

## ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ГОРОДСКИХ ОСОБО-ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

О. В. БЕДНОВА, доц. каф. экологии и защиты леса МГУЛ, канд. биол. наук,

В.А. КУЗНЕЦОВ, проф. каф. ЮНЕСКО «Зелёная химия для устойчивого развития» РХТУ  
им. Д.И. Менделеева, д-р техн. наук

Ю.Ю. АНДРЮШИН, Высший колледж природопользования при РХТУ им. Д.И. Менделеева  
[caf-ecology@mgul.ac.ru](mailto:caf-ecology@mgul.ac.ru), [vakus@inbox.ru](mailto:vakus@inbox.ru)

Природоохранная, средозащитная и рекреационная функции городских особо охраняемых природных территорий взаимосвязаны и в равной степени важны для современного крупного города. Измерить и оценить успешность выполнения этих функций (а наряду с этим и эффективность управленческих решений в отношении ООПТ) можно на основе показателей биологических сообществ в наложении на результаты мониторинга абиотических сред, т.е. комплексного экологического мониторинга.

При этом актуализируется потребность в обобщении разноплановой экологической информации, получении на основе её обработки многокритериальной оценки состояния экосистем и представлении ее результатов в наиболее информативной форме в адрес лиц, принимающих решения (ЛПР). Однако единой программы комплексного экологического обследования природных участков не существует, под это понятие попадают различные действия по сбору информации о состоянии той или иной территории, проводимые по разным методикам, специалистами разных профилей.

В прикладной экологии объективно имеет место стремление к наиболее детальному описанию сложного экологического объекта (в т.ч. и ООПТ). В результате увеличивается количество учитываемых параметров, расширяются программы мониторинговых исследований, а анализ целостной картины взаимосвязи факторов, обуславливающих формирование негативных биосферных процессов, при этом зачастую усложняется. В итоге, как справедливо отмечено в работе [1], «усугубляется значительный диссонанс между затратами труда учёных-экологов на получение исходных данных и потенциальный объём знаний, которые могут быть выделены на их основе». Преодолеть проблемы позволяют разработка и внедрение в практику системы экологического контроля экологических информационных систем (ЭИС).

Используемые в ЭИС компьютерные технологии дают возможности оперативного доступа к ретроспективным данным, применения методов многомерного математического анализа обширных массивов данных, преобразования первичных результатов наблюдений за биотическими и абиотическими компонентами природной среды в форму, пригодную для поддержки принятия решений. Все эти преимущества важны в сфере организации экологического контроля и ведения экологического мониторинга как его информационной основы.

Об экологическом контроле и мониторинге принято говорить как о природоохранных системах, способствующих устойчивому развитию отдельных регионов и планеты в целом. Поэтому и ЭИС чаще рассматриваются как инструменты комплексного мониторинга в приложении к национальному и региональному уровням [2]. Но руководствуясь принципом экологической иерархии, можно говорить и об ЭИС локального уровня, и ООПТ современного крупного города, в частности, представляются для этого подходящими объектами. Если же рассматривать систему городских ООПТ или даже о городскую экологическую сеть современного мегаполиса [3], то тогда задача сбора, систематизации и использования экологической информации переходит на региональный уровень.

Программное обеспечение в рамках ЭИС для ООПТ должно отличаться удобным простым интерфейсом – она, прежде всего, ориентирована на сотрудников ООПТ. Это биоэкологи и другие специалисты, занятые ведением экологического мониторинга (ответственны за базу данные и ее обновление, а, следовательно, максимально должен быть упрощён способ ввода информации), специалисты по благоустройству, руководители ООПТ, которым нередко необходимо оперативно представить информацию о своей территории в адрес различных хозяйственных структур, проектировщиков.

На основе многолетнего опыта исследований в лесных экосистемах ООПТ города Москвы мы разработали систему информационно-аналитического сопровождения лесоэкологического мониторинга, которая может лечь в основу концепции ЭИС локального уровня. Эта разработка представляется нам актуальной для городов, экологических каркас которых формируют сохранившиеся фрагменты лесных экосистем.

В экоинформационной системе по мере перехода от первичных результатов экологического мониторинга к знаниям о состоянии окружающей среды, меняются методы работы с информацией [2]. Можно выделить три уровня, ориентированных на решение различных задач экологического мониторинга и отличающихся по методам работы с экологической информацией. Верхний уровень составляют программные модули для поддержки принятия решений, средний - программное обеспечение, позволяющее провести системный анализ информации о состоянии окружающей среды, а нижний - модули обработки первичной экологической информации. Рассмотрим, каким образом эту последовательность можно реализовать на основе данных лесоэкологического мониторинга на городских ООПТ.

## I. ПЕРВИЧНАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### 1. Биотическая составляющая лесных экосистем

Основным методом исследования динамики лесных биогеоценозов являются стационарные наблюдения на постоянных пробных площадях. При этом типы и размеры пробных площадей, регламент работы на них определяются особенностями исследуемого объекта, поставленными целями, применяемыми методами исследований. Опытом мониторинга в рекреационных лесах обоснована необходимость при сборе данных объединения методических подходов двух направлений – детального лесопатологического обследования и лесоводственно-геоботанических исследований [4].

Сбор информации о состоянии лесных насаждений целесообразно объединить в следующие блоки

**1. Оценка состояния древостоя** включает сбор данных о структуре древесного полога, характере и темпах древесного отпада и их изменениях во времени. *Структура древостоя* – это дифференциация деревьев по степени жизнеспособности, оцениваемая через соотношение деревьев разных категорий состояния, с указанием их породы, ступеней толщины, пораженности болезнями, поврежденности вредителями и прочими неблагоприятными факторами воздействия. *Категория состояния* каждого отдельного дерева интегрально отражает степень его жизнеспособности через сумму биоморфологических признаков: густота кроны, поврежденность листвы фитофагами и патогенами (филлотрофами), некрозами неинфекционного характера, выраженность дехромаций, размеры листвы, наличие в кроне сухих ветвей. *Пораженность древостоя болезнями и поврежденность вредителями* характеризуется экологической плотностью или встречаемостью вредителя или патогена, и степенью развития очагов вредителей и болезней (как инфекционного, так и неинфекционного характера), она измеряется в относительных или абсолютных единицах

**2. Оценка состояния естественного возобновления и подлесочного яруса** важна для прогноза развития фитоценоза и характера возможных сукцессионных смен. Традиционные при лесоводственно-геоботаническом мониторинге учеты по породному составу, происхождению, группам высот, густоте, приросту необходимо сочетать с детальным обследованием подроста с оценкой растений по категориям состояния и поврежденности (пораженности) фитофагами из числа беспозвоночных и позвоночных животных, болезнями, абиотическими факторами. Периодические учеты такого рода позволяют оценить успешность естественного возобновления, выявить виды, имеющие значение для эндогенных сукцессий лесных сообществ.

**3. Геоботанические описания** – описание травяно-кустарничкового яруса и напочвенного покрова с комбинированной оценкой обливия-покрытия и анализом структуры эколого-фитоценологических групп видов. Использование индикационных свойств этого компонента фитоценоза позволяет охарактеризовать лесотипологические особенности экотопа и оценить степень его рекреационной нарушенности. Наблюдения за изменениями геоботанических характеристик лесного сообщества можно успешно совместить с мониторингом видов растений, имеющих природоохранный статус или претендующих на его присвоение (например, для подготовки региональной Красной книги или других природоохранных кадастров и т.п.)

**4. Оценка структурного разнообразия лесных биогеоценозов** целесообразна на лесных участках городских ООПТ для индикации степени сохранности лесной среды, оценки природоохранной ценности лесных биогеоценозов и эффективности проводимых на территории природоохранных мероприятий [5].

Регулярный мониторинг территории предполагает размещение сети пунктов постоянных наблюдений таким образом, чтобы получить наиболее полную картину пространственно распределённой информации. Поэтому при проектировании мониторинговой сети в условиях городского лесного массива наиболее целесообразен метод послыбно-ландшафтной выборки с максимально равномерным размещением пробных площадей.

## 2. Показатели состояния абиотической среды

Значения параметров абиотической среды в условиях лесного городского массива можно оценивать как с позиций безопасности для лесных биоценозов, так и с позиций санитарно-гигиенического подхода. Последний значим с точки зрения пригодности территории для рекреационного использования.

Наиболее важным экологическим критерием для урбанизированной территории является загрязнение атмосферного воздуха. В условиях московского мегаполиса зоны устойчивого атмосферного неблагоприятия приурочены к автомагистралям (в других городах могут быть очерчены и зоны влияния промышленных предприятий, загрязняющих атмосферу), и вопрос в том, как далеко заходит их влияние вглубь лесных массивов. Поэтому мониторинг предполагает организацию пространственно равномерной сети отбора проб. Однако, в связи с особенностями режима охраны на городских ООПТ, в соответствии с законодательством, ограничена или запрещена организация электрифицированных стационарных постов наблюдения и проведение маршрутных наблюдений с использованием транспортных средств. Сравнительно дешевые способы «пассивной дозиметрии», основанные на естественных процессах «сухого» осаждения примесей из воздуха, позволяют проводить наблюдения на любых участках ООПТ и значительно расширить зону наблюдения за состоянием атмосферного воздуха. В наших исследованиях использовался разработанный в РХТУ имени Д.И. Менделеева метод определения загрязнения воздуха по интенсивности осаждения примесей на искусственную поглощающую поверхность [6]. Данный метод может быть использован для определения средней за период экспозиции

концентрации таких фито токсичных и типичных для многих урбанизированных территорий примесей в воздухе, как оксиды азота, диоксид серы, соединения фтора и хлора.

Для условий московского мегаполиса приоритетным загрязнителем атмосферы является диоксид азота, поэтому в предлагаемой системе сбора экологической информации внимание уделено именно этой примеси в атмосфере. В качестве экологического индикатора целесообразно использовать значение среднесуточной концентрации диоксида азота.

Аналогичен и методический подход к оценке акустической составляющей абиотической среды в границах территории. Знания о локализации зон акустического дискомфорта необходимы, прежде всего, для рациональной организации рекреационного использования территории. В точках отбора проб в качестве параметра состояния акустической среды на территории с помощью шумомера определяли значение эквивалентного уровня звука.

Состояние абиотических компонентов целесообразно определять на ППН и временных пробных площадях по оценке состояния лесных биогеоценозов, а также на дополнительных точках отбора проб с целью наиболее равномерного охвата территории. В наших исследованиях сеть обора проб на обследуемых территориях размещали с таким расчетом, чтобы расстояние между контрольными точками составляло около 50 метров.

Для всех позиций обследования разработаны специальные учётные формы, зафиксированная в них информация вводится в БД в виде электронных таблиц.

В базу данных целесообразно загрузить:

1. Паспорта ППН;
2. Ведомости энтомо-фитопатологического обследования деревьев;
3. Ведомости учёта естественного возобновления;
4. Результаты учёта элементов структурного разнообразия лесных биогеоценозов;
3. Данные химического мониторинга атмосферного воздуха;
4. Данные акустического обследования;
5. Картографические материалы.

## II. СВЁРТЫВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Сложность структуры лесных экосистем, разнообразие антропогенных воздействий на природную среду и полифункциональность лесных экосистем в урбанизированных условиях создают объективные предпосылки необходимости многокритериальной оценки состояния экосистем.

Полученная в результате мониторинга разнообразная экологическая информация нуждается в обобщении. Эту задачу можно решить с помощью специальной процедуры свёртывания информации, предполагающей, что из явно сформулированных критериев осуществляется выбор или конструирование наиболее информативных переменных – индексов. Последние представляют собой результирующие показатели состояния и (или) функционирования экосистемы, интегрируя в своём значении множества параметров. В известной работе [7] рассмотрены формы и методы получения экологических индексов, приведена их классификационная схема индексов состояния экосистемы. В практике мониторинга абиотических сред подобные индексы используются давно, что связано многокомпонентной природой загрязнений. В биоэкологии примером являются индексы видового разнообразия [8].

В работах [5,9,10] обоснованы методики сбора информации, алгоритмы вычисления и приведены результаты применения двух интегральных биотических показателей для лесных экосистем – индекса состояния древостоя и индекса структурного разнообразия. Первый дает представление о жизнеспособности главного компонента лесного сообщества – древостоя и,

соответственно, даёт косвенное представление о биологической продуктивности и экологической ассимилятивной способности исследуемого участка леса. Второй – отражает степень сохранности лесной среды и лесного нативного биоразнообразия. Индексы состояния древостоя и структурного разнообразия мы предлагаем использовать в качестве экологических индикаторов биотического компонента лесных экосистем городских ООПТ в рамках ЭИС.

### III. ИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Индексы и натуральные значения параметров окружающей среды становятся экологическими индикаторами в том случае, когда их значения нормированы, и поэтому для обеспечения поддержки принятия решения необходим этап работы, позволяющий соотнести получаемые результаты со шкалой "хорошо - плохо".

В работах [11,12] обоснована и продемонстрирована возможность индикации состояния биотических и абиотических компонентов экосистем городских лесов с помощью метода функций желательности (МФЖ).

МФЖ является одним из подходов к формализации субъективных неопределенностей в многокритериальных задачах метод построения обобщённой функции желательности (МФЖ), предложенный С. Харрингтоном (1965). Он представляет собой математический инструментарий перевода реальных значений параметров в единую безразмерную числовую шкалу с фиксированными границами от 0 до 1 и последующего отображения частных количественных шкал в обобщённые шкалы критериев качества. Для преобразования частных откликов (рядов наблюдаемых значений параметров) в частные функции желательности используется экспоненциальная зависимость:  $d = \exp(-\exp\{-y'\})$ , где  $y'$  – кодированное значение признака. Она имеет несколько критических точек (ординаты точек перегиба, или базовые точки – в 0,2; 0,37; 0,63; 0,8, что позволяет задавать границы градаций желательности не произвольным, а строгим образом). Это даёт возможность не только оценить абсолютные величины показателей, но и выявить, насколько они близки к области ухудшения, руководствуясь строгими интервальными диапазонами: от 0 до 0,20 («очень плохо»); от 0,20 до 0,37 («плохо»); от 0,37 до 0,63 («удовлетворительно»); от 0,63 до 0,80 («хорошо»); от 0,80 до 1,0 («хорошо»). Задача исследователя в этом случае – выбрать из каждого ряда значений наблюдаемых параметров или индикаторных характеристик по два значения и наилучшим образом подобрать им в соответствие значения из ряда базовых точек функции желательности (желательностей отклика). По этим точкам строятся уравнения частных функций желательности. Затем проводится построение обобщённого отклика, задаваемого как среднее геометрическое частных желательностей  $d_i$ :

$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_i}$$

где  $d_i$  – частная функция желательности ( $i = 1 \div n$ ).

Для обоснования выбора значений биотических индикаторов (таблица 1), соответствующих базовым значениям функции желательности, использованы результаты анализа значений биотических индексов, полученных на основе обработки массива данных специально заложенных постоянных и временных пробных площадей в лесных биогеоценозах в различных типах леса с разной степенью антропогенной трансформации – от заповедных участков до городских парков [12].

В случае с абиотическими индикаторами – среднесуточной концентрацией диоксида азота и значением эквивалентного уровня звука руководствовались утверждёнными санитарно-гигиеническими нормативами [13, 14, 15, 16, 21, 22] и провели анализ опубликованных результатов экспертных исследований в лесных экосистемах в фоновых условиях и в зонах техногенного воздействия [17, 18, 19, 20].

Таблица 1

Базовые значения функций желательности и соответствующие значения натуральных значений критериев

Экологические индикаторы (критерии оптимизации)	Базовые значения функции желательности	Экспертные значения индикаторов
Индекс состояния древостоя	0,8 (хорошо) 0,2 (плохо)	9,0 4,0
Индекс структурного разнообразия	0,8 (хорошо) 0,2 (плохо)	1,85 1,45
Уровень акустического загрязнения, дБА	0,8 (хорошо) 0,2 (плохо)	40 80
Концентрация NO <sub>2</sub> в атмосферном воздухе, мг/м <sup>3</sup>	0,8 (хорошо) 0,2 (плохо)	0,02 0,085

На основе базовых точек были получены уравнения, пользуясь которыми можно нормировать натуральные значения экологических индикаторов:

- для значений индекса структурного разнообразия  
 $d_1 = \exp[-\exp(7,639 - 4,940 y_2)]$ ;
- для индекса состояния древостоя  
 $d_2 = \exp[-\exp(2,063 - 0,395 y_1)]$ ;
- для эквивалентного уровня звука:  
 $d_3 = \exp[-\exp(-3,476 + 0,049 y_3)]$ ;
- для концентрации диоксида азота в воздухе:  
 $d_4 = \exp[-\exp(-2,108 + 30,400 y_4)]$

На основе этих уравнений, используя шкалу Харрингтона, можно найти интервальные оценки значений индикаторов (таблица 3), с помощью которых можно осуществлять процедуру экологической оценки.

Таблица 2

Интервальные оценки значений экологических индикаторов городских лесов

Количественные отметки на шкале желательности и желательность значения отклика	Индекс структурного разнообразия $H_{str}$	Индекс состояния древостоя $I_d$	Эквивалентный уровень звука, L, дБА	Концентрация NO <sub>2</sub> C, мг/м <sup>3</sup>
От 0,80 до 1,0: очень хорошо ( <i>very good = excellent</i> )	От 1,85 и более	9,0-10,0	40 и менее	0,02 и менее
От 0,63 до 0,80: <i>хорошо (good)</i>	От 1,70 до 1,85	7,16-9,0	40-55	0,02-0,044-
От 0,37 до 0,63: <i>посредственно (mediocre)</i>	От 1,55 до 1,70	5,22-7,16	55-70	0,044-0,069
От 0,20 до 0,37: плохо ( <i>bad = borderline</i> )	От 1,45 до 1,55	4,0- 5,22	70-80	0,069-0,085
От 0 до 0,20: <i>очень плохо (unacceptable = very bad)</i>	До 1,45	0-4,0	80 и более	0,085 и более

Применение алгоритмов вычисления и нормирования значений экологических индикаторов, построения частных и обобщённых критериев качества экосистем в данном случае представляет собой нетрадиционную задачу, для решения которой использование стандартных пакетов прикладных программ представляется довольно трудоёмким. Поэтому логична потребность в разработке специального программного обеспечения.

Для автоматизации расчетов и многокритериальной оценки, разработана программа «URBAN FOREST 3.0». Она написана на кроссплатформенном языке Java. Программа разбита на отдельные классы, содержащие логически сходные функции или объекты (рис. 1). Приложение может работать, как в онлайн-режиме, так и локально на компьютере. Предусмотрена возможность запуска программы на различных операционных системах. Программа обеспечивает быстроту расчетов и минимизацию погрешностей вычислений. Исходные данные и результаты расчетов сохраняются в файл с расширением «.csv» для дальнейшей работы с БД в Microsoft Office Access.

Рис. 1. Архитектура программы «URBAN FOREST»

В расчетной части программы собраны, поля ввода, комбинированные списки, разбитые на тематические группы (пять локаций) и кнопки (рисунки 2, 3, 4, 5, 6).

Рис. 2. Локация №1 «UF 3.0 – Состояние древостоя»

Рис. 3. Локация №2 «UF 3.0 – Структурное разнообразие»

Рис. 4. Локация №3 «UF 3.0 – Акустическое загрязнение»

Рис. 5. Локация №4 «UF 3.0 – Загрязнение воздуха»

Рис. 6. Локация №5 «UF 3.0 – Настройки»

После проведения расчетов, необходимо сохранить исходные данные и результаты расчетов в базу данных. Для этого предусмотрена кнопка «Сохранить». Сохранение происходит в формате «.csv», далее данный файл можно открыть в программе Microsoft Office Access. При открытии сформируется табличное представление исходных данных и результатов расчетов.

#### IV. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Форма представления полученных результатов в адрес лиц принимающих решения (ЛПР) зависит от специфики категории последних. Круг потребителей информации о состоянии городской ООПТ не ограничивается только специалистами конкретного природоохранного учреждения: экологические данные могут быть востребованы различными специалистами и управленцами на муниципальном и на городском уровнях. В настоящее время возможности ГИС-технологий во многом позволяют облегчить задачу представления экологической информации в адрес ЛПР различных категорий, и уже не требует обоснования положение, что ЭИС, связанная с обработкой пространственно распределённой информации, должна включать программные средства картографического анализа.

На рис. 7. представлены результаты визуализации экологического состояния модельной территории – городского лесного массива «Троекуровский лес» (часть комплексного природного заказника «Долина реки Сетунь»). Для обработки результатов мониторинга использованы программа «URBAN FOREST» и программа картографического анализа Golden Software Surfer 11.

Рис. 7. Сохранность лесной среды и уровень акустический комфорта в границах городского лесного массива «Троекуровский лес».

Интегральная оценка и картографирование экологического состояния территории с помощью ЭИС на основе регулярных мониторинговых исследований должны повысить результативность природоохранных решений. Прежде всего, это касается природоохранного

планирования внутреннего пространства ООПТ и организации экологически обоснованного благоустройства. Так, визуализированные результаты оценки состояния лесного биоразнообразия на основе значений индекса структурного разнообразия, нормированных по шкале желательности (см. таблицу 2), свидетельствуют, что преобладающая часть территории Троекуровского леса характеризуется довольно высоким для урбанизированных условий уровнем сохранности лесной среды. Следовательно, природоохранная функция этой ООПТ имеет большое значение для города. Состояние акустической среды (белые изолинии на карте), если оперировать значениями функций желательности, полученными по результатам полевых измерений, находится в поле удовлетворительных значений, и, следовательно, территория пригодна для рекреационного использования. Значит необходимо пойти по пути организации экологически обоснованного благоустройства территории лесного массива, способствующего локализации участков с полноценной биоценотической структурой. Наиболее эффективным способом использования такой территории представляется организация экологических троп, т.е. своего рода познавательная рекреация.

Выявление экологической ситуации, постановка диагноза на основе представляемых фактов, формулирование решения или выдача рекомендаций для выбора плана дальнейших действий – это спектр задач, решаемых в рамках экологической экспертной системы [2]. Считается, что структура экспертной системы определяется следующими модулями:

1. временные базы данных, предназначенные для хранения исходных и промежуточных данных текущей задачи;
2. базы знаний, предназначенные для хранения долгосрочных сведений /фактов/ и правил манипулирования данными;
3. решатель /база программ/, реализующий последовательность правил для решения конкретной задачи на основе информации, хранящейся в базах знаний и базах данных;
4. компонент приобретения знаний, автоматизирующий процесс наполнения базы знаний;
5. объяснительный компонент, формирующий пояснения о том, как система решала поставленную задачу.

ЭИС для городской ООПТ в представленной в настоящей статье концепции, хотя и не в полной мере, но обладает качествами экспертной системы (можно сказать, что это экспертная система своего рода «облегченного типа»). Мы имеем вычислительную систему, в которую включены знания специалистов о некоторой узкой предметной области в форме базы знаний. Решения системы обладают прозрачностью, т.е. объясняются пользователю на качественном уровне (в отличие от решений, полученных с помощью числовых алгоритмов, и, в особенности, от решений полученных статистическими методами). Компьютерными средствами воспроизводится методика решения задачи – в данном случае это интегральная оценка состояния экосистем. Такая ЭИС может стать специальной подсистемой ЭИС регионального уровня.