

# БИОГЕОХИМИЯ

## ИНДИКАЦИЯ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА (ЮЖНЫЙ УРАЛ) НА СОСНУ ОБЫКНОВЕННУЮ

И.Н. Агиков

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
*Ленинский проспект, д. 4, , Москва, Россия, 119991*

Исследовано влияние атмосферных выбросов Карабашского медеплавильного комбината (КМК) на апикальный прирост, длину и сохранность хвоинок, число смоляных ходов хвоинок сосны обыкновенной. Установлено, что апикальный прирост сосны обыкновенной однозначно связан с выбросами медеплавильного комбината. Обнаружено, что длина хвоинок резко уменьшается на расстоянии 9 км от труб комбината, что объясняется глубокой перестройкой комплекса почвенных беспозвоночных.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, апикальный прирост, число смоляных ходов, длина хвоинок, сохранность хвоинок.

Любое предприятие цветной металлургии является источником аэротехногенного воздействия, которое отрицательно сказывается на состоянии лесных комплексов как искусственного, так и естественного происхождения. Главными источниками негативного влияния этих промышленных образований являются выбросы в атмосферу тяжелых металлов и сернистого ангидрида, которые, поступая в биогеоценозы, нарушают их нормальное функционирование. Если такое аэротехногенное воздействие достаточно сильное, то оно вызывает полную трансформацию или гибель этих экосистем таким образом, что дальнейшее их существование в нативном виде становится практически невозможным [8; 10; 11].

Функциональные особенности любой экосистемы, а также ее структура определяются абиотическими и биотическими факторами. К абиотическим относятся, например, геологическая обстановка (особенности ландшафта, геохимия материнских пород и т.д.), метеорологические условия (число солнечных дней в году, средняя годовая температура и средние температуры зимнего и вегетационного периодов, влажность, количество осадков и т.д.); к биотическим — структурные особенности фитоценозов и почвенного редуцирующего комплекса, свойства которого определяются сообществами почвенных беспозвоночных, грибов

и бактерий, сила давления фитофагов на растительность, хищников на жертвы, внутривидовая и межвидовая конкуренция, межвидовой симбиоз в широком смысле и многие другие. При этом все факторы тесно связаны друг с другом и образуют единую биогеоценотическую систему, следовательно, глубокое изменение любого из них приведет к полной трансформации всей экосистемы в целом.

Негативное воздействие аэротехногенных поллютантов на лесные биогеоценозы можно свести к двум факторам. Первый из них связан с воздействием загрязняющих веществ на члены лесного сообщества, что в конечном счете приводит к трансформации пищевых цепей; второй — с их воздействием на продуцирующие и редуцирующие звенья круговорота веществ в биогеоценозах, что вызывает снижение мощности массовых и энергетических потоков. Последнее имеет место в том случае, если аэротехногенное воздействие затрагивает ключевые компоненты сообщества. К ним относится почвенный комплекс, в котором протекают процессы деструкции органического вещества, отвечающий за минеральное питание растительности, а также сами фитоценозы, отвечающие за фотосинтетическую активность, т.е. за продукцию органического вещества.

Следует подчеркнуть, что структура и особенности биогеоценологических сообществ тесно связаны с фундаментальными звеньями биологического круговорота, т.е. с интенсивностью продукции и утилизации материальных и энергетических ресурсов системы. Действительно, избыток или нехватка основных биогенных микро- и макроэлементов целиком определяет облик экосистемы как на почвенном, так и на фитоценотическом уровне. Поэтому при изучении влияния антропогенного воздействия на любые биогеоценозы необходимо принимать во внимание такие параметры экосистем, которые отражают количественные и качественные характеристики энергетических и массовых потоков. К ним можно отнести жизненное состояние древостоев, биомассу и площадь поверхности листвы, общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса, которые косвенно отражают интенсивность фотосинтеза; радиальный и апикальный прирост древостоев, суммарную биомассу трав и кустарничков, отражающих скорость продукции органического вещества; валовую эмиссию  $\text{CO}_2$  почвой, скорость деструкции целлюлозы, толщину подстилки, общую биомассу почвенных беспозвоночных, видовую и экологическую структуры их сообществ, косвенно или напрямую отражающие интенсивность минерализации органических соединений. Это утверждение согласуется с результатами исследований, проведенных в зоне влияния таких объектов цветной металлургии как Североникель, Печенганикель (Кольский полуостров), Среднеуральский медеплавильный завод (Средний Урал), Карабашский медеплавильный комбинат (Южный урал) и др. [8; 10; 11]. Более того, как показывает практика, эти показатели являются наиболее надежными и наиболее полно отражают состояние экосистемы в целом, что подтверждается их синхронным «быстрым» снижением при превышении некоторого допустимого уровня воздействия [8; 10].

**Объекты и методы исследования.** В условиях Южного Урала основными типами лесов являются березняки и сосняки разно-травные. В условиях снижения антропогенного воздействия, что произошло в 1990-е гг. в результате временного

закрытия КМК, площадь последних заметно увеличилась. Поэтому в качестве объекта в данном исследовании выбраны сосняки разнотравные и мертвопокровные, произрастающие на различном удалении от источника эмиссий. Целью данного исследования является изучение влияния аэротехногенных выбросов на динамику апикального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*), отражающего скорость продукции органического вещества, а также длина хвоинок, их состояние в баллах по Шуберту и число смоляных ходов, косвенно отражающих интенсивность фотосинтетической активности древостоев вида-эдификатора.

Рельеф местности изучаемой территории представляет собой сложную горную систему. Само медеплавильное предприятие приурочено к естественной депрессии, так называемой Саймоновской долине, которая практически со всех сторон окружена цепью гор и возвышенностей. На востоке Саймоновская долина граничит с небольшой горной системой (г. Золотая), далее на юго-востоке находится Ильменский хребет. Обе горные системы протянуты практически меридиально с небольшим (около 15°) отклонением на восток. Высота этих образований не превышает 200—250 м над уровнем местности (около 600 м над уровнем моря). Основные слагающие породы: граниты, гнейсы, зеленокаменные породы (хлоритизированные, эпидотизированные, рассланцованные) [7].

Почвы разнообразны и представлены бурыми горно-лесными, бурыми лесными, оподзоленными глееватыми, серыми горно-лесными, подсосновыми лесами, горно-подзолистыми типами. Они характеризуются сильной каменистостью и сравнительно невысокой мощностью профиля [8].

Изучаемая территория расположена в лесной зоне, в подзоне сосново-березовых лесов. Ее лесистость составляет от 70—80 до 90%. В составе флоры участвует значительное количество степных видов, местами формирующих остепненные и различные степные группировки. Типы леса: зеленомошно-брусничные и брусничные сосняки, а также производные от них березняки [5].

Все пробные площади (ПП) закладывались на трансектах, проходящих через центр источника атмосферных выбросов вдоль и поперек господствующего северо-западного направления ветра. Всего было заложено семь ПП: ЮВ-3, ЮВ-6, ЮВ-12, СВ-6, СВ-9, СВ-12 и СЗ-3. В маркировке буквенный шифр означает направление, цифра — расстояние от труб комбината в километрах. Краткая характеристика пробных площадей приведена в [1].

Хвоинки на каждой ПП отбирались с десяти сосен со стороны комбината на уровне груди по 10 пар с каждой (пять пар хвоинок первого и столько же второго года). Всего при исследовании было обработано 700 хвоинок (длина, состояние в баллах по Шуберту) и 210 хвоинок при исследовании их поперечного среза с подсчетом числа смоляных ходов (по 30 с каждой ПП). На тех же ПП, за исключением СВ-12, производился замер годового апикального прироста сосны (по 10 с каждой ПП) при помощи рулетки с точностью  $\pm 0,5$  см.

Длина хвоинок измерялась при помощи металлической линейки с точностью  $\pm 0,5$  мм. Состояние хвоинок по Шуберту оценивалось на глаз по шестибальной шкале (6 баллов — хвоинка без видимых некротических пятен и повреждений, 3 балла выставлялись в случае поражения 50% поверхности, 1 балл — мертвая

хвоинка). Изучение поперечного среза хвоинок с подсчетом числа смоляных ходов проводилось при помощи стандартного светового микроскопа с увеличением  $10 \times 10$ .

Полученные тренды прироста сосны произрастающих на ПП ЮВ-6, ЮВ-12 и СВ-12 аппроксимировались классическим статистическим методом, т.е. с помощью уравнения регрессии с квадратичной поправкой

$$y = \exp[R_1(t - 2004) + \bar{x} + \psi(x)],$$

где  $R_1$  — коэффициент линейной регрессии;  $t$  — годы;  $\bar{x}$  — среднеарифметический прирост на ПП,  $\psi(x) = R_2[(t - 2004)^2 - 6,667]$  — поправочный член;  $R_2$  — коэффициент при поправочном члене).

Обработка данных, отражающих состояние хвоинок, производилась с помощью логистической кривой с использованием уравнения

$$y = \frac{A - a_0}{1 + \exp(\alpha + \beta \cdot x)},$$

где  $y$  — соответствующий безразмерный показатель;  $A$  и  $a_0$  — максимальный и минимальный уровень логистической кривой;  $\alpha$  и  $\beta$  коэффициенты;  $x$  — расстояние до труб комбината, км.

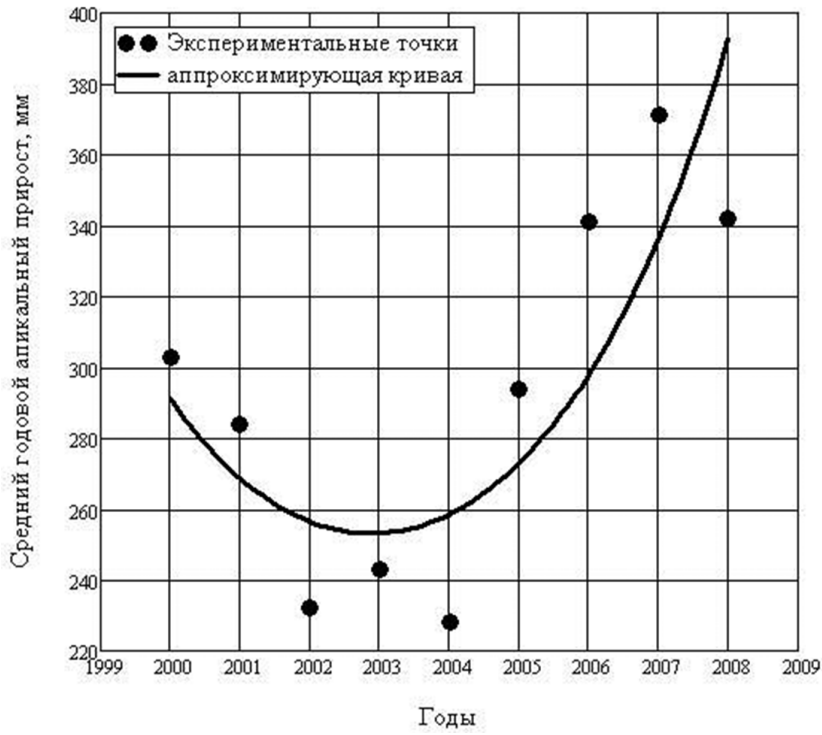
Критические точки кривой искались с помощью системы трех уравнений:

$$x_{\text{в}} = \frac{-\alpha + \ln(2 - \sqrt{3})}{\beta}, \quad x_{\text{с}} = -\frac{\alpha}{\beta}, \quad x_{\text{н}} = \frac{-\alpha + \ln(2 + \sqrt{3})}{\beta},$$

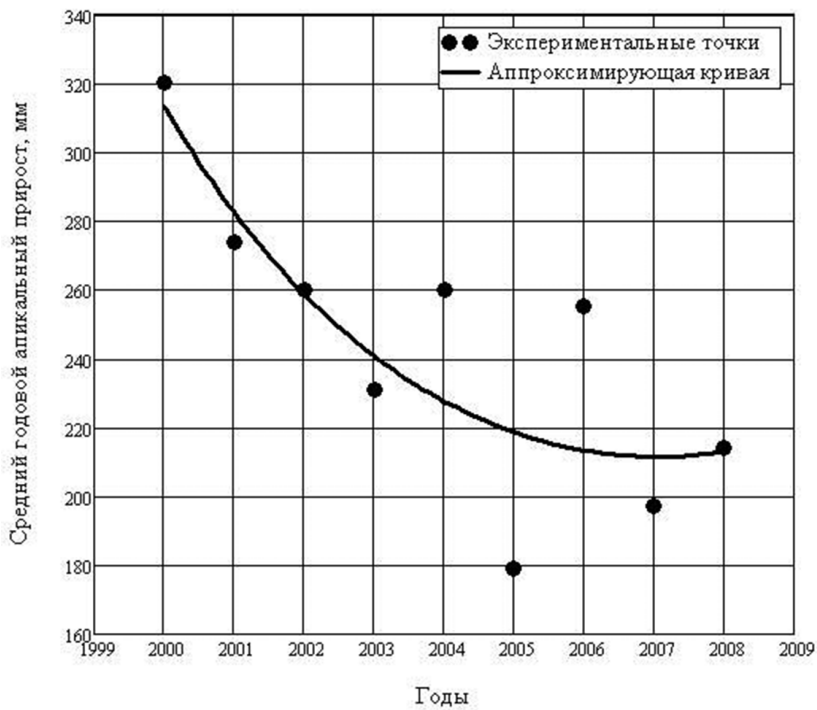
где  $x_{\text{в}}$ ,  $x_{\text{с}}$ ,  $x_{\text{н}}$  — верхнее (максимальное), среднее (точка перелома) и нижнее (минимальное) значение логистической функции [3].

**Результаты и обсуждение.** В результате исследования было установлено сильное воздействие комбината на состояние соснового древостоя, которое отразилось на всех изучаемых показателях. Так, средний годовой апикальный прирост сосен, произрастающих на расстоянии 3–6 км от источника аэротехногенного воздействия, зависел только от валовых годовых атмосферных выбросов. На рис. 1 дано графическое изображение динамики апикального прироста. Здесь четко виден минимум, связанный с увеличением производительности комбината, продолжавшимся вплоть до 2003 г. В этом году комбинат ввел в эксплуатацию мокрую очистку отходящих газов, позволяющую снизить выбросы тяжелых металлов и сернистого ангидрида в атмосферу, что немедленно отразилось на приросте. Такой же минимум прироста, приходящийся на 2003 г., характерен для всех ближних ПП (ЮВ-3, ЮВ-6, СЗ-3).

На остальных трех пробных площадях наблюдается иная динамика, без выраженного минимума. Так, на ЮВ-12 наблюдается спад изучаемого показателя. Для СВ-9 характерно его увеличение, а на СВ-6 апикальный прирост практически остается неизменным. Графики трендов для этих площадей представлены на рис. 2–4.



**Рис. 1.** Динамика апикального прироста сосны, ЮВ-6



**Рис. 2.** Динамика апикального прироста сосны, ЮВ-12

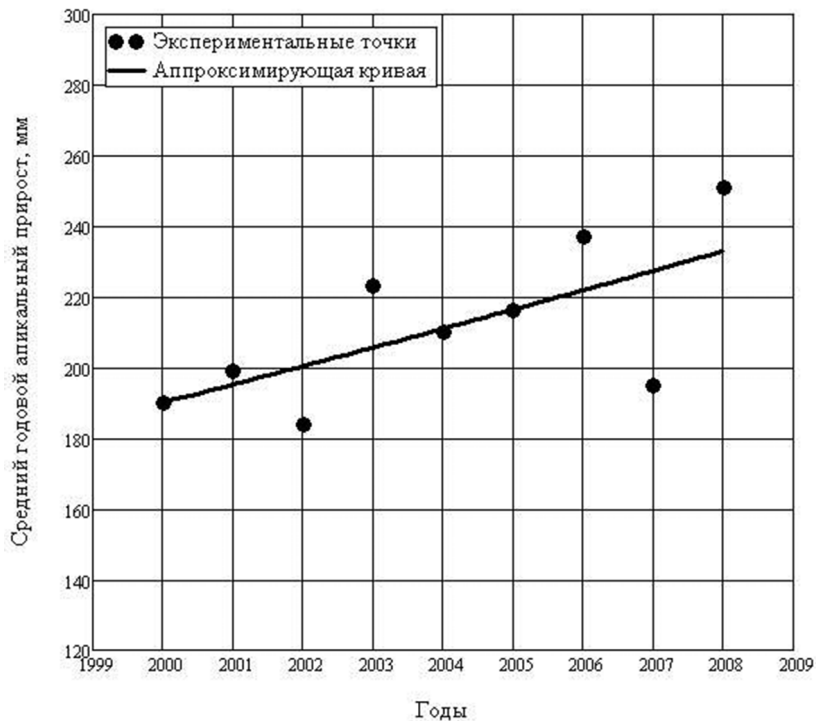


Рис. 3. Динамика апикального прироста сосны, СВ-12

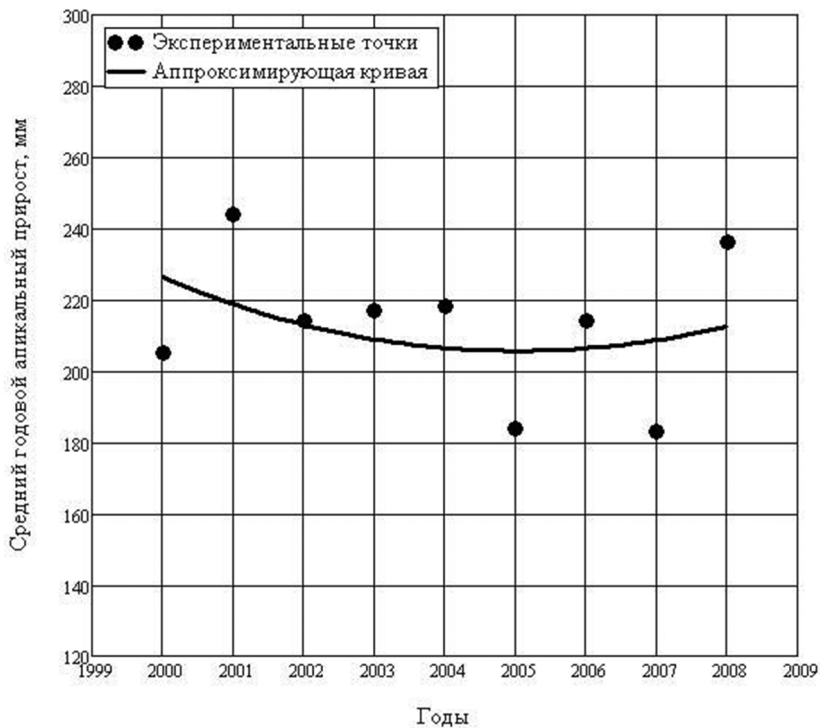


Рис. 4. Динамика апикального прироста сосны, СВ-6

Особенность поведения прироста на ЮВ-12, по-видимому, связана с тем, что сосны, произрастающие на этой площади, входят в состав довольно хорошо развитого растительного сообщества. Падение этого показателя непосредственно связано с увеличением производительности комбината. Однако после снижения нагрузки следует не его увеличение, а колебания возле кривой тренда, что можно объяснить инертностью фитоценотического комплекса. Последнее связано с тем, что тяжелые металлы, поступившие в биогеоценозы, не могут быть выведены из них сразу. Будучи закрепленными в почвенном комплексе, поллютанты продолжают воздействовать на прирост сосны, снижая его. С другой стороны, благодаря сниженной аэротехногенной нагрузке природно-климатические факторы также приобретают статус значимых и также влияют на величину прироста. Такое предположение хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными, если иметь в виду, что снижение изучаемого показателя связано не только с поступлением поллютантов в почву, но и с непосредственным воздействием тяжелых металлов и, главное, сернистого ангидрида, непосредственно на хвою. Похожая картина смены ведущих факторов с аэротехногенных на природно-климатические наблюдаются и для радиального прироста сосен на этой же территории [6].

Малое изменение изучаемого показателя на СВ-12 объясняется практически полным отсутствием отрицательного воздействия медеплавильного комбината на эту площадь. Действительно, здесь наблюдаются наиболее развитые фитоценозы. Ярусная и парцеллярная структура травяно-кустарничковых сообществ на этой территории выражено наиболее сильно по сравнению с другими ПП. Сравнительно низкий апикальный прирост объясняется затенением, создаваемым верхним березовым ярусом древостоя, а также конкурентным прессингом со стороны другой растительности.

Что касается ПП СВ-6, то здесь слабая реакция и низкие значения прироста соснового древостоя могут быть объяснены близостью (3 км от медеплавильного предприятия) отвалов пустой породы, которые могут загрязнять грунтовые воды тяжелыми металлами и сильно влиять на показатели сохранности фитоценозов, в том числе и на прирост сосны. Наличие этих отвалов может объяснить также полное отсутствие сосны на ПП СВ-3, несмотря на тот факт, что данная площадь расположена на северо-восточной трансекте и находится с наветренной стороны от комбината.

Таким образом, характер динамики апикального прироста сосны обыкновенной зависит по меньшей мере от двух основных факторов: направления и расстояния ПП до источника воздействия и состояния фитоценотического сообщества. Это означает, что чем дальше расположена изучаемая площадь и чем лучше на ней развиты растительные сообщества, тем наблюдаемая связь между апикальным приростом сосны и годовыми валовыми атмосферными выбросами слабее. Наибольшей чувствительностью к аэротехногенным выбросам, поэтому, обладают сосны, произрастающие на ближних площадях.

В результате проведенной работы было установлено, что все исследованные параметры отражают отрицательное антропогенное воздействие источника вы-

бросов. Оно выражается в положительной корреляции с расстоянием до труб комбината. Ее величина зависит как от изучаемого показателя, так и от направления. При этом наибольшей чувствительностью к выбросам комбината обладает длина хвоинок (рис. 5).

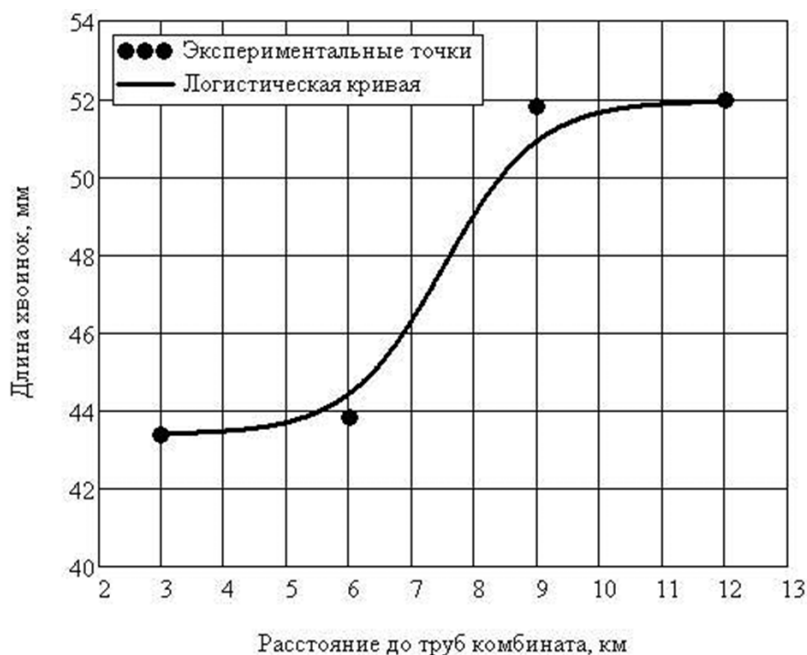


Рис. 5. Зависимость длины хвоинок от расстояния до труб комбината

На основе полученных показателей был рассчитан интегральный коэффициент сохранности (ИКС<sub>хв</sub>) по следующей формуле:

$$\text{ИКС}_{\text{хв}} = \frac{N + B + L}{3}, \%$$

где  $N$  — отношение числа смоляных ходов к их максимально обнаруженному значению, %;  $B$  — то же для сохранности хвоинок в баллах по Шуберту, %;  $L$  — то же для их длины, %.

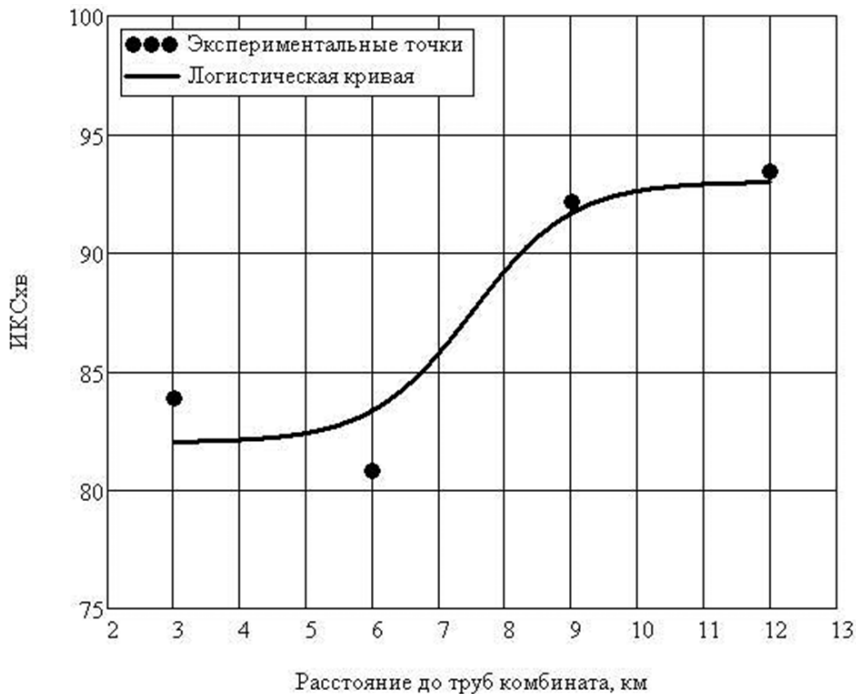
Полученный график зависимости коэффициента сохранности от расстояния до комбината представлен на рис. 6. Как видно, обе кривые ведут себя аналогично и на обеих в промежутке от 6 до 9 км наблюдается быстрый спад изучаемых показателей. Такое поведение характерно для большинства величин, отражающих степень сохранности всех ключевых звеньев биогеоценозов [8; 10].

Более того, изменение показателей фитоценозов на изучаемой территории происходит более или менее синхронно, при этом «начало» быстрых изменений приурочено к 8–9 км, их «конец» к 5–6 км от аэротехногенного источника воздействия [8].

Эта синхронность в первую очередь объясняется глубокой перестройкой структуры почвенного биотического комплекса, в особенности, почвенных беспозво-



ночных [8], что резко замедляет процесс деструкции органических соединений и, как следствие, отражается на минеральном питании растительности. Например, дождевые черви и энхитреиды выпадают из сообществ уже на 9 км и именно здесь начинается быстрый спад всех показателей сохранности фитоценозов, в том числе и ИКС<sub>хв</sub>. Кроме того, корневые волоски, отвечающие за поглощение воды и минеральных веществ из почвенных растворов, у сосны расположены в верхних органогенных слоях почвы [2]. Это сближает ее с травянистой растительностью и дополнительно объясняет обнаруженную синхронность



**Рис. 6.** Зависимость ИКС<sub>хв</sub> от расстояния до труб комбината

Другая причина снижения изучаемых показателей сохранности хвоинок связана с тем, что в условиях аэротехногенного загрязнения толщина кутикулы и эпидермиса снижается [9]. Это вызывает ухудшение их резистентности благодаря тому, что ионы тяжелых металлов легче проникают в листовую пластинку. Последние сильно замедляют рост и деление клеток, а также подавляют синтез молекулы АТФ [4; 12]. Кроме того, уменьшение толщины эпикутикулярного воска, возможно, приводит к увеличению концентрации кислорода в тканях листа, что в свою очередь отражается на фотосинтезе. Это связано с тем, что в аэробных условиях молекула рибулозобисфосфата — промежуточный продукт цикла Кальвина, — превращается в молекулы фосфоглицерата, идущего на синтез глюкозы и фосфогликолевой кислоты, окисляющейся до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  при фотодыхании. Поэтому при повышении концентрации молекулярного кислорода, интенсивность фотосинтеза может снизиться.

**Выводы.** Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено следующее:

- средний годовой апикальный прирост сосен зависит от валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;
- наибольшей чувствительностью к аэротехногенному воздействию обладает сосновый древостой, произрастающий на ближних ПП (3–6 км от медеплавильного предприятия);
- характер динамики апикального прироста определяется, по меньшей мере, двумя факторами: природно-климатическим комплексом и антропогенным воздействием;
- состояние хвоинок сосны, выраженный в виде ИКС<sub>хв</sub>, снижается при приближении к источнику аэротехногенных выбросов;
- наблюдается наличие быстрого спада этого коэффициента, «начало» которого приходится на 9 км, «конец» на 6 км;
- изменение ИКС<sub>хв</sub> происходит синхронно с показателями сохранности фитоценозов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Агиков И.Н., Степанов А.М. Исследование воздействия атмосферных выбросов комбината ЗАО «Карабашмедь» на лесные экосистемы. Экосистемы Центральной Азии: исследования, проблемы охраны и природопользования: материалы IX убсу-нурского международного симпозиума. Кызыл: Тываполиграф, 2008. С. 205–208.
- [2] Веселкин Д.В. Распределение тонких корней хвойных деревьев по почвенному профилю в условиях загрязнения выбросами медеплавильного производства // Экология. 2002. № 4. С. 250–253.
- [3] Воробейчик Е.Л. Реакция почвенной биоты лесных экосистем Среднего Урала на выбросы медеплавильных комбинатов: автореферат дисс. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 1995.
- [4] Иванова А.А., Великова В.К. Биоиндикация на стресс *Betula pendula* Roth в условиях антропогенного загрязнения // Физиология растений. 1990. Т. 16. № 3. С. 76–82.
- [5] Колесников Б.П. Очерк растительности Челябинской области в связи с ее геоботаническим районированием. Флора и лесная растительность Ильменского государственного заповедника имени В.И. Ленина. Труды заповедника. Свердловск. 1961. Вып. VIII. С. 105–129.
- [6] Кучеров С.Е., Мулдашев А.А. Радиальный прирост сосны обыкновенной в районе Карабашского медеплавильного комбината // Лесоведение. 2003. № 2. С. 43–49.
- [7] Макунина Г.С. Геоэкологические особенности карабашской техногенной аномалии. Геоэкология. Инженерная геология // Гидрогеология. Геокриология. 2001. № 3. С. 221–226.
- [8] Степанов А.М. и др. Комплексная экологическая оценка техногенного воздействия на экосистемы южной тайги. М.: ЦЕПЛ, 1992.
- [9] Федорков А.Л. Изменчивость признаков анатомического строения хвои сосны и ее устойчивость к техногенному и климатическому стрессу // Экология. 2002. № 1. С. 70–72.
- [10] Черненкова А.Л. и др. Воздействие металлургических производств на лесные экосистемы Кольского полуострова. СПб, 1995.
- [11] Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень) / Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов. Екатеринбург: Уфа: Наука, 1994.
- [12] Lambers H., Poorter H. Inherent variation in growth rate between higher plants: A search for physiological causes and ecological consequences // Advances in ecological research. L.: Acad. Press. 1992. V. 23. P. 188–242.

## THE INDICATION OF COPPER SMELT EMISSIONS INFLUENCE ON SCOTCH PINE (SOUTH URAL)

I.N. Agikov

National University of Science and Technology "MISIS"  
*Leningradsky prospekt 4, Moscow, Russia, 119991*

The influence of smelt copper emissions on Scotch pine apical growth, length and integrity of needles, resins duct number has been studied. It has been determinate that Scotch pine apical growth depends on copper smelt emissions and needle length depends on distance from copper smelt up to nine kilometers.

**Key words:** Scotch pine, apical growth, resin ducts number, needle length, needle integrity.

### REFERENCES

- [1] Agikov I.N., Stepanov A.M. Issledovanie vozdeystviya atmosferynyh vybrosov kombinata ZAO «Karabashmed» na lesnye jekosistemy. [Investigation of atmospheric emissions of the plant «Karabashmed» on forest ecosystems.] *Jekosistemy Central'noj Azii: issledovaniya, problemy ohrany i prirodopol'zovaniya. Materialy IX ubsu-nurskogo mezhdunarodnogo simpoziuma.* [Ecosystems of Central Asia: research, conservation and wildlife issues. Materials IX Uvs Nurskoy international symposium.]. Kyzyl: GUP «Tyvapoligraf», 2008. pp. 205–208.
- [2] Veselkin D.V. Raspreделение tonkih kornej hvoynyh derev'ev po pochvennomu profilju v uslovijah zagryaznenija vybrosami medeplavil'nogo proizvodstva. [Distribution of fine roots of coniferous trees in the soil profile in terms of pollution emissions copper smelting production]. *Jekologija.* [Ecology] 2002. № 4. pp. 250–253.
- [3] Vorobejchik E.L. Reakcija pochvennoj bioty lesnyh jekosistem Srednego Urala na vybrosy medeplavil'nyh kombinatov. [Soil biota reaction of forest ecosystems in the Middle Ural copper smelter emissions]. *Avtoreferat dis. na soisk uch. st. kand. biol. nauk.* [Abstract of thesis Dr. biol. sci.]. Ekaterinburg, 1995. 24. P.
- [4] Ivanova A.A., Velikova V.K. Bioindikacija na stress Betula pendula Roth v uslovijah antropogennoho zagryaznenija. [Bioindication stress Betula pendula Roth in conditions of anthropogenic pollution]. *Fiziologija rastenij* [Plant Physiology]. 1990, v. 16, № 3, pp. 76–82.
- [5] Kolesnikov B.P. Oчерk rastitel'nosti Cheljabinskoj oblasti v svjazi s ee geobotanicheskim rajonirovanijem [Chelyabinsk Region Outline of vegetation due to its geo-botanical zoning.]. *Flora i lesnaja rastitel'nost' Il'menskogo gosudarstvennogo zapovednika imeni V.I. Lenina. Trudy zapovednika* [Flora and forest vegetation Ilmen State Reserve named after VI Lenin. Proceedings of the reserve]. Sverdlovsk, 1961, Vol. VIII, pp. 105–129.
- [6] Kucherov S.E., Muldashev A.A. Radial'nyj prirost sosny obyknovennoj v rajone Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata. [Radial growth of Scots pine near the Karabash copper smelting plant.]. *Lesovedenie.* [Forest Science] 2003. № 2. c. 43–49.
- [7] Makunina G.S. Geojekologicheskie osobennosti karabashskoj tehnogennoj anomalii. [Geoecological features Karabashsky technogenic anomalies.]. *Geojekologija. Inzhenernaja geologija. Hidrogeologija. Geokriologija.* [Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology]. 2001. № 3. c. 221–226.
- [8] Stepanov A.M. Kompleksnaja jekologicheskaja ocenka tehnogennoho vozdeystviya na jekosistemy juzhnoj tajgi. [Integrated ecological assessment of anthropogenic impact on the ecosystem of the southern taiga]. M.: CEPL [Center for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences], 1992.

- [9] Fedorkov A.L. *Izmenchivost' priznakov anatomicheskogo stroenija hvoi sosny i ee ustojchivost' k tehnogennomu i klimaticheskomu stressu.* [Variability of the anatomical structure of pine needles and its resistance to anthropogenic and climatic stress]. *Jekologija.* [Ecology.]. 2002. № 1. pp. 70–72.
- [10] Chernen'kova A.L. i dr. *Vozdejstvie metallurgicheskikh proizvodstv na lesnye jekosistemy Kol'skogo poluostrova.* [Effects of metallurgical production on forest ecosystems of the Kola Peninsula]. Saint Petersburg, 1995.
- [11] *Jekologicheskoe normirovanie tehnogennyh zagrijaznenij nazemnyh jekosistem (lokal'nyj uroven').* [Environmental regulation of technogenic pollution of terrestrial ecosystems (local level)] / E.L. Vorobjchik, O.F. Sadykov, M.G. Farafontov. Ekaterinburg: Ufa «Nauka» [«Science»]. 1994.
- [12] Lambers H., Poorter H. *Inherent variation in growth rate between higher plants: A search for physiological causes and ecological consequences.* *Advances in ecological research.* L.: Acad. Press. 1992. V. 23. P. 188.