

УДК 630.425

## ВЛИЯНИЕ ГОРНОГО РЕЛЬЕФА И АЭРОПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

© 2002 г. В. В. Фомин, С. А. Шавнин

Уральская государственная лесотехническая академия  
620100 Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

Поступила в редакцию 15.05.2001 г.

Проведены исследования по изучению влияния горного рельефа и аэропромышленных загрязнений на биометрические параметры сосновых древостоев. С помощью растрового моделирования с использованием мультивариантных методов анализа разработаны эмпирико-статистические модели зависимости биометрических характеристик от параметров местоположения лесных участков. На основе разработанных моделей показана возможность прогнозирования изменения значений биометрических характеристик на любом участке местности.

*Ключевые слова:* *Pinus sylvestris* L., древостой, аэропромышленные загрязнения, рельеф, геоинформационная система.

В горных районах лесные экосистемы испытывают действие комплекса факторов внешней среды, связанных с рельефом: он влияет на формирование лесорастительных условий, движение воздушных масс и выпадение осадков. Пространственные закономерности размещения лесных экосистем по элементам рельефа отражены в многочисленных работах (Морозов, 1930; Сукачев, 1972; “Лесорастительные условия...”, 1973; Зубарева, 1986), но все они носят в основном описательный характер. Современные геоинформационные технологии позволяют на качественно новом уровне изучать средообразующие функции рельефа. В этом отношении показательны результаты использования геоинформационной системы (ГИС) для выделения потенциальных типов условий местопроизрастания на основе морфометрического анализа рельефа (Сысуйев, Шарый, 2000). В условиях аэропромышленного загрязнения дополнительное влияние орографического фактора связано с перераспределением насыщенных поллютантами воздушных масс на территории вокруг источника выбросов. Ранее (Фомин, Шавнин, 2001) была установлена связь расположения и конфигураций зон с различной степенью поражения древостоев с крупными формами рельефа. Количественная оценка степени воздействия факторов внешней среды на лесные экосистемы является важным условием для понимания процессов их развития и механизмов устойчивости к внешним воздействиям. Недостаточный учет орографического фактора при проведении экологических исследований может приводить к существенному искажению инфор-

мации о состоянии лесных насаждений. Если воздействие аэропромышленных эмиссий на биометрические параметры древостоев достаточно хорошо исследовано (Болтнева и др., 1982; Юкнис, Лекене, 1987; Воробейчик, Хантемирова, 1994; Shavnin et al., 1997), то изучению вопроса о степени влияния на них рельефа уделяется недостаточно внимания.

Цель настоящей работы – проведение количественной оценки комплексного действия рельефа и аэропромышленных загрязнений на биометрические параметры сосновых древостоев на примере конкретного района.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали сосновые древостой естественного происхождения, произрастающие в условиях горно-увалистого рельефа, на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда). Район исследований представляет собой неправильный пятиугольник. Размеры наибольших взаимно перпендикулярных сторон составляют 7 и 9 км (рис. 1). Источником данных о древостоях служили материалы лесосустройства 1999 г. Ревдинского лесхоза Свердловского управления лесами.

При помощи геоинформационной системы ARC/INFO (ESRI Inc., США) были произведены регистрация и совмещение растровых изображений топографической карты масштаба 1 : 100000 (“Окрестности Екатеринбурга”, 2000 г.) и плана лесонасаждений Ревдинского лесничества мас-

штаба 1 : 25000. Эти данные служили в качестве графической основы для создания линейного и полигонального покрытий (слоев) соответственно. С растрового изображения плана лесонасаждений была произведена оцифровка контуров выделов, с топокарты – изолиний высот.

Таблицы с таксационными описаниями выделов после предварительного редактирования были конвертированы из текстового формата в один из стандартных форматов баз данных dbase, а затем – в формат info. По общим идентификаторам графическая и атрибутивная части были соединены. Значения высот изолиний были введены в инфо-таблицу линейного слоя интерактивно в среде ARC/INFO.

На базе линейного покрытия с изолиниями была создана цифровая модель рельефа (ЦМР) этой территории на основе модели нерегулярной триангуляционной сети с последующей ее конвертацией в специальный растровый формат ARC/INFO (grid). На основе ЦМР были получены растровые слои, содержащие значения высот, уклона и экспозиции склона.

Путем переклассификации из исходного полигонального покрытия создан слой, содержащий информацию только по сосновым древостоям. В дальнейшем данное покрытие было использовано для создания растровых слоев со значениями параметров древостоя. С использованием специальной процедуры “пересечением” описанных выше наборов растровых покрытий был создан текстовый файл, содержащий в столбцах значения характеристик древостоя для соответствующих ячеек исходных растров. Каждой строке файла соответствует ячейка раstra с определенными координатами участка соснового насаждения. Размер ячейки составлял 100 × 100 м. На рис. 1 изображена поверхность района исследований. Для большей наглядности реальные отметки высот были увеличены в 5 раз. Усиление интенсивности окраски означает снижение высоты местности. Черным цветом обозначено местоположение участков исследуемых древостоя.

Для описания состояния лесных экосистем были использованы следующие характеристики древостоя и параметры их местоположения: средний возраст ( $A$ ), высота ( $H$ ) и диаметр ( $D$ ), относительная полнота ( $P$ ), бонитет ( $B$ ), запас на гектар древостоя основного элемента леса ( $Z$ ), расстояние до СУМЗа ( $R$ ), высота местности над уровнем моря ( $E$ ), экспозиция ( $Asp$ ) и уклон склона ( $S$ ). На рис. 2 изображена схема кодировки направлений экспозиций склонов. Ровному местоположению участка соответствовал код 4. Статистическая обработка данных была произведена при помощи пакета “Statgraphics Plus”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведение факторного анализа методом главных компонент на основе комплекса описанных выше параметров древостоя позволило выделить три общих фактора, объясняющих 75.4% суммарной дисперсии данных, на долю которых приходится 39.0, 24.1 и 12.3% общей дисперсии соответственно. Наибольший вес в первой главной компоненте имеют средняя высота, диаметр, возраст и запас, весовые коэффициенты которых

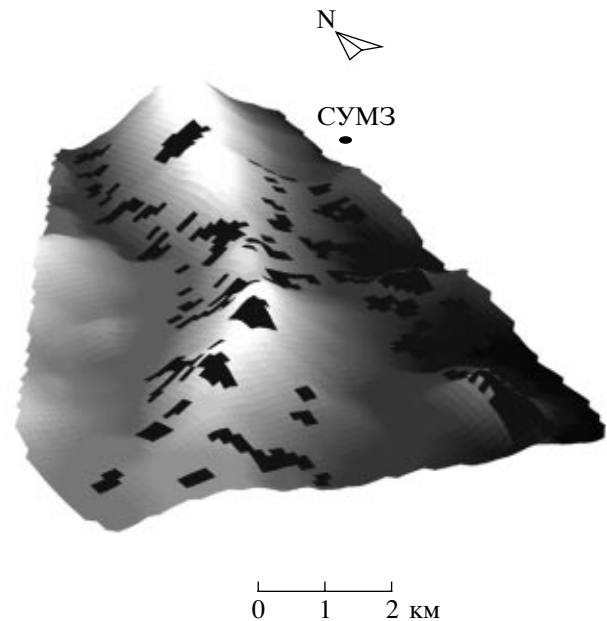


Рис. 1. Поверхность района исследований.

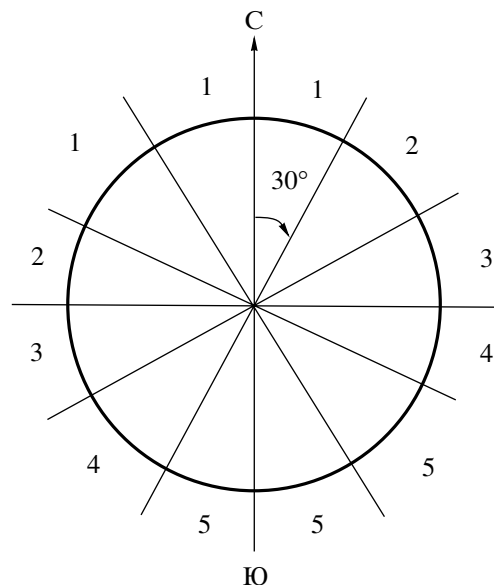


Рис. 2. Схема кодировки экспозиции склонов. Цифрами обозначены коды направлений.

Значения факторных нагрузок (отн. ед.) биометрических характеристик сосновых древостоев и параметров их местоположения

Наименование характеристики	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Экспозиция склона	0.030	0.640	-0.383
Высота над уровнем моря	0.162	-0.650	0.448
Уклон склона	0.048	-0.051	0.789
Расстояние до СУМЗа	0.387	0.120	0.651
Возраст	0.891	-0.362	0.123
Бонитет	-0.065	-0.776	-0.196
Средний диаметр	0.949	-0.253	0.104
Средняя высота	0.980	0.065	0.147
Относительная полнота	-0.330	0.755	0.122
Запас	0.728	0.543	0.254

имеют значения 0.980, 0.949, 0.891 и 0.728 соответственно (см. таблицу). Максимальная абсолютная нагрузка на отрицательной полуоси первого фактора наблюдается у относительной полноты и составляет величину  $-0.330$ . Данные параметры характеризуют основной элемент лесного фитоценоза – древостой. Расстояние до СУМЗа имеет относительно высокое положительное значение факторной нагрузки 0.387, свидетельствующее о наличии его взаимосвязи с описанными выше ха-

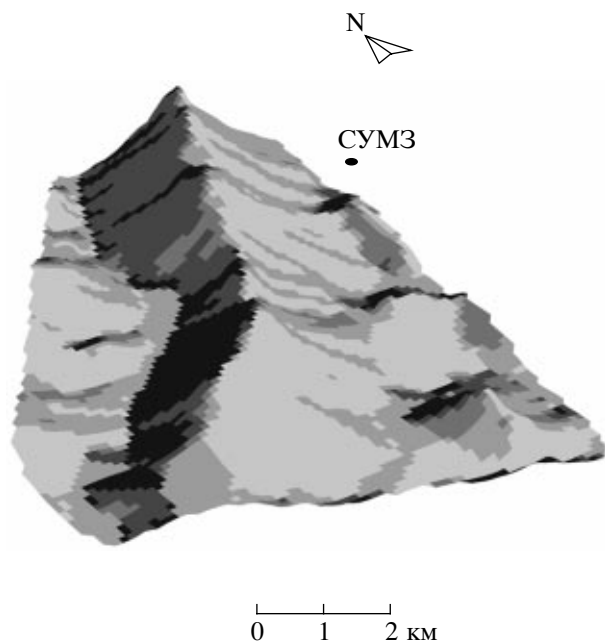


Рис. 3. Поверхность района исследований с нанесенными на нее кодами экспозиции склонов. Усиление интенсивности окраски означает снижение их величин. Реальные отметки высот увеличены в 5 раз по сравнению с фактическими.

рактеристиками древостоев. С учетом этого факта первую главную компоненту условно можно назвать “антропогенно-фитоценотическая”.

Второй фактор в основном отражает связь продуктивности древостоев с рельефом местности. С увеличением относительной полноты, запаса кода экспозиции склона, а также при снижении значений класса бонитета, возраста и высоты над уровнем моря возрастает величина данной компоненты.

Пространственные закономерности распределения параметров древостоев и характеристик рельефа лесных участков на территории района исследований характеризует третий фактор. По отношению к исследуемым лесным насаждениям СУМЗ занимает пониженное и ровное местоположение. Этим объясняются высокие положительные значения факторных нагрузок  $S$ ,  $R$  и  $E$ , значения которых составляют 0.789, 0.651 и 0.448 соответственно. Отрицательный весовой коэффициент экспозиции склона ( $-0.383$ ) свидетельствует о снижении кода экспозиции участков с удалением от СУМЗа. Факторные нагрузки по остальным переменным невелики, что говорит об относительно небольшом увеличении возраста древостоев, диаметра, высоты, относительной полноты и запаса, а также снижении бонитета с увеличением расстояния до завода.

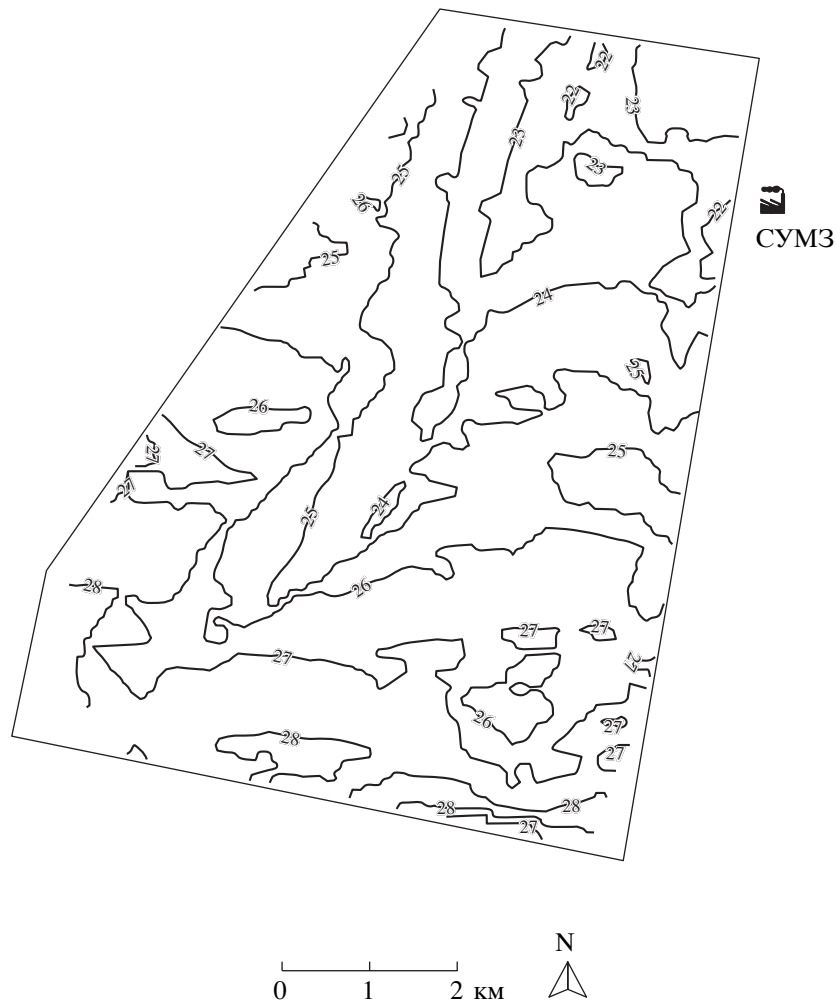
Проведение множественного линейного регрессионного анализа позволило количественно найти зависимость изменения среднего диаметра древостоя от параметров, характеризующих установившиеся ранее факторы. Это уравнение имеет вид

$$D^{1/2} = 2.150 + 0.040A_{sp} + 0.157R - 0.005E - 0.964P + 0.517A^{1/2}, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.941,$$

где  $R^2$  – коэффициент детерминации; расшифровка переменных  $A_{sp}$ ,  $R$ ,  $E$ ,  $P$  и  $A$  приведена в конце методического раздела.

Константа и все коэффициенты при переменных статистически значимы с доверительной вероятностью 0.99 и выше. Величины  $t$ -статистики Стьюдента для константы и коэффициентов уравнения составляют 8.0, 4.1, 8.5, 9.3, 57.7 и 6.7 соответственно. Проверка адекватности модели была выполнена на тестовой выборке (Розенберг, 1989). Величина средней квадратичной ошибки составила 12.2%. Наибольший вклад в объяснение общей вариации значений диаметра вносит возраст древостоя. Из уравнения следует, что с увеличением кода экспозиции, возраста и с удалением от СУМЗа возрастает значение среднего диаметра, а при увеличении высоты местности над уровнем моря и возрастании относитель-



**Рис. 4.** Изолинии прогнозируемых средних высот сосновых насаждений района исследований в возрасте 100 лет, рассчитанные по уравнению (2).

ной полноты происходит снижение его величины. Увеличение относительной полноты при фиксированном возрасте может означать как возрастание диаметров стволов при снижении густоты древостоя, так и снижение диаметров при увеличении густоты. В данной модели возрастание относительной полноты связано с увеличением густоты, что означает усиление конкуренции между деревьями, сопровождаемое снижением величины среднего диаметра древостоя.

Уравнение зависимости средней высоты древостоя от возраста, высоты над уровнем моря, экспозиции склона и расстояния до СУМЗа имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 H = & -25.979 + 0.348A_{sp} + 1.159R - \\
 & - 0.018E + 10.988 \ln A, \\
 R^2 = & 0.956.
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

Константа в уравнении и коэффициенты статистически достоверны на уровне значимости 0.01. Величины  $t$ -статистики Стьюдента для параметров модели составляют 23.4, 7.5, 12.6, 6.8 и 71.5 соответственно. Величина средней квадратичной ошибки, рассчитанной по тестовой выборке, составила 8.4%. Знаки коэффициентов при  $A_{sp}$ ,  $R$  и  $E$  в уравнениях (1) и (2) совпадают, что свидетельствует о сходном влиянии параметров местоположения на величины  $H$  и  $D$ . Использование при проведении множественного регрессионного анализа варианта кодировки экспозиции, при которой минимальное значение имеют склоны северной, а максимальное – южной экспозиции, а также варианта, учитывающего только ориентацию склонов относительно СУМЗа, не позволило получить регрессионные уравнения зависимостей  $D$  и  $H$  с достоверными коэффициентами для переменной  $A_{sp}$ . Моделирование освещенности поверхности района исследований с помощью функции “теневая модель” (shaded mod-

е) позволило выделить участки территории, различающиеся по интенсивности и длительности освещения в течение светлого времени суток, и разработать вариант кодировки, приведенный на рис. 2. Поверхность района исследований с нанесенными на нее кодами экспозиции склонов изображена на рис. 3.

Лесостроительные материалы несут достаточно ограниченный объем информации о древостоях, не отражающий в полной мере структуру и функционирование лесных экосистем. Этим обусловлен выбор модели типа “вход–выход”. При оценке адекватности таких моделей в основном рассматривают их праксеологичность (Розенберг, 1989). Достаточно высокая количественная адекватность, простота уравнений и хорошая интерпретируемость входящих в них параметров являются важными достоинствами моделей (1) и (2). На основе алгебраических уравнений с помощью растрового моделирования ГИС ARC/INFO позволяет получать покрытия с искомыми параметрами. На основе уравнения (2) были рассчитаны средние высоты сосновых насаждений в возрасте 100 лет на всей территории района исследований (рис. 4). Изолинии средних высот древостоев графически отражают комплексное влияние местности и аэропромышленных загрязнений на величину данного параметра. Рисунок 4 иллюстрирует возможность прогнозирования величин биометрических характеристик древостоя на любом участке района исследований.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено достоверное влияние рельефа и аэропромышленных загрязнений на биометрические характеристики сосновых насаждений. Увеличение высоты местности над уровнем моря, расстояния до СУМЗа и снижение освещенности макросклона сопровождаются уменьшением величин средних диаметров и высот древостоев. Уравнения зависимости базовых характеристик древостоев от параметров местоположения лесного участка позволяют количественно дифференцировать степень влияния на них ведущих факторов внешней среды. Использование мультивариантных методов анализа и растрового моделирования с помощью ГИС позволяет оценить величины потерь прироста древесины, вызванных действием аэропромышленных загрязнений, как в отдельно взятом выделе, так и по лесничеству или лесхозу в целом. Совершенствование моделей и расчет прогнозных карт базовых таксационных характеристик древостоев на основе регрессионных уравнений и растрового модели-

рования с помощью ГИС в перспективе позволят увеличить ревизионный период между повторным лесоустройством и снизить затраты на его проведение.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке Министерства образования РФ (грант № 05.01.022) и РФФИ (грант № 01-04-96428), а также технической поддержке компаний “Дата+” (Россия) и ESRI (США).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болтнева Л.И., Игнатьев А.А., Карабань Р.Т., Назаров И.М., Руднева И.А., Сисигина Т.И.* Воздействие пыле-газовых выбросов промышленных предприятий на сосновые северотаежные леса // *Экология*. 1982. № 4. С. 36–43.
- Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В.* Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение: зависимость доза–эффект // *Экология*. 1994. № 3. С. 31–43.
- 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.
- Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.
- Морозов Г.Ф.* Учение о лесе. М.: Госиздат, 1930. 440 с.
- Окрестности Екатеринбурга*. Топографическая карта. Масштаб 1 : 100000. Военно-картографическая фабрика УрВО, 2000. 34 с.
- Розенберг Г.С.* Адекватность математического моделирования экологических систем // *Экология*. 1989. № 6. С. 8–14.
- Сысуйев В.В., Шарый П.А.* Выделение типов условий местопроизрастания для лесоустройства по участковому методу // *Лесоведение*. 2000. № 5. С. 10–19.
- Сукачев В.Н.* Избранные труды. Л.: Наука, 1972. Т. 1. 418 с.
- Фомин В.В., Шавнин С.А.* Экологическое зонирование состояния лесов в районах действия атмосферных промышленных загрязнений // *Экология*. 2001. № 2. С. 104–108.
- Юкнис Р.А., Лекене М.И.* Рост и продуктивность древесного яруса лесных экосистем в условиях загрязнения природной среды // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. Л.: Гидрометеиздат, 1987. Т. 10. С. 145–161.
- Shavnin S.A., Fomin V.V., Marina N.V.* Application of the Generalized State Index Determination to Ecological Monitoring of Forest in Polluted Areas // *Measurements and Modelling in Environmental Pollution*. Southampton, UK; Boston, USA: Computational Mechanics Publications, 1997. P. 399–407.