

УДК 630.425

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕСОВ В РАЙОНАХ ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

© 2001 г. В. В. Фомин, С. А. Шавнин

Уральская государственная лесотехническая академия
620032 Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

Поступила в редакцию 07.02.2000 г.

Проведены исследования морфометрических характеристик роста древостоев, расположенных на разном удалении от крупного медеплавильного завода. По совокупности диагностических параметров рассчитаны обобщенные показатели состояния насаждений и выделены градации интервалов величин для формирования границ отдельных зон. Использование семивариансного анализа позволило обосновать использование метода пространственной интерполяции “кригинг” для составления поверхностей состояния лесов. Сопоставление карты-схемы зон состояния насаждений, составленной по величинам обобщенных показателей состояния с топографической картой местности, позволило оценить влияние крупных форм рельефа на расположение и конфигурацию зон.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., аэропромышленные загрязнения, состояние древостоев, пространственная интерполяция.

Экологическое зонирование лесов в районах антропогенного воздействия является одной из важных проблем, имеющих фундаментальное и прикладное значение. На основании его результатов представляется возможным судить о состоянии лесного фонда, обосновать подходы к оценке ущерба, нанесенного лесам аэропромвыбросами, планировать проведение лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение их продуктивности и средообразующих функций.

Широкое распространение получило зонирование состояния лесных экосистем, основанное на использовании биоиндикации. В качестве биоиндикаторов используют лишайниковые сообщества (Киселев и др., 1986; Крючков, Сыроид, 1990), древостои (Пастернак и др., 1993; Алексеев, Жеребцов, 1995; Shavnin et. al., 1997), а также другие компоненты лесных биогеоценозов (Крючков, 1991; Воробейчик и др., 1994).

К общим недостаткам большинства карт, на наш взгляд, относится ограниченное количество фактического материала и недостаточно обоснованные конфигурации зон с разной степенью поражения лесов аэропромышленными выбросами. Вопрос о выделении и нанесении на топографическую карту участков с различным состоянием лесных насаждений считается ключевым. Диагностика и экологическое зонирование являются необходимыми предварительными этапами при создании системы постоянных пунктов слежения за изменениями, происходящими в лесных биогеоценозах.

Цель настоящей работы – проведение экологического зонирования состояния лесов в районах действия атмосферных промышленных загрязнений вокруг городов Первоуральска и Ревды на основе морфометрических характеристик древостоев с использованием географической информационно-системы (ГИС) и геостатистического пакета программ, а также использование в зонировании метода пространственной интерполяции “кригинг” и выяснение возможностей перечисленных подходов в пространственном анализе отдельных компонентов экосистем и действующих на них факторов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда, Свердловская область) – главному источнику аэропромвыбросов в данном районе, и представляет собой квадрат со стороной 44 км. Подробное описание климата, рельефа, почв и лесного фонда приведено в многочисленных работах (“Лесорастительные условия...”, 1973; Зубарева, 1986; Ромашкевич, Обухов, 1991; Воробейчик и др., 1994).

В ходе работ в районе исследований было заложено 119 пробных площадей (ПП) прямоугольной формы в искусственных молодняках сосны обыкновенной с максимально совпадающими лесорастительными условиями. На всех ПП были произведены стандартные лесоводственно-таксационные описания. На основании сплошного перечета

(каждая ПП имела не менее 300 деревьев преобладающей породы) выделяли группу из 40 модельных деревьев с диаметрами, наиболее близкими к среднему. У каждого дерева из данной группы определяли радиальный прирост ствола на высоте 1.3 м за последние 10 лет. У трех модельных деревьев производили измерения высот и приростов по высоте за этот же период.

При комплексной диагностике состояния насаждений использовали модель оценки состояния древостоев (Калинин и др., 1991; Shavnin et. al., 1997). В основе модели лежит способ преобразования натуральных значений частных признаков в шкалу кодированных откликов, составленную на базе величин диагностических характеристик на контрольной (фоновой) и наиболее пораженной ПП. Последующий перевод в шкалу безразмерных желательностей, или показателей состояния (ПС), осуществляется с помощью функции Харрингтона. На основе величин ПС, рассчитанных по отдельным характеристикам, производится расчет обобщенного показателя состояния (ОПС) для каждой ПП.

Вычисление величин ПС и ОПС были выполнены отдельно для первого и второго классов возраста. На всех ПП величины диаметров и высот приводили к 15 и 30 годам для насаждений первого и второго классов возраста соответственно. Для этого к значениям диаметров и высот прибавляли или вычитали средние величины радиальных приростов или приростов по высоте за соответствующие периоды.

Для создания карт состояния были построены виртуальные поверхности. В качестве X и Y координат использовали реальные координаты пробных площадей (абсолютные значения в км, данные взяты с топографической карты масштаба 1 : 200 000). В качестве Z координаты брали средние значения следующих характеристик древостоев: приведенных диаметров и высот (далее просто диаметров и высот), радиальных приростов и приростов по высоте за последние 10 лет, а также величины ОПС.

В данной работе для расчета промежуточных значений ОПС между экспериментальными точками был использован метод пространственной интерполяции – кригинг, который нашел широкое применение в почвенном картировании (Webster, 1986; Oliver, Webster, 1990). В основе метода лежит нахождение зависимости значений семивариансов от расстояния между точками, расположенными на земной поверхности (семивариограмма). Величины семивариансы рассчитывают по формуле

$$\gamma(h) = 1/2N(h) \sum [z(x_i) - z(x_i + h)]^2, \quad (1)$$

где $\gamma(h)$ – семиварианса для расстояния h ; $z(x_i)$ – значение характеристики в точке x_i ; $z(x_i + h)$ – значение характеристики в точке, находящейся на

расстоянии h от x_i ; $N(h)$ – количество пар значений, разделенных расстоянием h .

Расстояние между точками принято называть лагом. Семивариограмма является автокорреляционной статистикой. Построение семивариограммы позволяет находить пространственную корреляцию между значениями параметров в точках и рассчитывать весовые коэффициенты, которые в дальнейшем используются для расчетов промежуточных значений по формуле

$$z(x_0) = \lambda_1 z(x_1) + \lambda_2 z(x_2) + \dots + \lambda_n z(x_n), \quad (2)$$

где $z(x_0)$ – значение z , рассчитанное для любой точки x_0 ; λ_i – весовой коэффициент, связанный со значением характеристики в точке x_i ; $z(x_i)$ – значение характеристики в точке.

Если существует пространственная корреляция между величинами параметра, то с увеличением расстояния между ПП значения семивариансов возрастают до определенного предела. При дальнейшем увеличении лага величины последних остаются примерно на одном уровне. Этот уровень принято называть силл. Величину h , при которой значение $\gamma(h)$ достигает своего максимума, принято называть рангом (a). Ранг показывает максимальное расстояние между точками, при котором еще существует пространственная корреляция между значениями параметра. Для аппроксимации семивариограмм используются различные математические функции. В данной работе были использованы сферическая и экспоненциальная модели.

Формула для сферической модели имеет вид:

$$\gamma(h) = C_0 + C \{3h/2a - (h/a)^3\} \quad \text{для } 0 < h \leq a, \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad \text{для } h > a, \quad (4)$$

где C_0 – шумовая варианса; C – структурная варианса; a – ранг; $C_0 + C$ – силл.

Формула для экспоненциальной модели имеет вид:

$$\gamma(h) = C_0 + C \{1 - \exp(-h/r)\} \quad \text{для } h > 0, \quad (5)$$

где r – параметр, определяющий пространственную шкалу вариации показателя, аналогично рангу в предыдущей формуле.

В экспоненциальной модели функция приближается к силл асимптотически и соответственно не имеет четкого ранга. Поэтому вводят эффективный ранг $a' = 3r$, при котором $\gamma(h) = C_0 + 0.95C$ (Mcbrathney, Webster, 1986).

Проведение семивариансного анализа и создание поверхностей состояния осуществляли при помощи геостатистического пакета “GS+ for Windows”. Для создания электронной карты рельефа местности использовали ГИС “ARC/INFO”.

Параметры уравнений, аппроксимирующих семивариограммы, рассчитанные по различным характеристикам древостоев

| Наименование характеристики | Тип модели | C_0 | $C_0 + C$ | a или $3r$, км | R^2 |
|---------------------------------------|------------------|--------|-----------|-------------------|-------|
| Диаметр | Экспоненциальная | 2.480 | 4.113 | 21.72 | 0.965 |
| Высота | Сферическая | 1.961 | 4.170 | 12.00 | 0.950 |
| Радиальный прирост за 10 лет | Экспоненциальная | 0.075 | 0.192 | 8.10 | 0.950 |
| Прирост по высоте за 10 лет | » | 0.179 | 0.825 | 12.00 | 0.970 |
| Обобщенный показатель состояния (ОПС) | » | 87.100 | 174.300 | 18.00 | 0.965 |

Примечание. Единицами измерения C_0 и $C_0 + C$ для диаметра и радиального прироста являются $см^2$, для высоты и прироста по высоте – $м^2$, а для обобщенного показателя состояния – $балл^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице приведены параметры уравнений, аппроксимирующих семивариограммы, полученные для различных характеристик древостоев. Модель с анизотропической ориентацией осей хорошо описывает семивариограммы только по отдельным направлениям, но по другим – уровень аппроксимации значительно ниже требуемого. В целом значения коэффициентов детерминации изотропических моделей значительно выше, чем анизотропических, поэтому для описания зависимостей семиварианс от лаг использовали два вида изотропических моделей – экспоненциальную и сферическую. Коэффициенты детерминации для всех уравнений составляют величины 0.95 и выше.

На рис. 1 представлена семивариограмма, рассчитанная на основе величин ОПС. Форма кривой, изображенной на рисунке, а также данные таблицы свидетельствуют о том, что максимальное расстояние между ПП, при котором еще существует пространственная корреляция между значениями ОПС, составляет 18 км. Чем меньше удаление одной ПП от другой, тем меньше отличаются величины ОПС древостоев. При расчетах значений семиварианс на основе натуральных величин морфометрических характеристик (диаметров, высот и их приростов) были использованы 58 ПП с максимально близкими по возрасту древостоями. Модель расчета ОПС позволяет исключить влияние возраста, поэтому расчет семиварианс был выполнен на основе соответствующих значений ОПС для всех 119 ПП.

Коэффициент автокорреляции Морана также является широко используемой автокорреляционной статистикой. С уменьшением расстояния между пробными площадями значения коэффициентов последовательно возрастают, что свидетельствует о наличии пространственной корреляции значений параметра между ПП. При лаге 2 км величина коэффициента достигает 0.37.

На основе результатов анализа семиварианс была произведена интерполяция значений харак-

теристик древостоев методом “кригинг”. Для всех поверхностей характерно снижение значений морфометрических параметров в центральной части района исследований. Минимальные значения характеристик наблюдаются в точке с координатами местоположения СУМЗа. Поверхность, полученная в результате интерполяции величин диаметров, изображена на рис. 2. Наблюдаемая на ней вытянутость понижения в восточном направлении объясняется наличием преобладающих ветров, переносящих в данный район загрязненные воздушные массы от СУМЗа.

Необходимо подчеркнуть, что поверхности были получены только на основе использования результатов анализа семиварианс и метода интерполяции кригинг. Никакой дополнительной информации о расположении СУМЗа, структуре и объеме поллютантов не привлекалось. Таким образом, наличие существенного снижения значений морфометрических характеристик роста деревьев с приближением к СУМЗу свидетельствует о значительном отрицательном влиянии загрязнений завода на состояние древостоев.

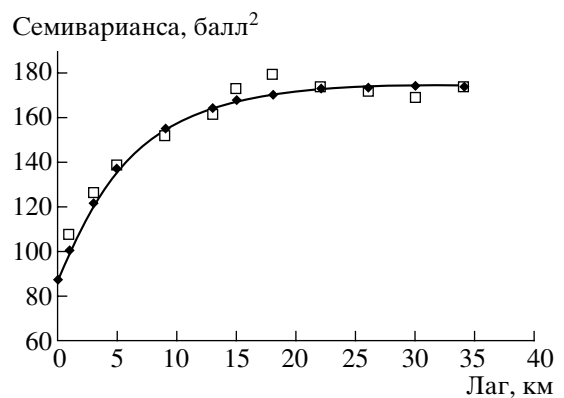


Рис. 1. Зависимость значений семиварианс от расстояния между пробными площадями (лаг), рассчитанная на основе величин обобщенных показателей состояния (квадратами изображены средние значения семиварианс, сплошной линией – расчетные величины).

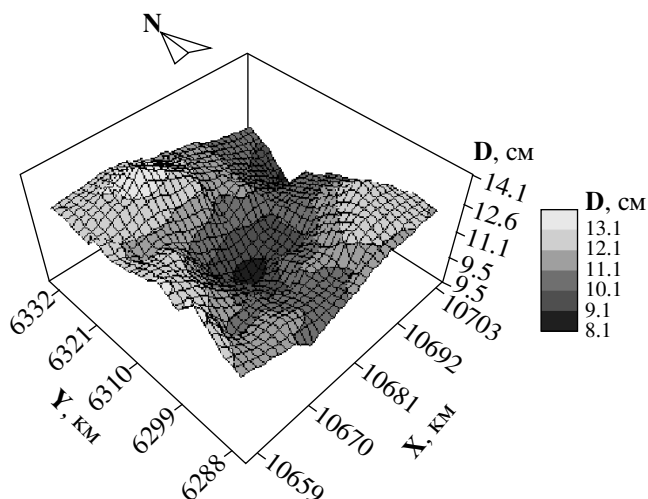


Рис. 2. Поверхность, полученная в результате интерполяции величин средних приведенных диаметров деревьев.

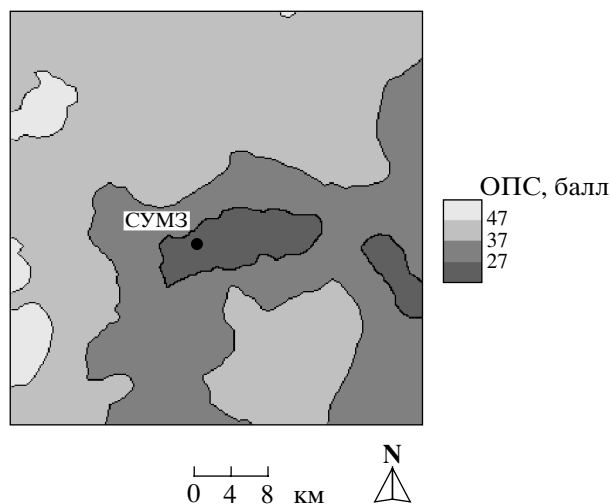


Рис. 3. Карта-схема зон состояния насаждений, составленная по величинам обобщенных показателей состояния деревьев.

Карта-схема зон состояния сосновых молодняков, рассчитанная по величинам ОПС, изображена на рис. 3. Увеличение интенсивности цвета означает ухудшение состояния лесных насаждений. Черный квадрат соответствует местоположению СУМЗа. Для оценки влияния орографического фактора на состояние деревьев была создана электронная карта рельефа местности, изображенная на рис. 4. Черными кружками изображены центры населенных пунктов.

Величины ОПС для зон с различным состоянием деревьев, а также соответствующие им качественные оценки и шифры составляют: ≤ 27 баллов – очень плохое (I); 27–37 баллов – плохое (II); 37–47 баллов – удовлетворительное (III); ≥ 47 бал-

лов – хорошее (IV). Параметры распределения значений ОПС по всем 119 ПП близки к нормальному. Среднее значение ОПС составляет примерно 37 баллов и соответствует границе между зонами II и III. Границам зон III–IV и I–II соответствуют величины ОПС, равные среднему значению плюс – минус стандартное отклонение.

Из анализа рис. 3 следует, что с удалением от СУМЗа значения ОПС древостоев, как правило, увеличиваются. Как и ожидалось, наиболее плохое состояние наблюдается у насаждений, произрастающих в непосредственной близости от СУМЗа. Вытянутость данной зоны в восточном направлении объясняется наличием западных преобладающих ветров и менее выраженным рельефом местности на этом участке. Второй участок, на котором расположена зона с очень плохим состоянием древостоев, находится у восточной границы района исследований (на удалении примерно 20–25 км от СУМЗа). Низкий балл состояния на пробных площадях, расположенных внутри данной зоны, можно объяснить их близостью к железной дороге и транспортному узлу Решеты.

Зона с баллом состояния древостоев 27–37 также вытянута на восток, но имеет несколько дополнительных участков. Один простирается на 20 км в южном направлении, а другой – практически вдоль всей восточной границы района исследований. Наличие первого участка можно объяснить отсутствием ярко выраженного рельефа местности в этой части района (см. рис. 4), что способствует беспрепятственному продвижению загрязненных воздушных масс от СУМЗа в данный район. Дополнительным аргументом в пользу этого предположения является тот факт, что юго-западная граница зоны проходит вдоль хребта Шайтанский Увал. С удалением на запад, за хребтом, состояние древостоев значительно улучшается, и три зоны с баллом состояния выше 47 расположены именно вдоль западной границы района исследований. Необходимо отметить, что рельеф не только влияет на продвижение воздушных масс и выпадение осадков, но также является важным фактором, участвующим в формировании лесорастительных условий. Поэтому не всегда можно однозначно оценить его влияние на состояние лесных насаждений.

Приведенный выше анализ свидетельствует о том, что изрезанность границ зон и мозаичность их расположения связаны в основном с комплексным действием перечисленных факторов. Дифференцировать их влияние в настоящее время можно лишь частично.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено наличие пространственной корреляции значений морфометрических характеристик древостоев. Это обеспечило обоснование выбора метода пространственной

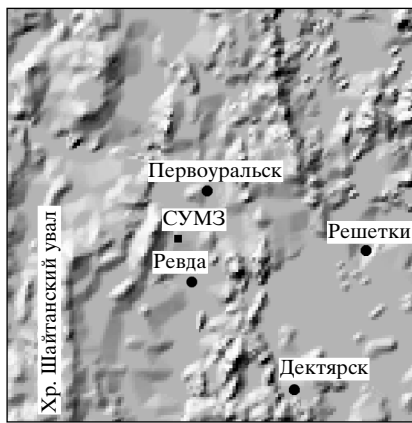


Рис. 4. Карта рельефа местности района исследований.

интерполяции значений параметров между экспериментальными точками. Применение анализа полученных с использованием интерполяции поверхностей дает возможность сделать объективное заключение о том, что с приближением к основному источнику аэропромвыбросов состояние древостоев ухудшается. Данный подход является перспективным для выделения основных и дополнительных источников негативного воздействия на лесные экосистемы, оценки степени поражения и установления ведущих факторов влияющих на их состояние. При этом сопоставление карты зон состояния лесных насаждений с электронной картой рельефа местности позволило оценить влияние орографического фактора на состояние лесов. Предложенная технология сбора, обработки данных и картирования может быть использована при оценке состояния и локальном экологическом мониторинге лесов.

Данное исследование выполнено благодаря финансовой поддержке фонда INTAS (грант INTAS 93-1645).

Авторы выражают глубокую благодарность д-ру Phill Block (компания "Gamma Design Software") за предоставление геостатистического пакета "GS+ for Windows".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.С., Жеребцов Р.Р. Закономерности пространственного размещения поврежденной растительности при региональном и локальном загрязнении атмосферы (на примере импактной зоны ГМК "Печенганикель") // Экология. 1995. № 6. С. 428–435.

Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. С. 173–178.

Зубарева Р.С. Пространственная дифференциация и классификация типов леса Билимбаевского массива // Научные основы использования и воспроизводства таежных лесов Среднего Урала. Свердловск, 1986. С. 16–44.

Калинин В.А., Крюк В.И., Луганский Н.А., Шавнин С.А. Модель оценки состояния пораженных древостоев // Экология. 1991. № 3. С. 21–28.

Киселев В.Н., Чубанов К.Д., Бойко А.В., Лукашев В.А., Суровая Т.П., Бортник А.В., Пикулик Н.И. Лихеноиндикация загрязнения воздушной среды зеленых зон промышленных центров Белоруссии // Экология. 1986. № 2. С. 30–35.

Крючков В.В. Предельные антропогенные нагрузки и состояние экосистем Севера // Экология. 1991. № 3. С. 28–40.

Крючков В.В., Сыроид Н.А. Лишайники как биоиндикаторы качества окружающей среды в северной тайге // Экология. 1990. № 6. С. 63–66.

Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. С. 12–25.

Пастернак П.С., Ворон В.П., Стельмахова Т.С. Воздействие загрязнения атмосферы на сосновые леса Донбасса // Лесоведение. 1993. № 2. С. 28–38.

Ромашкевич В.Е., Обухов А.И. Влияние газопылевых выбросов промышленных предприятий на лесорастительные свойства почв // Деградация и восстановление лесных почв. М.: Наука, 1991. С. 185–194.

Mcbratney A.B., Webster R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates // J. Soil Science. 1986. № 37. P. 617–639.

Oliver M.A., Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems // Geographical information systems. 1990. V. 4. № 3. P. 313–332.

Shavnin S.A., Fomin V.V., Marina N.W. Application of the generalized state index determination to ecological monitoring of forest in polluted areas // Measurements and Modelling in Environmental Pollution. Southampton UK and Boston USA: Computational Mechanics Publications, 1997. P. 399–407.