность почвы. Поступление в почву более кислых осадков имеет важное экологическое значение, поскольку при этом увеличивается выщелачивание из нее минеральных элементов питания и элементов-загрязнителей.

Таблица 1. Изменение химического состава жидких атмосферных осадков под влиянием древесной растительности в заповеднике, мг/л

Показатель	Поляна	Под пологом	
		сосны	березы
Ca^{2+}	0,60	1,15	1,43
Mg^{2+}	0,17	0,42	0,81
Na^+	0,37	0,76	0,82
K^+	0,85	3,26	6,96
NH_4^+	1,07	2,17	2,59
Cl^-	0,55	1,11	1,00
NO_3^-	0,32	0,33	0,34
SO_4^{2-}	1,87	2,76	2,74
HCO_3^-	7,69	9,51	27,81
Σ ионов	13,49	21,47	44,50
$S_{орг}$	9,82	22,05	18,08

Если сосна оказывает подкисляющее воздействие на атмосферные осадки, способствуя усилению растворимости элементов, скорости и интенсивности миграционных процессов, то береза, наоборот, оказывает обратное действие. Под влиянием березы реакция среды смещается в нейтральную сторону – до pH 6,4. Процесс подщелачивания раствора, омывающего березу, наблюдается в 80% случаев. Для дождевых вод, прошедших полог березового леса, характерно варьирование pH в интервале 5,9–7,2, под сосной этот диапазон шире (4,6–6,7). Понижение кислотности вод под березой во многом обусловлено значительным содержанием гидрокарбонатов, доминирующих в ионном составе. Атмосферные осадки, прошедшие через крону березы, содержат и меньше органического вещества, чем осадки, просачивающиеся через крону сосны.

По абсолютному содержанию ион калия и гидрокарбонатный преобладают в подкроновых водах как в сосняке черничном, так и в березняке разнотравном, в исходных же осадках превалируют гидрокарбонаты и сульфаты. На-

ряду с калием и гидрокарбонатами в подкроновых водах имеется значительное количество азота (в виде аммиака) и серы, обладающих высокой фитотоксичностью. Все ионы в зависимости от количественного содержания их под деревьями можно расположить в следующие ряды:

Поляна: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > NH_4^+ > K^+ > Ca^{2+} > Cl^- > Na^+ > NO_3^- > Mg^{2+}$;

Сосна: $HCO_3^- > K^+ > SO_4^{2-} > NH_4^+ > Ca^{2+} > Cl^- > Na^+ > Mg^{2+} > NO_3^-$;

Береза: $HCO_3^- > K^+ > SO_4^{2-} > NH_4^+ > Ca^{2+} > Cl^- > Na^+ > Mg^{2+} > NO_3^-$.

Отметим, что в трансформированных древостоями осадках доминируют те же ионы, что и в выпавших, это HCO_3^- , K^+ , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} . При этом порядок изменения концентраций (как катионов, так и анионов) ионов под сосной и березой аналогичен при существенном количественном различии.

Под влиянием древесного полога концентрации большинства элементов в осадках возрастают (табл. 1). При этом наиболее заметно изменяются осадки под березой. Так, содержание гидрокарбонатного иона в водах, прошедших полог березы, увеличивается почти в 4 раза, тогда как под сосной – в 1,2. Сосна и береза оказывают одинаковое влияние на содержание серы в сульфатах и хлора, их концентрации в подкроновых водах возрастают в среднем в 1,5–2 раза. Количество нитратов в выпавшей влаге и под пологом леса одинаково низкое (0,3 мг/л). Азот в водах, прошедших кроны сосны и березы, нередко (в отдельные месяцы) отсутствовал или обнаруживались лишь «следы», что свидетельствует в пользу поглощения этих соединений азота древесной растительностью. Поглощение хвоей сосны азота в виде нитратов, а также гидрокарбонатов в течение вегетационного периода отмечалось нами ранее при изучении процессов водной миграции вещества в сосновых БГЦ северной и средней тайги Карелии (Шильцова, 1996; Шильцова, Ласточкина, 2001).

Из катионов наибольшее влияние древостой оказывает на содержание калия, его концентрация в дождевых водах под сосной увеличивается в 4 раза и почти в 8 – под березой. По содержанию кальция на третьем месте (после K^+ и NH_4^+) среди катионов в составе осадков. С растворами, фильтрующимися через кроны, за счет выщелачивания из растительных тканей сосны и березы в почву поступает в 2–2,4 раза больше кальция. В целом минерализация дождевых вод, трансформированных пологом березового леса, вдвое выше, чем соснового, она характеризует интенсивность поступления химических веществ на поверхность почвы.

Анализ средних концентраций веществ в осадках, собранных одновременно под кронами сосны и березы, произрастающих в сходных условиях, показывает, что береза теряет

веществ больше, чем сосна. Из березы по сравнению с сосной вымывается вдвое больше калия, магния, в 3 раза – гидрокарбонатов. Из этих пород вымывается примерно одинаковое количество серы (в сульфатах) и хлора. Следовательно, березовые леса по сравнению с сосновыми могут быть более чувствительными к выщелачиванию катионов подвижными анионами, поступающими с осадками.

Что касается растворимых соединений металлов – микроэлементов, то дожди, проникающие через древесный ярус, наиболее обогащены марганцем, его содержание увеличивается под березой почти в 5 раз и в 8 – под сосной (табл. 2). Степень обогащения дождевых вод железом, медью и свинцом примерно одинаковая (в 2–2,5 раза). Равное поступление железа в почву под кронами сосны и березы в водорастворимом состоянии определяется тем, что этот элемент попадает в осадки из пыли атмосферы и осевшей на хвое и листьях деревьев.

Таблица 2. Концентрации микроэлементов в жидких атмосферных осадках и их изменение под влиянием древесной растительности, мкг/л

Место отбора проб	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
Поляна	10,0	28,8	4,4	9,3	1,6
Под пологом сосны	76,6	61,6	11,6	9,1	3,6
Под пологом березы	46,8	61,4	10,6	13,0	4,0

Корреляционный анализ показывает наличие связи между концентрациями железа, цинка и марганца в дождевых водах до и после преобразования их пологом соснового леса (коэффициенты корреляции соответственно равны 0,81; 0,63; 0,60). Очевидно, основной причиной обогащения вод, просочившихся через древесный полог соснового насаждения, Fe, Zn, Mn является смыв металлов, поступающих из атмосферы, с поверхности хвои и ветвей деревьев.

Наиболее значительно подкروновые воды обогащаются за счет биогенных элементов – железа и марганца, однако если в сосняке преобладает Mn, то в березняке – Fe. На долю этих ингредиентов в подкроновых водах исследуемых БГЦ приходится 80–85% и несколько меньше (72%) – на поляне. По степени увеличения концентраций водорастворимых металлов в атмосферных осадках (1), осадках, трансформированных сосновыми (2) и березовыми (3) древостоями, их можно расположить в следующие ряды:

Fe > Mn > Zn > Cu > Pb (1),
Mn > Fe > Cu > Zn > Pb (2),
Fe > Mn > Zn > Cu > Pb (3).

Эти соотношения в общих чертах отражают уровень трансформации микроэлементного состава жидких атмосферных осадков под влиянием древесной растительности в зоне заповедника. По распределению концентраций металлов в водах, просочившихся через полог березы, образуется ряд, аналогичный осадкам. Последовательность распределения элементов в сосновом лесу нарушается и прежде всего за счет повышения уровня содержания водорастворимого марганца.

Неодинаковое количество осадков и концентрации веществ определяют разную интенсивность поступления веществ в почву. Согласно нашим исследованиям, в заповеднике «Кивач» в 1996–2000 гг. количество осадков составило 420 мм, из них около 40% приходится на период вегетации. Под полог соснового леса в течение вегетационного периода поступало в среднем 70%, а березового – 80% выпавшей влаги. Полученные данные были пересчитаны на площадь с учетом количества осадков. Несмотря на меньшее количество дождевых вод, проникающих под древесный полог, поступление ряда элементов здесь выше, чем на поляне, и оно неодинаково в исследуемых насаждениях (табл. 3).

Сравнение поступления элементов на открытой местности, в сосняке и березняке показывает, что под кронами деревьев поступает больше водорастворимых соединений углерода, калия, азота (в аммиаке). Поступление их в сосновом лесу повышается в 1,2–2,5 раза, в березовом – в 2–5 раз. Различие в поступлении сульфатов сглаживается. Выщелачивание нитратов этими деревьями проблематично, а поступление гидрокарбонатов под сосной даже меньше, чем на поляне, так как часть их при движении вод перехватывается вегетирующими растениями.

В целом поступление макрокомпонентов в сосновом лесу равно поступлению их на открытых участках. А суммарное количество водорастворимых веществ, поступающих в березовый БГЦ, вдвое больше, чем в сосновый: с атмосферными дождевыми водами под кроны березы привносится больше в 1,4–3 раза $C_{орг}$, K^+ , HCO_3^- , NH_4^+ и других элементов.

На открытых участках, под сосной и березой поступление гидрокарбонатов с дождевыми водами превышает количество всех определяемых ионов. И если на поляне после гидрокарбонатов на втором месте сульфаты, в сосняке –

Таблица 3. Поступление веществ с дождевыми водами на поверхность почвы под сосновыми и березовыми лесами за период вегетации (1996–2000 гг.), г/м²

Место отбора проб	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Σ ионов	C _{орг}
Поляна	0,12	0,03	0,15	0,06	0,12	0,08	0,35	0,11	1,60	2,62	1,64
Сосняк черничный	0,14	0,05	0,38	0,07	0,27	0,07	0,37	0,14	1,24	2,39	2,18
Березняк разнотравный	0,20	0,09	0,82	0,11	0,39	0,08	0,38	0,15	3,63	5,85	3,25

в равных количествах сульфаты и калий, то в березняке – калий.

Более интенсивное поступление элементов в подкроновых пространствах при меньшем количестве осадков можно объяснить интенсивными процессами на поверхности активно функционирующих хвои и листьев деревьев, а также смывом пыли с кроны, обладающей большой сорбционной способностью.

Итак, в сосновых и березовых БГЦ, послуживших объектами исследования, в составе дождевых вод, прошедших сквозь кроны деревьев, доминируют углерод, гидрокарбонаты, сульфаты, калий, аммоний, из микроэлементов – железо и марганец.

Древостои увеличивают концентрации большинства определяемых элементов и в наибольшей степени водорастворимого углерода, калия, кальция, азота (в аммиаке), марганца, железа, свинца, меди. Кроны сосны и березы оказывают одинаковое воздействие на содержание в дождевых водах серы (в сульфатах) и хлора, не влияют на количество азота в виде нитратов.

Суммарное поступление макрокомпонентов с дождевыми водами на поляне и в сосняке черничном примерно одинаковое (2,6–2,7 г/м²), в березняке разнотравном оно почти удваивается. Количество растворимого углерода, калия, аммония, кальция, вымываемых дождями из листьев березы, больше, чем из хвои сосны. Только березовое насаждение увеличивает поступление гидрокарбонатов в дождевых водах, проходящих сквозь его полог.

Мониторинг природных вод является необходимым условием сохранения биоразнообразия заповедных экосистем. Только непрерывные наблюдения позволяют выявить опасные высокие концентрации поллютантов, отмечаемые в отдельные месяцы, и определить своевременно тренд изменения состояния атмосферы в условиях заповедного режима.

Литература

- Глазовский Н. Ф., Учватов В. П., Злобина А. И., 1978. Поступление водорастворимых компонентов и пыли на поверхность земли из атмосферы под разными типами растительности в теплое время года // Опыт и методы экологического мониторинга. Пущино: Научный центр биологических исследований АН СССР в Пущине. С. 137–141.
- Карпачевский Л. О., 1977. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: МГУ. 312 с.
- Карпачевский Л. О., 1981. Лес и лесные почвы. М.: Лесная промышленность. 264 с.
- Карпачевский Л. О., Зубкова Т. А., Прохислер Т. и др., 1998. Воздействие полога ельника сложного на химический состав осадков // Лесоведение. № 1. С. 50–59.
- Медведев Л. В., Шитикова Т. Е., Алексеенко В. А., 1986. Трансформация жидких атмосферных осадков древостоями южной тайги (на примере Валдая) // Структура и функционирование экосистем южной тайги. М. С. 26–55.
- Мина В. Н., 1965. Выщелачивание некоторых веществ атмосферными осадками из древесных растений и его значение в биологическом круговороте // Почвоведение. № 6. С. 7–17.
- Морозова Р. М., Куликова В. К., 1974. Роль атмосферных осадков в круговороте азота и зольных элементов в еловых лесах Карелии // Почвенные исследования в Карелии: Материалы к X Международному конгр. почвоведов. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР. С. 143–149.
- Петров Е. Г., Бережная Л. И., Качановский И. М., Короткевич Н. А., 1988. Экологический режим сосновых биогеоценозов. Минск: Наука и техника. 160 с.
- Стрелкова А. А., 1974. Процессы миграции веществ с природными водами // Почвенные исследования в Карелии: Материалы к X Международному конгр. почвоведов. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР. С. 150–161.
- Стрелкова А. А., 1978. Химический состав природных вод и миграция веществ в сосновых биогеоценозах // Почвы сосновых лесов Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР. С. 59–67.
- Учватов В. П., 1994. Природные и антропогенные потоки вещества в ландшафтах Русской равнины: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ. 37 с.
- Цинк и кадмий в окружающей среде, 1992. М.: б. и. 200 с.
- Шильцова Г. В., 1996. Трансформация атмосферных осадков древостоями средней тайги (на примере заповедника «Кивач») // Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 79–91.
- Шильцова Г. В., Ласточкина В. Г., 2001. Мониторинг атмосферных осадков в лесных экосистемах северной Карелии // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 182–191.