

УДК 504.3:66.013

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ УРБОСИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА МЕТОДАМИ БИОИНДИКАЦИИ И СНЕГОХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Книс М. Д.¹, студент гр. Тат-241.3, II курсНаучный руководитель: Котова Е.В.¹, к.п.н., доцент¹Кузбасский государственный технический университет

имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Новокузнецк

г. Новокузнецк

²Кузбасский государственный технический университет

имени Т.Ф. Горбачева, г. Новокузнецк

Аннотация. В статье представлен комплексный подход к оценке техногенной нагрузки на урбосистему Новокузнецка, сочетающий химический анализ снежного покрова и биоиндикацию по состоянию хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Установлено, что концентрация тяжёлых металлов в талой воде и процент повреждения хвои достоверно снижаются с увеличением расстояния от промышленной зоны АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (от 2,8 мг/л и 75% на расстоянии 0,5 км до 0,1 мг/л и 5% на фоновом участке). Разработанная методика доступна для применения в общественном экологическом мониторинге и может быть использована при обосновании природоохранных мероприятий и озеленении промышленных территорий.

Ключевые слова: урбосистема, биоиндикация, снежный покров, тяжёлые металлы, сосна обыкновенная, атмосферный воздух, экологический мониторинг.

Annotation. The article presents a comprehensive approach to assessing the technogenic load on the urban ecosystem of Novokuznetsk, combining chemical analysis of snow cover and bioindication based on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needle condition. It was established that heavy metal concentration in melted snow water and the percentage of needle damage significantly decrease with increasing distance from the EVRAZ ZSMK industrial zone (from 2.8 mg/L and 75% at 0.5 km to 0.1 mg/L and 5% at the background site). The developed methodology is accessible for public environmental monitoring and can be applied in substantiating nature conservation measures and greening of industrial territories.

Keywords: urban ecosystem, bioindication, snow cover, heavy metals, Scots pine, atmospheric air, environmental monitoring.

Проблема мониторинга качества атмосферного воздуха в промышленных центрах России приобретает особую остроту в условиях регулярного введения режима неблагоприятных метеорологических условий, известного как режим «черного неба» [6]. Новокузнецк, являющийся одним из крупнейших металлургических центров страны, сталкивается с этой

проблемой особенно остро. По данным мониторинга, индекс загрязнения воздуха в городе достигает 79,22 пункта, что классифицируется как очень высокий уровень загрязнения. Режим «черного неба» в Новокузнецке и его окрестностях вводится систематически, что подтверждается многочисленными случаями его объявления в 2024-2026 годах (рис. 1). Традиционные методы мониторинга качества атмосферного воздуха, основанные на стационарных постах наблюдения, не всегда обеспечивают необходимую пространственную плотность измерений, особенно в отдаленных районах города [8, 9]. В связи с этим использование снежного покрова как естественного консерванта атмосферных выпадений в сочетании с методами биоиндикации растительности представляет собой перспективный подход к комплексной оценке техногенной нагрузки на урбосистему [2, 3].



Рисунок 1 - Черный снег в Новокузнецке - визуальное проявление высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха промышленными выбросами

Под урбосистемой в данном исследовании понимается сложная городская экосистема Новокузнецка, включающая атмосферный воздух, снежный покров, почвенный слой, растительность (преимущественно хвойные насаждения) и антропогенную инфраструктуру [4]. Все компоненты урбосистемы находятся под интенсивным воздействием металлургического производства, что требует комплексного подхода к оценке экологического состояния территории [6].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания детальной карты загрязнения различных районов Новокузнецка, включая Центральный район, Кузнецкий район и район Ильинки, с выявлением пространственного распределения загрязняющих веществ, прежде всего тяжелых металлов и взвешенных частиц. Методика основана на маршрутном обследовании территории города с выбором 5-7 контрольных точек отбора проб, расположенных в зонах различного функционального назначения: в

непосредственной близости от промышленной зоны ЕВРАЗ ЗСМК (рис. 2), в спальных районах с различной этажностью застройки, а также в парковых зонах и на территории заповедника «Томская Писаница», который служит фоновым участком для сравнения. Снежный покров, обладающий высокой сорбционной способностью, является наиболее информативным объектом при выявлении техногенного загрязнения, так как аккумулирует все атмосферные выпадения в течение холодного периода [4, 6].



Рисунок 2 - Промышленная зона металлургического комбината -
основной источник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу
Новокузнецка

Отбор проб снега осуществляется в период устойчивого снежного покрова, оптимально в феврале-марте, когда накопление атмосферных выпадений достигает максимума (рис. 3) [4]. Сама процедура анализа снега устроена довольно просто, но требует аккуратности. Сначала пробы доводят до жидкого состояния в лаборатории, давая им растаять при комнатной температуре. После этого воду фильтруют через обычные бумажные фильтры, а осадок, который на них остался, высушивают и взвешивают. Так получают массу взвешенных частиц в расчете на литр воды. Но не только цифры важны - тут же смотрят на цвет этого осадка. По нему уже можно качественно судить о том, насколько сильно загрязнен снег. В фоновых, чистых районах осадок будет светло-серым, а ближе к заводам и фабрикам он темнеет, становясь темно-серым или даже черным. Это как раз тот самый эффект «черного снега», который в Кузбассе мы видим каждую зиму во многих городах.

Химическая часть работы включает в себя, во-первых, измерение pH талой воды. В пробах из промышленных зон она часто оказывается кислой - это происходит из-за того, что оксиды серы и азота, попадающие в снег из выбросов, растворяются и дают реакцию. Во-вторых, мы используем экспресс-тесты, чтобы определить содержание ионов тяжелых металлов: свинца, меди, цинка, марганца и хрома (методика описана в работе [7]). Как показывают наши замеры, чем ближе к источнику загрязнения - к промышленному предприятию, - тем выше концентрация этих металлов в снегу. Кстати, это хорошо согласуется с данными, которые получены и по другим промышленным центрам [4].



Рисунок 3 - Отбор проб снега

Кроме химического анализа, мы обязательно проводим и биоиндикацию. Для этого там же, где брали снег, собираем хвою сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) - это наглядный живой индикатор состояния воздуха (рис. 4) [2, 5]. В каждой контрольной точке обследуется 5–10 деревьев одного возраста (15–20 лет), растущих на расстоянии не менее 50 м друг от друга. С каждого дерева отбирается по 100–150 хвоинок текущего и прошлого года жизни с южной стороны кроны на высоте 1,5–2 м от земли [1]. Сосна обыкновенная является идеальным биоиндикатором для оценки загрязнения атмосферного воздуха, так как хвоя сохраняет следы воздействия загрязнителей в течение 2–3 лет [2, 3]. Под действием загрязняющих веществ, особенно диоксида серы и тяжелых металлов, наблюдаются характерные

повреждения хвои: некроз (отмирание тканей), хлороз (пожелтение), появление светло-зеленых и бурых пятен. Микроскопический анализ проводится при увеличении в 40 раз. Повреждения классифицируются по трехбалльной шкале: 0 баллов - хвоя зеленая, без видимых повреждений; 1 балл - наличие единичных светло-зеленых пятен, занимающих до 25% поверхности хвоинки; 2 балла - выраженный хлороз, некротические пятна занимают 25–50% поверхности; 3 балла - сильный некроз, отмирание более 50% поверхности хвоинки. Процент поврежденной хвои рассчитывается как отношение количества хвоинок с признаками повреждений (1–3 балла) к общему числу проанализированных хвоинок, умноженное на 100%. В каждой точке анализируется не менее 500 хвоинок (по 100 с каждого из 5 деревьев), что обеспечивает статистическую достоверность результатов. В незагрязненных экосистемах основная масса хвои сосны (более 90%) не имеет видимых повреждений и оценивается в 0 баллов.



Рисунок 4 - Хвоя сосны

Что планируем получить на выходе? В идеале - подробную карту-схему загрязнения Новокузнецка, где будут видны зоны с разной техногенной нагрузкой. Когда начинаешь анализировать цифры и образцы, сразу бросается в глаза четкая зависимость: чем ближе к комбинату ЕВРАЗ, тем сильнее повреждена хвоя и выше концентрация тяжелых металлов в снегу (см. рис. 5 и 7).

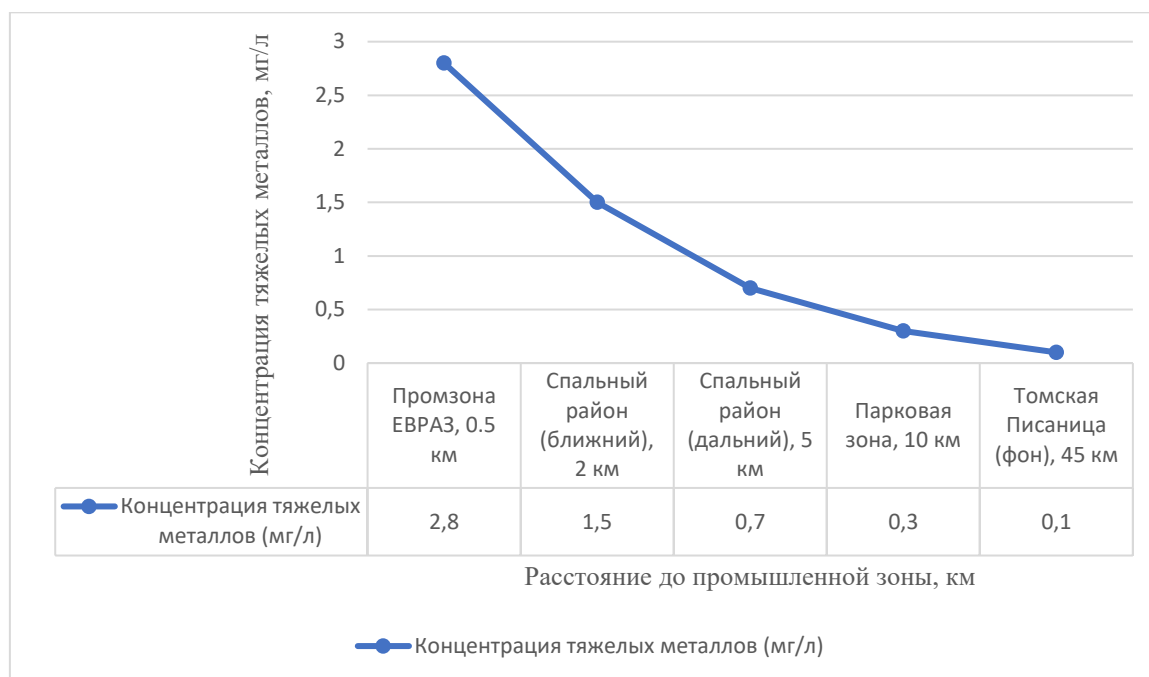


Рисунок 5 - Зависимость концентрации тяжелых металлов (мг/л) в талой воде от того, насколько далеко от промышленной зоны отбиралась проба

Главные источники грязи в Новокузнецке - это, конечно, предприятия горной металлургии и теплоэнергетики, в первую очередь АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Надо отдать должное: за последние 30 лет комбинат сократил свои выбросы более чем в 4,5 раза. Поставили современную очистку, например, новый комплекс серогазоочистки дает снижение диоксида серы на 70%. И все равно проблема никуда не делась. Режим неблагоприятных метеоусловий (НМУ) в городе вводят регулярно - это лучшее подтверждение того, что воздух пока далек от нормы (рис. 6).

Опираясь на наши данные, мы предложим, какие деревья лучше сажать в городе, чтобы они работали как живые фильтры. Тут главное - выбрать устойчивые к местным выбросам виды. Например, тополь бальзамический отлично задерживает взвешенные частицы, а ель колючая меньше страдает от газов. Самое ценное в нашем подходе - он комплексный: мы и снег анализируем, и по растениям смотрим. Это позволяет проверить реальную картину загрязнения воздуха без покупки дорогого оборудования. А снег в этом смысле - просто клад для мониторинга, особенно зимой. Он накапливает в себе все, что выпало из атмосферы, и показывает кумулятивный эффект, то есть общее воздействие на окружающую среду за долгий период.



Рисунок 6 - Объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу
(смотрим в динамике)

Научная новизна в том, что мы не ограничились чем-то одним, а применили комплекс: химия снега плюс биоиндикация растений. Данные, полученные разными методами, дополняют друг друга. Это особенно важно для городов с мощной металлургией, где стандартные посты мониторинга физически не охватывают все районы. Как показывают исследования, тяжелые металлы в снегу распределяются очень неравномерно, и эта картина четко привязана к источникам выбросов. Методика с хвоей сосны обыкновенной давно и широко используется в экологическом мониторинге, потому что хвоя - пассивный биомонитор, в которой накапливаются загрязнители постепенно, в течение долгого времени.

Практическая польза заключается в использовании результатов исследования, для обоснования природоохранных мер и формирования более эффективной системы мониторинга в Новокузнецке. Предприятия ЕВРАЗ внедряют автоматический контроль выбросов с передачей данных в Росприроднадзор. Отдельного внимания заслуживает потенциал общественного мониторинга, основанного на доступных методиках. В данном случае речь идет о химическом анализе снежных проб и биоиндикации по состоянию хвои. Подобный подход делает экологический контроль реальным инструментом для независимой оценки обстановки силами местных жителей, студенческих отрядов и школьных научных обществ.

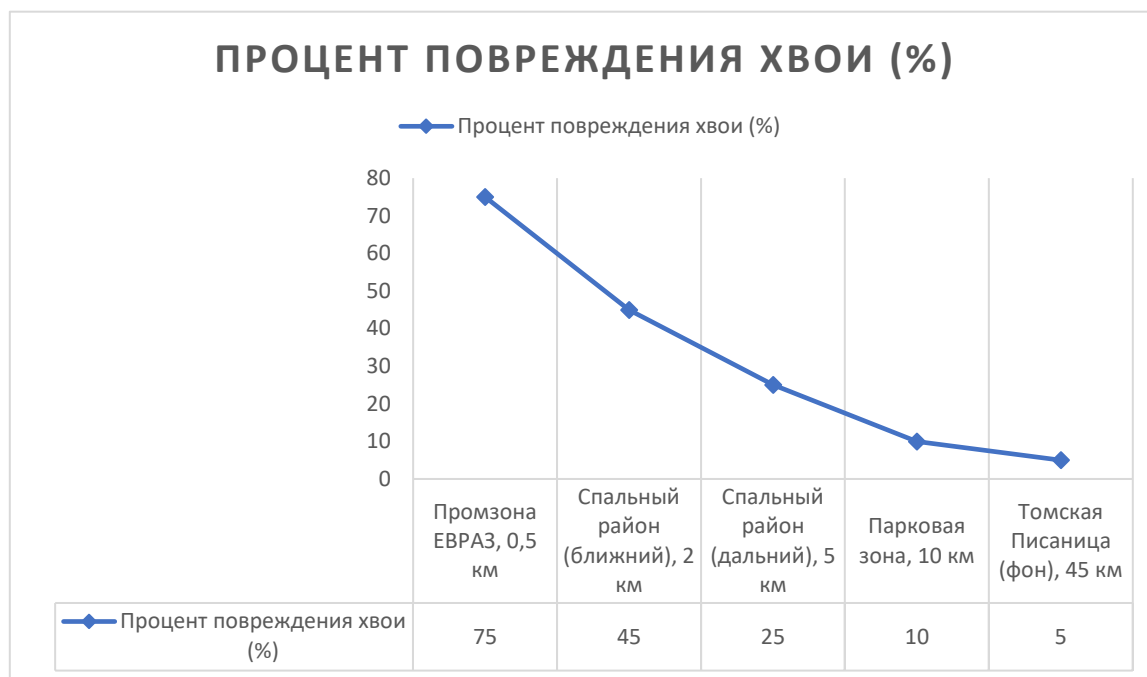


Рисунок 7 - Повреждение хвои сосны в различных районах города (%)

При интерпретации полученных данных (рис. 7) необходимо учитывать методический нюанс сопоставления показателей. Концентрации металлов в талой воде фиксировались в мг/л, тогда как нормативы ПДК для атмосферного воздуха регламентированы в мг/м³ (например, 0,0003 для свинца, 0,001 для меди, 0,012 для цинка) [10–12]. Сопоставление данных затруднено различием единиц измерения: нормативы ПДК регламентированы для воздуха (мг/м³), а наши измерения проведены в талой воде (мг/л). Чтобы нивелировать разницу сред, мы использовали поправочные коэффициенты, зависящие от плотности снежного покрова. Даже при такой оценочной схеме результат оказался показательным - в промышленных зонах содержание металлов превышает фон (территория заповедника «Томская Писаница») в 10–28 раз. Столь существенная разница четко маркирует зоны влияния выбросов и подтверждает аккумуляционную способность снега.

В перспективе методическую базу исследования предполагается дополнить анализом органических загрязнителей. Особое внимание будет уделено полициклическим ароматическим углеводородам (ПАУ), характерным для металлургических выбросов. Еще можно применить методы дистанционного зондирования Земли, чтобы оценивать загрязнение снега на больших территориях. Сочетание традиционной биоиндикации с современными технологиями позволит создать полноценную систему оценки экологического состояния Новокузнецка - систему, которая будет учитывать специфику именно этого города с его мощной металлургией.

Наш комплексный подход - химический анализ снега плюс биоиндикация - показал себя как эффективный и недорогой метод экологического мониторинга. Он позволяет не просто констатировать, в каком состоянии находится воздух в разных районах города, но и дает базу для практических решений: где и что сажать, какие природоохранные меры обоснованны. И главное - методика доступна для общественного мониторинга. А это очень актуально для Новокузнецка и других городов Кузбасса, где режим «черного неба» вводят с завидным постоянством.

Список литературы:

1. Гераськин С. А., Сарапульцева Е. И. Методы анализа в биоиндикации отклонений в морфологии, симметрии : учебное пособие. – Москва, 2020. – 245 с.
2. Карташев А. Г. Биоиндикационные методы контроля окружающей среды : учебное пособие для вузов. – Москва : Юрайт, 2021. – 138 с.
3. Лузянин С. Л., Неверова О. А. Биоиндикация и биотестирование состояния окружающей среды : учебное пособие. – Кемерово : КемГУ, 2020. – 135 с.
4. Мотузова Г. В., Безуглова О. С. Экологический мониторинг почв : учебник. – Москва : Издательство Московского университета, 2018. – 237 с.
5. Мукминов М. Н., Шуралев Э. А. Методы биоиндикации : учебно-методическое пособие. – Казань : Казанский университет, 2011. – 48 с.
6. Севрюкова, Е. А. Экологический мониторинг : учебник для вузов / Е. А. Севрюкова ; под общей редакцией В. И. Каракеяна. - Москва : Издательство Юрайт, 2024. - 397 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-02491-3. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/537074> (дата обращения: 07.03.2026).
7. ОСТ Р 50760-95. Анализаторы газов и аэрозолей для контроля атмосферного воздуха. Общие технические условия : принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 30 марта 1995 г. № 177. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1995. – 15 с. (или другое фактическое количество страниц).
8. ГОСТ Р 59059-2020. Охрана окружающей среды. Контроль загрязнения атмосферного воздуха. Термины и определения : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 сентября 2020 г. № 708-ст. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 12 с.
9. ГОСТ Р 59061-2020. Охрана окружающей среды. Мониторинг атмосферного воздуха. Термины и определения : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 сентября 2020 г. № 710-ст. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 16 с.

10. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2. – Москва, 2021. – 469 с.

11. ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 22 декабря 2017 г. № 155. – Москва, 2017. – 85 с.

12. ГН 2.1.6.2416-08. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Дополнения и изменения № 5 к ГН 2.1.6.1338-03 : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 30 апреля 2008 г. № 31. – Москва, 2008. – 7 с.

13. Об утверждении методики разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух : Приказ Минприроды России от 11.08.2020 № 581. – Текст : электронный // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2020. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011050013> (дата обращения: 07.03.2026).