

КЛИМАТОГЕННАЯ И АНТРОПОГЕННАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА



КЛИМАТОГЕННАЯ И АНТРОПОГЕННАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА

CLIMATE DRIVEN AND ANTHROPOGENIC SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS
OF TREE VEGETATION IN THE SECOND HALF OF THE XXTH CENTURY

RUSSIAN SCIENCES ACADEMY • URAL BRANCH
INSTITUTE OF PLANT AND ANIMAL ECOLOGY

V.V. Fomin

CLIMATE DRIVEN AND ANTHROPOGENIC
SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS
OF TREE VEGETATION
IN THE SECOND HALF OF THE XXTH CENTURY

YEKATERINBURG 2009

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК • УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИИ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ

В.В. Фомин

КЛИМАТОГЕННАЯ И АНТРОПОГЕННАЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА
ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА

ЕКАТЕРИНБУРГ 2009

УДК 574:630:528:551

Фомин В.В. Климатогенная и антропогенная пространственно-временная динамика древесной растительности во второй половине XX века. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 150 с.

Приведен анализ изменения климата Уральского региона во второй половине XX в. с использованием созданных климатических картографических моделей. Изложены результаты исследований климатогенной пространственно-временной динамики древесной растительности верхней границы леса на Полярном, Северном и Южном Урале, а также антропогенной динамики древостоев сосны обыкновенной на Среднем Урале. Приведены картографические модели изменения пространственного положения верхней границы леса трех горных массивов Урала. Описан комплекс разработанных методов и моделей количественной оценки реакции древесной растительности на изменение климата и антропогенные воздействия.

Ответственный редактор
доктор биологических наук, профессор **С.Г. Шиятов**

Рецензент
доктор сельскохозяйственных наук, профессор **С.В. Залесов**

Fomin V. V. Climate driven and anthropogenic spatio-temporal dynamics of tree vegetation in the second half of the XXth century. Yekaterinburg: UB RAS, 2009. 150 p.

Analysis of climate change of the Ural in the second half of XX-th century with the use of developed climate maps are described. The set of quantitative methods and models of climate driving and anthropogenic dynamics of tree vegetation are described. The results of studying of climate driving spatio-temporal dynamics tree vegetation of upper tree line in the Polar, Nothern and Southern Urals and anthropogenic dynamics in the Middle Urals are reported. Cartographic models of tree line shift in the three study areas in the Ural mountains are presented.



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-04-07080).

ISBN 978-5-7691-2113-5

© Институт экологии растений и животных
УрО РАН, 2009 г.
© Фомин В.В., 2009 г.

Глобальное и региональное изменения климата, а также антропогенные воздействия, выражающиеся в увеличении уровня загрязнения атмосферы выбросами промышленных предприятий, экстенсивное лесопользование, усиление рекреационной нагрузки приводят к изменению динамики развития растительных сообществ.

Одной из важнейших задач при изучении воздействия на растительность естественных и антропогенных факторов является разработка подходов и методов объективной количественной оценки изменений, происходящих на уровне отдельных органов, организма в целом, ценопопуляции и сообщества. Решение данной задачи невозможно без проведения междисциплинарных исследований, включающих подходы и методы экофизиологии, дендрэкологии, ландшафтной экологии, климатологии и геоинформатики.

В монографии приведены описания разработок и результаты исследований климатогенной и антропогенной динамики древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания, полученных с использованием разработанных количественных методов и моделей:

- исследована реакция ростовых и отдельных физиологических процессов деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на действие комплекса естественных и антропогенных факторов;
- разработаны методы комплексной оценки состояния древостоев и экологического зонирования территорий в районах с высоким уровнем антропогенной нагрузки;
- разработаны методы количественного анализа пространственно-временной динамики растительных рубежей и климата;
- на основе разработанных методов для модельных территорий созданы картографические модели – серии тематических карт, характеризующих положение и состояние растительности в условиях изменения климата и антропогенных воздействий;
- установлены основные тенденции пространственно-временной динамики древесной растительности модельных территорий.

Исследования, результаты которых приведены в монографии, были выполнены в совместной (Институт экологии растений и животных УрО РАН и Уральский государственный лесотехнический университет) лаборатории геоинформационных технологий в области наук о лесе и экологии, а также на кафедре прикладной физики и биофизики Уральского государственного лесотехнического университета в ходе выполнения следующих научно-исследовательских проектов:

- международного проекта INTAS 96-1645 «Использование лишеноиндикации и морфофизиологической оценки состояния древостоев в экологическом мониторинге лесов Среднего Урала в зонах, подверженных промышленным загрязнениям (Свердловская область, Россия)»;
- международного проекта INTAS 01-0052 «Области ранней реакции на изменение климата в Евразии и его влияние на депонирование углерода»;

- гранта РФФИ № 01-04-96428-р2001 «Изучение ростовых и физиологических процессов в древостоях и оценка устойчивости лесных экосистем, расположенных в зонах действия аэропромышленных загрязнений»;
- гранта РФФИ № 02-04-48180 «Реакция древостоев лесотундровых экосистем Полярного Урала на изменения климата в XX столетии»;
- гранта РФФИ № 05-04-48466 «Изучение и моделирование пространственно-временной динамики лесных экосистем в высокогорьях Урала»;
- гранта РФФИ № 06-04-49359 «Реакция древостоев на изменение климата и антропогенные воздействия»;
- гранта РФФИ № 09-04-07080 «Издание монографии «Климатогенная и антропогенная пространственно-временная динамика древесной растительности во второй половине XX века»;
- гранта РФФИ № 09-04-01004 «Климатогенная и антропогенная динамика древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания»;
- гранта РФФИ № 09-04-13850 «Исследование изменений климата, климатогенной и антропогенной пространственно-временной динамики древесной растительности с использованием многоцелевой информационной системы»;
- гранта РФФИ № 06-04-63006 «Организация и проведение комплексной Уральской фитоэкологической экспедиции»;
- гранта РФФИ № 08-04-10057 «Организация и проведение комплексной Среднеуральской фитоэкологической экспедиции»;
- госбюджетной темы 1.4.95 «Использование морфофизиологической диагностики древостоев и лишенологической биоиндикации для экологического мониторинга лесов в зонах промышленного загрязнения».

Автор выражает благодарность докт. биол. наук проф. С.Г. Шиятову, докт. биол. наук С.А. Шавнину, докт. с.-х. наук С.В. Залесову, докт. биол. наук Е.Л. Воробейчику – за консультации; канд. с.-х. наук А.С. Попову – за помощь в сборе и анализе данных о влиянии загрязнений на ростовые характеристики деревьев; аспирантам Д.С. Капралову и М.М. Терентьеву – за помощь при проведении сбора образцов, обработке и анализе данных о пространственно-временной динамике верхней границы леса и климата; аспирантке Ю.В. Шалаумовой – за помощь в обработке и анализе климатических данных; А.П. Михайлович, С.А. Глазковой – за помощь при создании метода автоматизированной оценки состояния деревьев с использованием цифровых фотографий их крон.

КЛИМАТОГЕННАЯ И АНТРОПОГЕННАЯ ДИНАМИКА ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЕЕ ПРОИЗРАСТАНИЯ

1.1. ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ПЕРЕХОД ОТ НИЗКОГО К ВЫСОКОМУ ЛОГИЧЕСКОМУ ТИПУ

Изменения климата, загрязнение окружающей среды, антропогенная и климатогенная трансформация биологических систем разных уровней организации – актуальные проблемы, изучению которых уделяется большое внимание научного общества. Результаты исследований разнообразных аспектов перечисленных выше проблем, описанные в многочисленных научных публикациях, требует использования подходов, позволяющих связывать воедино и объяснять феномены, относящиеся к разным уровням организации биологических систем, различным временным и пространственным масштабам.

Грегори Бейтсон (Gregory Bateson) (Бейтсон, 2007, с. 206–207) предложил парадигму исследования сложных биологических и социальных систем путем отображения соответствующих им явлений на зигзагообразную лестницу – последовательность шагов форма–процесс. Прежде чем пояснять, что в данном контексте понимается под формой и процессом, необходимо дать определение термину «объяснение».

Под объяснением можно понимать «сопоставление тавтологии и описания» (Бейтсон, 2007, с. 202). Следуя строгому определению, описание должно включать факты, внутренне присущие описываемым феноменам. При этом оно не должно указывать на какие-либо связи между феноменами. Под тавтологией понимается совокупность связанных утверждений, правомерность связей между которыми не подлежит сомнению, при этом сами утверждения на истинность не претендуют (Бейтсон, 2007, с. 94–95). Г. Бейтсон считал, что отображение описания на тавтологию является только первым шагом для объяснения феноменов, так как в этом случае объяснение ограничивается только человеческим видом. Для того чтобы снять данное ограничение, он ввел понятия форма и процесс.

Форма, или классификация, является аналогом тавтологии, а процесс – аналог совокупности объясняемых явлений. Г. Бейтсон высказал предположение, что данная дихотомия, которая присуща научному мышлению, имеется и в отношениях между явлениями, которые подлежат изучению. По мнению Г. Бейтсона, это положение является чрезвычайно важным и служит необходимым первым постулатом для понимания живого мира (Бейтсон, 2002, с. 203).

Кроме дихотомии форма–процесс Бейтсон также рассматривает две другие дихотомии: калибровка (calibration)–обратная связь и низкий–высокий логические типы. Дихотомии форма–процесс и калибровка–обратная связь, по его мнению, взаимно синонимичны (Бейтсон, 2002, с. 209).

Теория логических типов была разработана Берtrandом Расселом (B.A.W. Russell) и Альфредом Уайтхедом (A.N. Whitehead) для решения ряда математических проблем. Позже результаты их исследований были использованы в теории коммуникации и при описании биологических, а также социальных процессов и систем (Кузнецов и др., 2006). Переход от низкого логического типа к более высокому является шагом от информации о событии к информации о классе событий. Абстрактному расселовскому переходу от класса к классу классов в биологических системах можно противопоставить переход от одного уровня структуры к другому или, возможно, переходу между уровнями (порядками) рекурсии¹.

Форма и процесс чередуются в иерархической последовательности. При этом с каждым переходом от формы к форме и от процесса к процессу анализируемая сфера релевантных феноменов расширяется, изменяются временной и пространственный масштабы. Форма так соотносится с процессом (калибровка соотносится с обратной связью), как более высокий логический тип соотносится с более низким типом.

Предложенная Г. Бейтсоном парадигма исследования биологических систем в виде последовательного описания формы и процесса позволяет выделить уровни структуры сложных биологических систем и исследовать взаимоотношения между ними. Эта парадигма использована в данной работе в качестве методологии исследований пространственно-временной динамики древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания. На рис. 1, 2 представлены уровни анализа антропогенной и климатогенной динамики древесной растительности. Описание приведено в терминах форма–процесс.

На рис. 3 приведена схема уровней анализа изменений климата на примере температуры воздуха. При создании данной схемы была использована дихотомия калибровка–обратная связь. Исследование характеристик микроклимата в данной работе не проводилось, поэтому на рисунке на нижних уровнях анализируются изменения мезоклимата.

Исследования древесной растительности, результаты которых представлены в данной монографии, имеют ярко выраженный междисциплинарный характер, а также выполнены на разных уровнях организации живых систем в соответствии с описанной выше методологией Г. Бейтсона. Поэтому ниже приведены комментарии по структуре монографии, которые показывают, к какому уровню исследований, представленных на рис. 1–3, относятся разделы. В разделах 1.2–1.4 кратко описано состояние проблем в области исследований изменения климата, климатогенной и антропогенной пространственно-временной динамики древесной растительности.

Необходимо отметить, что, кроме фундаментальных результатов исследований, методические аспекты и разработки важны для получения количественных оценок значений исследуемых параметров. Разделы 2.4–2.6 соотносятся с первым уровнем анализа (рис. 1) – описание состояния дерева. Разделы 2.3.1 и 2.3.2 соответствуют нижнему уровню анализа – описанию лесотундровой древесной растительности (рис. 2).

¹ Под рекурсией понимается процесс с повторным повторением циклов, при котором при каждом цикле используется результат предыдущего.



Рис. 1. Уровни анализа антропогенной пространственно-временной динамики древесной растительности. Стрелками показан ход рассуждений

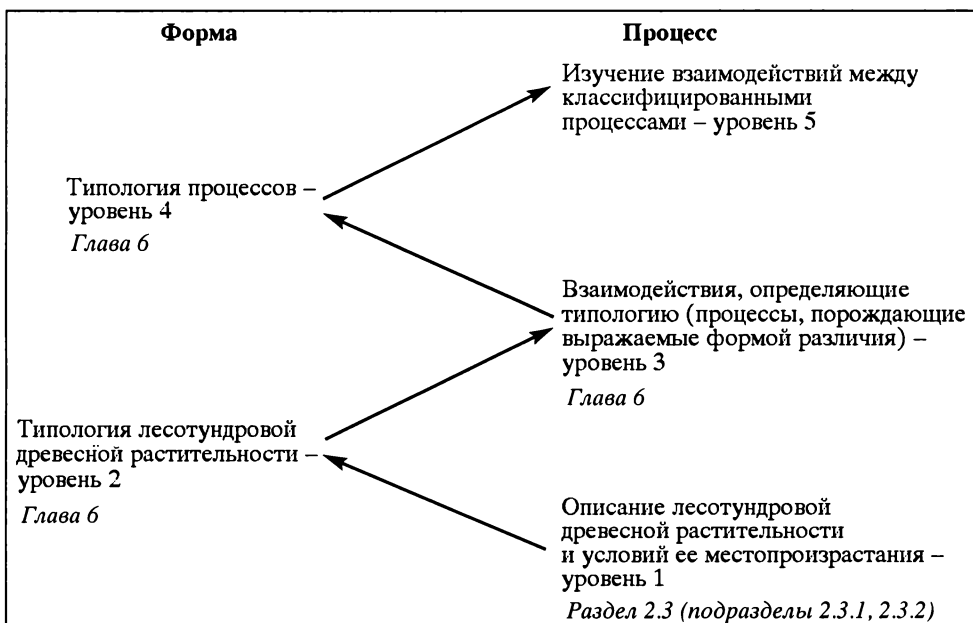


Рис. 2. Уровни анализа климатогенной пространственно-временной динамики древесной растительности. Стрелками показан ход рассуждений

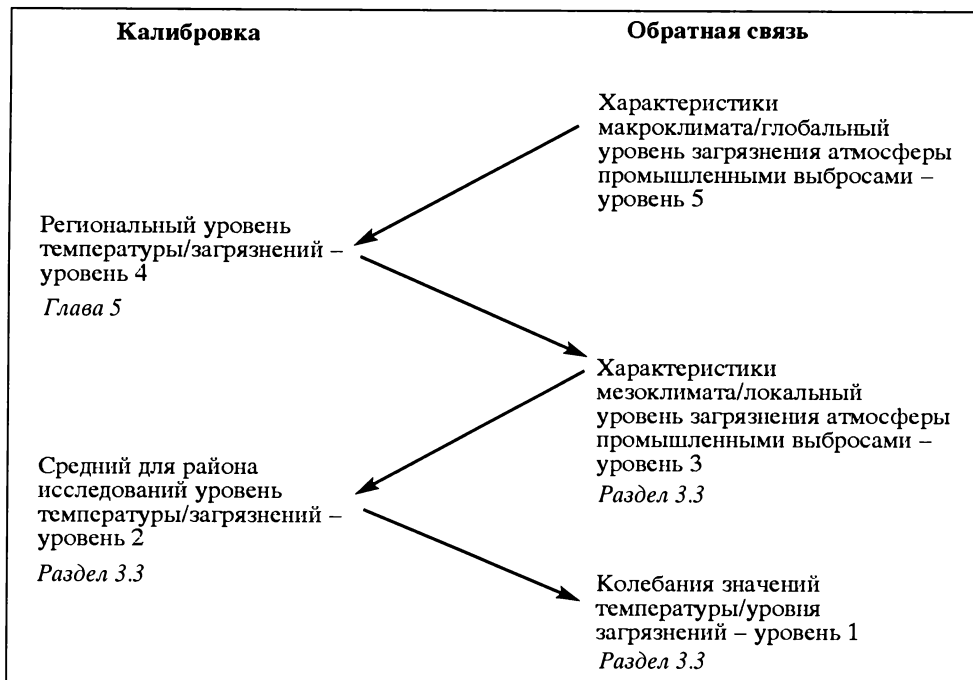


Рис. 3. Уровни анализа изменения климата (на примере температуры). Стрелками показано направление управления

В разделе 3.1 приведены результаты исследований влияния аэропромышленных загрязнений и световых условий на фотосинтетический аппарат хвои сосны обыкновенной. В соответствии со схемой, изображенной на рис. 1, они также соответствуют нижнему уровню анализа «описание состояния дерева». Необходимо отметить как фундаментальный, так и прикладной аспекты результатов исследований, приведенных в данном разделе. Первый связан с установлением неспецифичности реакции фотосинтетического аппарата хвои на действие аэропромышленных загрязнений и затенения. Второй аспект важен с точки зрения получения надежных данных при проведении экофизиологических исследований и экологическом мониторинге лесов с использованием флуоресцентных характеристик фотосинтетического аппарата хвои сосны обыкновенной.

Результаты сравнительного анализа морфофизиологической оценки состояния деревьев и экспресс-оценки их состояния по цифровым фотографиям крон, приведенные в разделе 3.2, также соответствуют нижнему уровню анализа (рис. 1). Описанные в разделе 3.3 результаты исследований влияния аэропромышленных загрязнений на характеристики мезоклимата соответствуют уровням анализа 1–3 (рис. 3). Анализ пространственно-временной динамики ростовых процессов деревьев сосны обыкновенной, произрастающих в условиях с разным уровнем загрязнения атмосферы промышленными выбросами, соответствуют уровню 3 – исследованию взаимодействий, определяющих типологию (рис. 1).

В разделах 4.1 «Комплексная оценка состояния древостоев» и 4.2 «Влияние аэропромышленных загрязнений на древостои в условиях сложно-расчле-

ненного рельефа» рассматриваются результаты экологического зонирования состояния лесов, которые соответствуют уровню 2 – типология состояния и уровню 3 – исследование взаимодействий, определяющих типологию (рис. 1).

Анализ изменения климата на Урале во второй половине XX в., приведенный в главе 5, соответствует 4-му уровню на схеме «калибровка–обратная связь» (рис. 3).

Результаты исследований, описанные в главе 6, соответствуют уровням 2–4 на схеме «форма–процесс» (рис. 2).

Таким образом, с помощью предложенной Г. Бейтсоном парадигмы проведены исследования пространственно-временной динамики древесной растительности, произрастающей в экстремальных климатических условиях, а также под воздействием аэропромышленных загрязнений в разных пространственных масштабах. Выполнен также анализ пространственно-временной динамики макроклимата Уральского региона. Кроме того, исследованы отдельные аспекты взаимосвязи мезоклимата и аэропромышленных загрязнений в условиях горно-увалистого рельефа местности Среднего Урала.

1.2. ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ГЛОБАЛЬНОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Климатические факторы играют ведущую роль в размещении растительности на земной поверхности. Глобальное и региональное изменения климата приводят к разнообразным изменениям в растительных сообществах, в том числе к изменению их пространственного положения. Поэтому изучение пространственно-временной динамики значений климатических характеристик является важным этапом в исследовании взаимодействия растительных сообществ и климата. В настоящее время существует ряд классификаций климата, которые построены на разных показателях. Ниже кратко описаны некоторые наиболее распространенные в России классификации.

В классификации В. Кеппена используются средние температуры самого теплого и холодного месяцев, средняя годовая температура, среднемесячные и годовые количества осадков (Кобышева и др., 1980). М.И. Будыко и А.А. Григорьев используют соотношение тепла и влаги, которое определяется величиной отношения годового радиационного баланса подстилающей поверхности к количеству тепла, необходимого для испарения годовой суммы осадков. Данный показатель называют радиационным индексом сухости (Костин, 1971; Кобышева и др., 1980). Классификация Л. С. Берга построена на географическом принципе. Климатические зоны в ней выделяются в соответствии с ландшафтными зонами (Костин, 1971; Костюкевич, 1975; Кобышева и др., 1980). Б.П. Алисов большое внимание уделяет циркуляционному фактору климата: горизонтальный перенос теплых и холодных воздушных масс, их трансформация под действием подстилающей поверхности и фронтальная деятельность (Алисов, 1956; Костюкевич, 1975; Кобышева и др., 1980).

Климатическая система описывается рядом параметров. Одни из них относительно простые, например температура воздуха, температура почвы, атмосферные осадки, влажность воздуха и почв. Другие более сложные, например динамика крупномасштабной циркуляции атмосферы, частота и си-

ла экстремальных метеорологических явлений. При этом, как правило, даже незначительные изменения величин простых характеристик могут приводить к значительным изменениям сложных (Жокоpin и др., 2004а, б).

Климатологи под изменением климата обычно понимают направленное его улучшение или ухудшение, в результате которого происходит закономерная смена метеорологического режима. Термин «колебание климата» используют в случае, если не установлена определенная направленность в изменении значений метеорологических параметров. Под изменением климата, как правило, понимают изменения в климатической системе на относительно больших промежутках времени (Алисов, Полтараус, 1962).

Некоторые исследователи при описании изменений и колебания климата используют термин «климатическая изменчивость» (Груза, Ранькова, 2004), в том числе микрометеорологическая (доли секунд – минуты), мезометеорологическая (несколько минут – несколько часов), соответствующая синоптическим процессам (часы – недели), климатическая – от трех недель до нескольких десятилетий, межвековая, изменчивость типа малого ледникового периода и соответствующая ледниковым периодам.

Необходимо отметить также, что в соответствии с Рамочной конвенцией ООН по изменению климата (РКИК ООН) под изменением климата понимают изменения в климатической системе, обусловленные деятельностью человека, а климатическую изменчивость связывают с действием естественных причин.

Для понимания процессов возникновения, развития и смен биологических сообществ необходимо знать, какие изменения происходили в климатической системе планеты. Объективные сложности анализа таких изменений обусловлены тем, что период систематических инструментальных наблюдений за климатом насчитывает только несколько сотен лет, поэтому для реконструкции климата используются различные методы из разных наук: геологии, палеоботаники, зоологии, экологии. При реконструкции климата исследователи используют керны льда из ледников, керны донных отложений, коралловые рифы и керны древесины.

В результате проведения многочисленных исследований установлено, что в климатической системе Земли наблюдались колебания различной амплитуды и продолжительности (Рубинштейн, Полозова, 1966; Дроздов, Григорьева, 1971; Геденов, 1973; Монин, Сонечкин, 2005). Наиболее значительные колебания происходят с периодом порядка ста тысяч лет и состоят из ледниковых и межледниковых периодов. Эти циклы обусловлены естественными причинами.

Вопрос о причинах современного глобального потепления является ключевым для ряда исследований и активно обсуждается в многочисленных научных публикациях (Будыко, 1980; Борисенков, 1982; Борзенкова, 1999; Изменение климата..., 2003; Дежево, 2003; Рамочная конвенция ООН об изменении климата..., 2004; Group II..., 2007; Израэль и др., 2007). Выдвигаются различные гипотезы объяснения изменения климата, сводящиеся к естественной или антропогенной причинам.

Одна из основных причин периодичности изменений климата – цикличность солнечной активности. Установлены циклы солнечной активности со следующими периодами: примерно 11, от 60–70 до 100–110 лет (Алисов, Полтараус, 1962; Виллетт, 1966; Костин, 1971; Монин, Сонечкин, 2005).

Однако это не единственный фактор, вызывающий климатические изменения. Антропогенные причины изменения климата обусловлены разнообразным влиянием человека на окружающую среду: повышение концентрации в атмосфере парниковых газов в результате промышленной деятельности, выброс аэрозольных частиц, уничтожение растительности, землепользование и урбанизация, прямой нагрев атмосферы источниками тепла (Будыко, 1980; Влияние..., 2006; Кокорин и др., 2004а, б; Морозов, 2005).

В результате проведения многочисленных исследований установлено, что в XX столетии на планете происходили ярко выраженные колебания климата, которые отличаются от всех предшествующих аналогичных по масштабу климатических изменений наличием явного тренда в повышении температуры воздуха и океана, которые происходят в условиях существенно усиливающегося антропогенного воздействия на окружающую среду.

Современное потепление климата началось в конце XIX – начале XX вв. и продолжается до настоящего времени (Алисов, Полтараус, 1962; Хапаев, 1976; Шиятов, 1984, 1997; Briffa et al., 1995; Ваганов и др., 1996, 1998; Борзенкова, 1999; Будыко и др., 1999; Израэль и др., 2001; Изменение климата..., 2003, 2005; Груза, Ранькова, 2004; Ефимова и др., 2004; Залиханов, 2004; Кокорин и др., 2004а, б; Израэль, 2005; Морозов, 2005; Влияние..., 2006; Опасные последствия..., 2006). Незначительный спад температуры происходил в период с 1946 по 1975 г. Самыми теплыми были 90-е годы XX в.

Многочисленные исследования климата позволили установить изменения в климатической системе Земли на глобальном и региональном уровнях. Средняя глобальная температура поверхности увеличилась на $0,6 \pm 0,2$ °C в течение XX в. За этот же период количество материковых осадков возросло на 5–10%. Одним из эффектов изменения климата является перераспределение осадков: увеличение их выпадения – в высоких широтах, уменьшение – в тропической зоне (Изменение климата..., 2003). По данным обобщенного доклада (Изменение климата..., 2003) за период с 1750 по 2000 г. величина концентрации CO_2 в атмосфере возросла на 31%, N_2O – на 17%, а CH_4 – на 151%. Кроме того, установлено увеличение частоты и интенсивности Эль-Ниньо в последние 20–30 лет.

Все эти изменения сопровождаются трансформацией экосистем Земли (Ранькова, Груза, 1998; Борзенкова, 1999; Будыко и др., 1999; Израэль и др., 2001; Изменение климата..., 2003; Груза, Ранькова, 2004; Китаев и др., 2004; Кокорин и др., 2004а, б; Израэль, 2005; Влияние..., 2006; Опасные последствия..., 2006). Многие исследователи считают, что основной причиной происшедших в XX в. климатических изменений является антропогенное усиление парникового эффекта Земли, который существовал с тех пор, как у нее появилась атмосфера. Установлено, что в создании парникового эффекта принимают участие несколько газообразных компонентов: углекислый газ (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O), водяной пар и ряд других.

Парниковый эффект не зависит от места конкретного выброса парниковых газов, так как они хорошо перемешиваются и перемещаются в атмосфере. Таким образом, выбросы парниковых газов оказывают глобальное действие, порождая вторичные эффекты, которые сказываются на

климате конкретного региона (Мюррей, 1966; Пласс, 1966; Чилингаров, 1999; Dale, 1997; Ваганов и др., 1996; Борзенкова, 1999; Будыко и др., 1999; Израэль и др., 2001; Изменение климата..., 2003, 2005; Груза, Ранькова, 2004; Какорин и др., 2004а, б; Израэль, 2005; Морозов, 2005; Влияние..., 2006). По некоторым оценкам, удвоение концентрации эквивалента углекислоты по сравнению с доиндустриальным уровнем может произойти в 2025–2050 гг., что приведет к повышению средней глобальной температуры воздуха на 1,5–4,5 °С. При этом максимальные уровни потепления будут наблюдаться в высоких широтах в зимнее время (Ваганов и др., 1996). В то же время некоторые исследователи предполагают, что наличие солнечного цикла, период которого утроен по сравнению с 23,5-летним циклом магнитной активности на Солнце, способен приостановить глобальное потепление в течение ближайших десятилетий (Монин, Сонечкин, 2005).

Для объяснения кратко описанных выше фактов, свидетельствующих об изменении климата, и получения прогнозов используются многочисленные математические модели пространственно-временной динамики климата, позволяющие получать прогнозные картографические модели с различной степенью пространственного разрешения.

В зависимости от размера территории и поставленных задач можно выделить следующие модели: глобальные (Будыко и др., 1999; Груза, Ранькова, 2004), для Северного полушария (Борзенкова, 1999), России (Ранькова, Груза, 1998; Ефимова и др., 2004) и регионов страны (Ефимова и др., 2004; Мелешко и др., 2004; Кусков, Катаев, 2006). Наиболее часто климатические модели строятся на основе анализа данных метеорологических инструментальных наблюдений температуры воздуха и осадков. На их основе были построены карты распределения значений климатических параметров на континентах Северного полушария (Будыко и др., 1999; Груза, Ранькова, 2004; Ефимова и др., 2004).

При построении региональных карт с использованием метеоданных достаточно часто применяют алгоритм осреднения точечных данных с предварительным осреднением по равновеликим боксам (широотно-долготным квадрантам) (Груза, Ранькова, 2004; Ефимова и др., 2004). Для оценки изменения климата в заданном регионе принято использовать разность между значениями метеорологических параметров для двух заданных интервалов времени.

Следует отметить, что климатология осадков менее изучена по сравнению с климатологией температуры (Дроздов, Григорьева, 1971). Установлена общая тенденция увеличения количества выпадающих осадков в некоторых регионах, например на Урале. Этот процесс объясняется увеличением частоты интенсивных осадков: ливневых дождей и гроз (Рамочная конвенция ООН об изменении климата..., 2004). Анализ данных по осадкам в Северном полушарии показал, что 80-е и начало 90-х годов XX в. были не только самыми теплыми, но и самыми влажными за весь период инструментальных наблюдений. В районах, расположенных севернее 50° с.ш., установлены положительные тренды выпадения осадков. В зоне 35–70° с.ш. рост количества выпадающих осадков был оценен в 6–8% за 100 лет (Борзенкова, 1999).

Характерной особенностью потепления и увлажнения климата является однонаправленный характер роста величин климатических параметров как

положительных, так и отрицательных аномальных отклонений для конкретных территорий, что усугубляет возможные последствия климатических вариаций при засушливом или избыточно увлажненном климате (Рамочная конвенция ООН об изменении климата..., 2004).

Существует достаточно большое количество работ, посвященных моделированию взаимодействия климата и растительности на глобальном и региональном уровнях (Loehle, LeBlanc, 1996; Svirezhev, von Bloh, 1996; Kellomaki, Vaisiinen, 1997; Gilmanov et al., 1997; Dixon et. al., 1999; Yemshanov, Perera, 2002; Hörsch, 2003). Некоторые из них позволяют оценивать изменение пространственного положения растительности. При этом методы и модели количественной оценки пространственного сдвига растительных рубежей еще недостаточно хорошо разработаны. Очень часто это связано с недостатком достоверных данных о местоположении растительности в пространстве в течение относительно больших промежутков времени.

Оценка изменения пространственного положения растительных рубежей, которая в сочетании с методами дендрохронологии и радиоуглеродного анализа дает детальные и достоверные результаты, служит еще одним источником информации об изменении климатических условий. Древесная растительность, произрастающая в высокогорных районах и высоких широтах с экстремальными климатическими и эдафическими условиями, очень чувствительна к изменениям, происходящим в климатической системе (Тихомиров, 1941; Галазий, 1954; Шиятов и др., 2002, 2005; Моисеев и др., 2004; Shiyatov, 1993; Körner, 1999; Holtmeier, 2003; Kullman, 2001, 2003, 2007).

Реконструкция изменения климата на Урале в течение 1500 лет была проведена С.Г. Шиятовым с использованием древесно-кольцевых хронологий. Для их построения были взяты образцы древесины и древесные остатки на границе леса на верхних и полярных пределах Уральского хребта. В результате проведенных исследований установлено, что в период с VIII в. до конца XIII в. климатические условия были оптимальными для произрастания древесной растительности. Одним из самых теплых было XIII столетие. Только в конце XX в. значения температур достигли примерно таких же величин. Потепления сопровождалось смещением верхней границы леса вверх по горным склонам (на Полярном Урале в XIII в. – с 300 до 340 м над ур. м., в XX в. – до 60–80 м по высоте и 0,5–2,0 км по склону), а также увеличением приростов древесины и сомкнутости крон деревьев (Влияние..., 2006; Ваганов и др., 1998; Шиятов, 1984, 2000; Шиятов и др., 2001, 2002; Шиятов, Мазета, 2002). Период с конца XIII в. по начало XX в. получил название «малого ледникового периода». За это время верхний предел лесов на Полярном Урале сместился вниз до 270 м над ур. м. (Шиятов, Мазета, 2002).

Для Урала изменения климата оценены на основе дендрохронологических и геотермических данных (Ваганов, Шиятов, 2005; Голованова, 2005). Результаты этих исследований хорошо согласуются между собой, а также с данными инструментальных наблюдений на метеостанциях за последние 150 лет (Степанов, 1964; Демежко, 2003). На верхней и полярной границах леса на Урале на фоне циклов колебаний климата продолжительностью в несколько сотен лет были обнаружены и более короткие: 2–3; 5–6; 10–12; 22–24; 60–80; 140–180 лет. Наиболее существенное влияние на динамику верхней границы леса оказывали циклические колебания климата продол-

жительность 60–80 и 140–160 лет (Горчаковский, Шиятов, 1976, 1977а, б; Полозова, Шиятов, 1976; Шиятов, 1967а; 1979а, б; Шиятов и др., 1986).

По результатам исследований климата Урала можно судить о направлении температурных градиентов с запада на восток (от европейской части России к Сибири). Наибольшее повышение температуры воздуха отмечено в высоких широтах с континентальным климатом при отклонении до 3 °С от средних температур в год за период 1961–2000 гг. (Изменение климата..., 2003). Потепление зафиксировано с конца 70-х годов и достигает наибольших значений к концу 90-х годов XX в. (Будыко и др., 1999; Груза, Ранькова, 2004). Самым теплым в России считается 1995 г., когда температурные аномалии доходили до 10 °С (Груза, Ранькова, 2004). Максимальное повышение температуры воздуха по сравнению с нормой происходило в зимний и весенний сезоны (Груза, Ранькова, 2004; Ефимова и др., 2004), что в свою очередь привело к увеличению продолжительности вегетационного сезона (Борзенкова, 1999).

1.3. ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ РЕАКЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

Проблеме глобального изменения климата и его влияния на отдельные экосистемы и биосферу посвящено большое количество работ (Körner, 1998; Изменение климата..., 2003; Kullman, 2002; Shiyatov, 2003; Körner, Paulsen, 2004; Моисеев и др., 2004; Шиятов и др., 2005). К настоящему времени накоплено много данных о реакции биоты на изменение климата. Установлены факты смещения границ высокогорной растительности в XX в. в различных регионах мира.

Наиболее перспективны для проведения исследований по изучению влияния изменения климата на растительные сообщества высокогорные и высокоширотные районы. Это связано с тем, что сообщества здесь находятся в экстремальных почвенно-климатических условиях, поэтому раньше начинают реагировать на изменение климата по сравнению с сообществами, находящимися на более низких широтах, а также высотах над уровнем моря (Тихомиров, 1941; Галазий, 1954; Shiyatov, 1993; Körner, 1999; Kullman, 2001, 2003; Шиятов и др., 2002, 2005; Holtmeier, 2003; Моисеев и др., 2004). Кроме того, они в большинстве случаев не подвержены существенному влиянию антропогенных факторов, что позволяет исследовать их реакцию на изменение климата.

Факты подъема лесной растительности в XX в. зарегистрированы в высокогорьях Швеции (Kullman, 2002, 2003), Альп (Krajick, 2004), Новой Зеландии (Walter et al., 2002), а также в Африке (Shugart et al., 2001). Сравнительный анализ спутниковых снимков LANDSAT, полученных в 1974–1999 и 1972–2000 гг. для двух районов, расположенных в северной части Канады, позволил установить факт продвижения лесной растительности в тундру (Masek, 2001).

Анализ литературных источников, содержащих результаты исследований, проведенных в Уральском регионе, позволил установить многочисленные факты, свидетельствующие о смещении границ растительных сообществ на Урале в XX в. В 20-х – 30-х годах XX в. публикуется ряд работ, в которых авторы на основе полевых исследований делают заключения как о

подъеме, так и снижении границ горной растительности на горных массивах Урала (Говорухин, 1929; Сочава, 1930; Тюлина, 1931; Игошина, 1931; Андреев и др., 1935). Некоторые из них предполагали, что факт снижения верхней границы леса свидетельствует об ухудшении климатических условий.

С начала 40-х годов XX в. появляются работы, в которых ставится под сомнение гипотеза о снижении уровня верхней границы леса в горных массивах Урала и ухудшении климата в последние десятилетия (Тихомиров, 1941). Установлены факты появления благонадежного подроста и обильного плодоношения крайних северных деревьев, продвижение кедра и пихты в область северных хвойных лесов, а также тайги в лесотундру и редколесий в тундру (Говорухин, 1947). Описаны примеры современного продвижения растительности вверх по склонам гор на Приполярном Урале (Куваев, 1952).

С 50-х годов XX в. на Урале начинаются масштабные системные исследования растительных сообществ на верхних и полярных пределах их распространения (Горчаковский, 1954, 1966, 1975; Тихомиров, 1959; Шиятов, 1962, 1964, 1965, 1967а, б, 1970, 1982, 2000; Горчаковский, Шиятов, 1973; Фамелис, 1977; Растительность..., 1982; Шиятов и др., 2001, 2002, 2005, 2007; Шиятов, Мазепа, 2002; Моисеев и др., 2004; Капралов и др., 2006). К настоящему времени достоверно установлены факты продвижения древесной растительности вверх по склонам горных массивов Урала. Считается, что вертикальный сдвиг растительных рубежей обусловлен потеплением и увлажнением климата (Шиятов и др., 2005; Моисеев и др., 2004; Shiyatov, 2003).

Анализ ландшафтных фотографий горных вершин Урала, сделанных в первой и второй половинах XX в., также свидетельствует о вертикальном смещении границы лесной растительности на Южном и Полярном Урале (Moiseev, Shiyatov, 2003; Фомин, 2008). Установлены факты смещения сомкнутого леса в тундру на Полярном Урале в XX в. (Шиятов и др., 2005) и цикличность изменения вертикального положения границы леса в данном районе за последние 1150 лет (Shiyatov, 2003).

Расхождения в оценках направления сдвига верхней границы леса, которые были сделаны в первой и второй половинах XX в., по-видимому, объясняются тем, что ранее исследователям были доступны в основном данные описательного характера, при этом объема инструментально измеренных значений параметров было недостаточно для получения надежных оценок. Использование методов дендрохронологии для анализа приростов отмерших древесных остатков позволило получить более надежные данные о процессах, происходивших в экотоне верхней границы леса (Шиятов, 1964). Установлено (Шиятов, 1962), что наиболее хорошо климатические смены наблюдаются там, где растительные сообщества находятся в условиях, экстремальных для их существования. Древесно-кольцевой анализ лиственницы позволил установить несколько периодов потепления климата (Шиятов, 1967а).

На основании анализа большого количества экспериментальных данных был сделан вывод о том, что за последние 450 лет в целом происходило улучшение климатических условий, что способствовало подъему границы леса в горы. Установлено также, что и в периоды похолодания происходило снижение высотного положения границы леса (Шиятов, 1967а). Продолжительность одного цикла, оказывающего наиболее сильное влияние на возрастную структуру древостоев, составляет примерно

140–160 лет. В этот цикл входят как периоды потепления (60–70 лет), так и похолодания (70–80 лет).

С середины 50-х годов XX в. коллективом исследователей под руководством и участия проф. С.Г. Шиятова (Институт экологии растений и животных УрО РАН) проводятся работы по описанию и картированию верхней границы леса горных массивов Уральского хребта. С этого момента и до начала XXI в. С.Г. Шиятовым была закартирована верхняя граница леса в пределах Тылайско-Конжаковско-Серебрянского горного массива, горы Косвинский Камень, 1, 2 и 3-й сопка, а также гор Семичеловечья и Колпак. В последующие годы выполнены описания горных массивов Полярного и Южного Урала (бассейн р. Соби, горные массивы Рай-Из, Иремель). В зависимости от факторов, которые являются лимитирующими для подъема древесной растительности, были разработаны различные классификации верхней границы леса (Сочава, 1930; Тихомиров, 1941; Галазий, 1954; Горчаковский, 1954, 1966; Колищук, 1960; Станюкович, 1960; Шиятов, 1970).

Обобщение накопленных данных привело к созданию двух независимых классификаций – экологической и физиономической. В экологической классификации типы границ леса устанавливаются в зависимости от лимитирующего фактора среды, в физиономической – в зависимости от состава и структуры лесных сообществ, произрастающих на верхнем пределе (Горчаковский, Шиятов, 1970, 1973). При картировании верхней границы леса необходимо определить, какие критерии следует использовать при нанесении границы на карту. Особую сложность вызывает вопрос о местоположении верхнего предела лесных экосистем и форме ее представления (линия или полоса).

Анализ литературы свидетельствует о том, что нет общепринятого определения верхней границы леса. Некоторые исследователи под верхней границей леса понимают линию, которая соединяет самые верхние пункты произрастания лесных сообществ. Однако при таком подходе необходимо решить, что считать лесом и где проходит грань между лесными и нелесными сообществами. Для решения этих вопросов наиболее часто используются следующие признаки: сомкнутость крон древесного яруса, величина куртины леса, высота и диаметр деревьев, форма ствола, хозяйственная ценность древесины (Горчаковский, Шиятов, 1985; Шиятов, 1985). Многие исследователи под границей леса понимают более или менее широкую полосу (Сочава, 1930; Тихомиров, 1941; Станюкович, 1960; Колищук, 1960). Одно из общепринятых названий – экотон. Ширина экотона может колебаться от десятков до нескольких сотен метров.

Необходимо отметить, что наличие надежных количественных данных о величине и скорости сдвига верхней границы леса позволяет оценить интенсивность процессов, происходящих в экотоне верхней границы леса. Как правило, в литературных источниках приводятся только качественные описания смещений границ либо количественные оценки без должной статистической обработки. Кроме того, применение разных методических подходов и источников данных не позволяет сопоставить величину и скорость смещения лесной растительности в пространстве.

Для получения статистически обоснованных количественных данных необходимо привлекать источники данных о пространственном положении растительных рубежей в разные моменты времени или проводить планомерные и детальные исследования в течение длительного периода времени.

Источником таких данных могут служить одновременные топографические и тематические карты, данные дистанционного зондирования, а также наземные ландшафтные фотографии.

1.4. ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ВЫБРОСАМИ

По химическому составу (с учетом токсического действия на растения) В.С. Николаевский (1979) выделяет следующие группы загрязняющих веществ:

- кислые газы, обладающие наибольшей токсичностью для растений (фтор, хлор, сернистый и серный газы);
- пары кислот (неорганических и органических);
- окислы металлов (свинца, мышьяка, селена, цинка и др.);
- щелочные газы;
- пары металлов;
- органические газы и канцерогенные вещества.

С 50-х годов XX в. наблюдается снижение поступления солнечной радиации в отдельных регионах Земли. Пик глобального задымления атмосферы Земли происходил в 80-х – 90-х годах XX в. (Williams, 2005). Этот эффект вызван загрязнением атмосферы промышленными выбросами. Ниже приведено краткое описание действия на растения наиболее распространенных поллютантов.

Пыль нарушает температурный и водный режимы растений, а также поглощение световой энергии и газообмен. Кроме того, пылевые частицы могут поступать во внутренние ткани листа и нарушать их нормальную жизнедеятельность (Илькун, 1978).

Характер действия различных кислых газов и паров кислот, по-видимому, сходен и заключается в нарушении физиолого-биохимических процессов в результате подкисления протоплазмы клеток. Подкисление способствует усилению окислительно-восстановительных процессов.

Один из самых распространенных поллютантов – сернистый газ. Его взаимодействие с растениями относительно хорошо изучено. Разработке отдельных аспектов этой проблемы посвящена обширная литература (Красинский, 1950; Крокер, 1950; Томас, 1962; Николаевский, 1966; Чуваев и др., 1973; Мамаев, Макаров, 1976; Илькун, 1978; Кунина и др., 1979; Шевякова, 1979; Барахтенова, Николаевский, 1988; Боронин и др., 1993).

Условно можно выделить три фазы поступления токсических газов, в том числе и SO_2 , в листья растений: 1) сорбция кутикулярным слоем и клетками эпидермиса; 2) диффузия через устьичные щели внутрь листа и растворение в воде, насыщающей оболочки клеток, выстилающих дыхательные полости; 3) передвижение от мест поглощения к соседним тканям и накопление внутри клеток (Илькун, 1978). Проникшим в мезофилл молекулам SO_2 свойственны специфические пути транспорта в жидкой фазе и межклеточном пространстве, которые определяют сопротивление проникновению газа. Это внутреннее, или мезофильное, сопротивление зависит от скорости растворения SO_2 в воде подустьичной полости, скорости превращения SO_2 в другие ионы, включающиеся затем в метаболизм серы (Барахтенова, Николаевский, 1988; Барахтенова, 1991).

Способность растений к детоксикации SO_2 является очень важной. Установлено, что при окислении SO_3^{2-} до SO_4^{2-} токсичность сульфат-иона снижается в 30 раз (Томас, 1962). При этом быстрое окисление SO_2 до сульфата способствует снижению мезофильного сопротивления (Барахтенова, Николаевский, 1988). Реакции окисления SO_3^{2-} до SO_4^{2-} проходят, по-видимому, в протоплазме и внутри клеточных органелл – митохондрий и хлоропластов (Кунина и др., 1979).

До нарушения проницаемости плазмалеммы избыток неорганического сульфата может храниться в клеточных компартментах. Роль таких резервуаров выполняют вакуоли (Furrer, 1967, цит. по: Барахтенова, Николаевский, 1988).

Известно, что при низком содержании токсических веществ в омывающем цитоплазму растворе плазмалемма способна контролировать и ограничивать их проникновение внутрь клетки. При повышении концентрации токсических элементов выше определенного уровня нарушаются целостность или функционирование плазмалеммы (Илькун, 1978; Крэнг, 1982). Повышение концентрации сульфат-иона в водной фазе межклеточного пространства возле стенок клеток может вызвать повреждение плазмалеммы. При этом возможно медленное пассивное движение сульфата через плазмалемму. Наиболее хорошо изучены облегченная диффузия при помощи переносчиков и движение ионов по градиенту концентраций (Шевякова, 1979).

Фотосинтетический аппарат проявляет высокую чувствительность к SO_2 , который изменяет ламеллярную структуру хлоропластов (Крэнг, 1982; Барахтенова, Николаевский, 1988), нарушает энергетические процессы, протекающие в мембране хлоропластов (Удовенко и др., 1976), отрицательно воздействует на состояние пигментного аппарата (Фарафонов, 1991; Барахтенова, 1991; Барышева, 1993; Шавнин и др., 1993) и активность ферментов (Николаевский, 1966; Негруцкая, Приседский, 1976; Костенко, Бронин, 1993).

При слабом повреждении сосны содержащими сернистый газ промышленными выбросами повышается количество аминокислот, в том числе пролина (Массель и др., 1988; Фуксман и др., 1997). Увеличение количества аминокислот в условиях загрязнения носит защитно-приспособительный характер и происходит как за счет их синтеза, так и путем протеолиза белков. Дальнейшее ослабление деревьев приводит к угнетению синтеза белков (Массель и др., 1988). Сернистый газ усиливает также дыхание растений (Николаевский, 1964; Фогль и др., 1970). При длительном воздействии SO_2 дыхание ослабляется вследствие уменьшения количества продуктов фотосинтеза, способных окисляться.

Реакцию растений на токсический газ, проявляющуюся в торможении поглощения воды корнями, следует считать общей независимо от вида растений и химического состава загрязнителей (Илькун, 1978). Отрицательные воздействия аэропромышленных выбросов на древесные растения выражаются при этом в деструкции корневой системы и структурных изменениях ксилемы, что способствует более частому возникновению водного дефицита (Кайбияйнен и др., 1995). Под влиянием SO_2 в листьях древесных растений снижается содержание связанной воды и падает водоудерживающая способность листовой ткани (Кулагин, 1966, 1974; Ситникова, 1966; Смирнов, 1986).

Воздействие токсических газов приводит к уменьшению размеров хлорофиллоносной ткани и диаметра проводящего цилиндра (Приступа, Мазепа, 1987; Михайлова, Бережных, 1995). Внешние симптомы нарушения обмена веществ проявляются в повреждении листовой ткани. Поврежденная хвоя голосеменных обычно меняет цвет с зеленого на матово-серый или красновато-коричневый, а при значительном уровне загрязнения происходит отмирание тканей, которое можно наблюдать в виде некрозов (Рябинин, 1962; Болтнева и др., 1982; Фрей, 1987; Гоголина, Мошкалев, 1993). Под воздействием токсических газов уменьшаются размеры и вес хвои (Рябинин, 1962; Приступа, Мазепа, 1987; Фрей, 1987), а также снижается продолжительность ее жизни (Второва, Пьявченко, 1984; Туллус, 1991; Черненкова, Макаров, 1996).

Косвенное действие дымов и газов проявляется через почву, которая хотя и обладает известной степенью буферности, однако при систематическом и длительном воздействии загрязнений в ней изменяются химические процессы. Газопылевые выбросы металлургических предприятий в основном состоят из соединений серы в комплексе с тяжелыми металлами. Установлено, что их совместное воздействие на процессы, происходящие в почве, значительно сильнее, чем раздельное действие (Чертов и др., 1990). Общая направленность этих изменений характеризуется ростом актуальной и потенциальной форм кислотности, выщелачиванием обменных оснований и увеличением содержания обменного алюминия и ионов тяжелых металлов (Кулагин, 1974; Зырин и др., 1984; Чертов, 1990; Ромашкевич, Обухов, 1991; Макаров, Недбаев, 1994).

Особенно негативно отражается на росте и развитии лесной растительности аккумуляция обменного алюминия. Токсический ион Al^{3+} при поглощении этим растением приводит к подавлению клеточного деления в корнях. При этом уменьшается клеточное дыхание, нарушаются поглощение, транспорт и использование Ca, Mg, P (Ромашкевич, Обухов, 1991). Наряду с накоплением токсических для растения веществ происходит вынос из почвенного профиля питательных элементов Ca, K, N, что отрицательно сказывается на плодородии почв и состоянии растительного покрова (Лянгузова, Чертов, 1990; Ромашкевич, Обухов, 1991).

Под влиянием аэропромышленных загрязнений происходит нарушение биологической активности почв (Рудкова, 1981; Гришина, Фомина, 1984). С увеличением накопления промышленных поллютантов в почвах, как правило, снижаются активность почвенных ферментов (Воробейчик и др., 1994; Коваленко, 1996) и общая численность микроорганизмов. Наряду с этим происходит специфическое в зависимости от химической природы поллютантов изменение микробиологических процессов в течение вегетационного периода (Коваленко, 1996). При критических уровнях загрязнения развивается линейная и плоскостная эрозия почвы, приводящая к потере гумусового горизонта (Елпатьевский, Арманова, 1984).

Интенсивная рекреационная нагрузка вызывает в почве изменения, сходные с изменениями, происходящими под воздействием промышленных поллютантов. В результате ухудшения физических свойств почвы происходит нарушение ее газопроницаемости. Вследствие этого процесса снижается рН почвенного раствора, возрастает содержание подвижного

Al³⁺ (Гончарова и др., 1986), а также подавляются целлюлозоразрушающая способность и ферментативная активность почвы (Шугалей, Дмитриенко, 1982).

Репродуктивная система древесных растений очень чувствительна к действию токсических веществ. Достоверно установлено увеличение частоты повреждений хромосом в процессе мейоза микроспороцитов сосны при загрязнении среды сернистым ангидридом и тяжелыми металлами. С этим, по-видимому, связана и низкая жизнеспособность пыльцы (Федоров, 1995).

При аэротехногенном загрязнении увеличивается доля аномальных пыльцевых зерен (Федорков, 1994), уменьшается фертильность пыльцы (Зуева, Махнева, 1993), снижаются жизнеспособность и рост пыльцевой трубки (Федотов и др., 1993). Изменения в пыльце сопровождаются снижением абсолютной и относительной выживаемости семян (Федорков, 1992, 1994; Романовский, 1993; Аникеев, 1996). Повышенная доля пустых семян при высоком уровне загрязнения связана, по-видимому, с действием летальных генов на ранних стадиях эмбриогенеза (Федорков, 1992, 1994). Токсические выбросы приводят к снижению биометрических показателей шишек (Калинин, 1989; Барабин, 1995), технической и грунтовой всхожести семян (Калинин, 1989).

Неблагоприятное влияние токсических эмиссий на деревья выражается в уменьшении радиальных приростов стволов и побегов (Кузьмичев, 1985; Лиела, 1985; Вайчис и др., 1988; Фимушин, 1988; Черненкова, 1988; Innes, Cook, 1989; 1991; Чубанов, 1989; Пастернак и др., 1990; Bernal-Salazar et al., 2004; Nieminen, 2005). При этом наблюдаются нарушение цикличности прироста по диаметру (Таранков, Матвеев, 1994) и возрастание амплитуды колебаний годичного радиального прироста. Последнее свидетельствует об увеличении зависимости данного параметра от изменений внешних условий при наличии загрязнения атмосферы. Некоторые авторы отмечают возможность увеличения среднего прироста древостоев на фоне роста амплитуды его колебаний, но такое увеличение, как правило, кратковременное и сменяется уменьшением величин данного показателя. В целом динамика снижения значений радиального прироста деревьев в зависимости от степени их повреждения включает три стадии: буферную, максимальной реакции и замедления (угасания) реакции (Алексеев, 1993).

Приросты по высоте реагируют на атмосферное загрязнение так же, как и радиальные приросты (Барткявичус, 1984; Юкнис и др., 1985; Пастернак и др., 1993). В условиях загрязнения наряду с более интенсивным, чем в естественных условиях, снижением прироста меняются и соотношения интенсивности прироста по высоте и диаметру. Прирост по высоте уменьшается быстрее, чем радиальный прирост, причем в верхней части ствола величины последнего снижаются более значительно, чем в нижней (Юкнис, Лекене, 1987).

Сопоставление показателей приростов по высоте и диаметру деревьев 30-летних сосняков показывает, что изменение значений данных показателей происходит синхронно со смещением отдельных пиков на один-два года. С повышением возраста древостоев их устойчивость к загрязнению снижается. В молодняках под воздействием выбросов в первую очередь нарушается прирост по высоте, а в спелых – радиальный прирост (Маргынюк, Данилов, 1989).

Необходимо отметить, что анализ тенденций роста основных видов древесных растений в Европе за период с 1950 по 1990 г. показал, что в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами может наблюдаться как снижение, так и увеличение радиальных и объемных приростов, а также приростов по высоте (Jaworski, 2003).

Интегральным показателем тренда лесной экосистемы является ее автотемпоральность (ход собственного времени). Для древостоев, произрастающих в условиях локального загрязнения природной среды, характерно ускорение процессов старения (Барткявичус, 1986; Мауринь, 1986).

В зоне действия промышленных выбросов создаются благоприятные условия для размножения стволовых вредителей (Грешта, 1970; Массель и др., 1988). При этом структура энтомокомплексов зависит от состава загрязнений (Богданова, 1987; Селиховкин, 1992).

В древостоях, произрастающих в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами, преобладают ведущие скрытый образ жизни насекомые-ксилофаги. В сильно загрязненных древостоях под влиянием промышленных выбросов ослабление и усыхание деревьев происходят гораздо быстрее, чем нарастание численности популяций насекомых. При этом значительная часть деревьев оказывается непригодной для поселения стволовых вредителей. В более отдаленных от источника эмиссий древостоях при незначительных по объему, но экспозиционно непрерывных поступлениях промышленных эмиссий происходит постепенное ослабление деревьев и создаются благоприятные условия для поселения ксилофагов. С удалением от источника загрязнения численность ксилофагов может как возрастать (Вайчис и др., 1988), так и, наоборот, увеличиваться с приближением к источнику загрязнения (Пастернак и др., 1990). Размножение стволовых вредителей усугубляет воздействие основного ослабляющего фактора – промышленных выбросов – и ускоряет распад лесных насаждений (Богданова, 1987; Шяптяене, 1988).

В результате химического загрязнения кардинально изменяются структура фитоценоза и фитогенная среда, сокращается видовое разнообразие флоры (Второва, Пьявченко, 1987; Черненькова, 1987; Крючков, 1991; Воробейчик, Хантемирова, 1994). С возрастанием техногенной нагрузки увеличивается отпад деревьев, естественный фитоценоз разрушается и на смену ему приходит новое сообщество (Грешта, 1970; Второва, Пьявченко, 1987; Черненькова, 1987; Вайчис и др., 1988; Шяптяене, 1988; Чубанов, 1989).

Ущерб лесам, заключающийся в уменьшении текущего прироста, ускорении процесса отпада деревьев, появлении дигрессивных сукцессий, может быть выражен в конкретных экономических показателях. Выбор оптимальной стратегии хозяйственной деятельности в лесных насаждениях, находящихся под воздействием загрязнений, должен базироваться на информации о количественных и качественных изменениях в состоянии лесных экосистем. Однако до настоящего времени в экологических исследованиях нет единой общепринятой методологии решения таких вопросов. Широко используются различные шкалы, основанные на визуальной оценке состояния древостоев по степени пожелтения хвои или листвы, дефолиации, протяженности и форме кроны (Санитарные нормы..., 1970; Докунина, 1984; Власенко и др., 1995; Семенюк, Рудакова, 1988; Muller, Stierlin, 1990). Недо-

статки данного подхода заключаются в субъективности оценок и трудности определения промежуточных категорий ослабленности деревьев.

Другие методы основаны на определении значений одного или нескольких показателей и их сравнении с аналогичными характеристиками контрольного объекта. В качестве таких параметров могут выступать лесоводственно-таксационные (Фимушин, 1976, 1988; Schmid-Haas, 1991; Соловьев и др., 1995), физиологические (Левон и др., 1976; Барахтенова, 1991; Фарфонов, 1991; Баженов, Шевнин, 1994; Васфилов, 1995; Фомин, Шавнин, 2002), биохимические (Шульц, 1991; Фуксман и др., 1997), биофизические (Суховольский, 1986; Каширо и др., 1988; Шавнин и др., 1988; Кирпичникова и др., 1995; Schavnin et al., 1995; Оцхели и др., 1997) характеристики, а также их совокупность (Шавнин и др., 1986; Калинин и др., 1991; Бабушкина и др., 1996; Фомин, Шавнин, 2001).

При определении состояния лесного биогеоценоза или какого-либо его компонента на основе комплекса характеристик, как правило, используются различные математические модели. В их основе лежит процедура перевода натуральных значений в безразмерные величины, называемые индексами, или баллами состояния (Степанов, 1988, 1991; Барахтенова, Кузьмина, 1991; Калинин и др., 1991; Черненкова, 1991; Shavnin et al., 1997; Фомин, Шавнин, 2001).

Для получения оперативной и точной информации о состоянии и происходящих изменениях в лесном фонде создана система мониторинга лесов (Постановление..., 1993). Мониторинг лесов – это система мероприятий по наблюдению, оценке и прогнозированию состояния лесов. Первоочередными объектами мониторинга являются леса, произрастающие в условиях усиленного загрязнения атмосферы (Дялтувас, Гульбинская, 1989). Одна из важнейших задач лесного и экологического мониторинга – развитие прогностических функций на основе соответствующих моделей (Корзухин, Седых, 1982; Арманд и др., 1984; Алексеев и др., 1986) и создание специализированных систем раннего предупреждения об ухудшении состояния лесов. Эти системы создаются либо на основе особо чувствительных индикаторов, либо на основе привязки пунктов слежения к особо критическим зонам (Садыков, 1991).

Мониторинговая система ECN, созданная в Великобритании для комплексного изучения аэропромышленных загрязнений, климата и биоразнообразия, является успешным примером реализации системы мониторинга с использованием данных, полученных при проведении междисциплинарных исследований (Morecroft et al., 2006).

В качестве индикаторов отдельные авторы используют параметры, характеризующие состояние мхов (Андреева, 1990; Горшков, 1990), лишайников (Мартин, 1982; Трасс, 1985; Крючков, Сыроид, 1990; Бязров, 1991; Жидков, 1996; Михайлова, 1996) и древостоев (Шульц, 1991; Фомин, Шавнин, 2001, 2002).

Важным направлением в оценке состояния лесных экосистем является также использование геоинформационных технологий и дистанционных методов зондирования земной поверхности (Корзухин, Седых, 1982; Исаев, Сухих, 1986; Малышева, 1989). На основе космических снимков возможно выявление очагов атмосферного загрязнения и районов выпадения атмосферных загрязнителей на поверхность (Выгодская и др., 1984). Развитие дистанционных методов исследования динамики изменения площадей лес-

ного фонда под влиянием деятельности человека предполагает комбинированное использование съемок различных видов с применением цифровой обработки изображений для повышения объективности получаемых выводов (Кузьмичев, 1985; Михайлова, Воронин, 1988; Goward et al., 1994).

В экологическом картировании широко применяются географические информационные системы (ГИС). Они позволяют решать широкий комплекс проблем, связанных с экологическим картированием и выбором оптимальной стратегии хозяйственной деятельности (Lowell, 1990; Koussoulakou, 1994; Acevedo et al., 1996; Johnston et al., 1996; French, Reed, 1996; Tappeiner et al., 1998; Antonic, Legovic, 1999).

Создание экологических карт необходимо для обеспечения как существующих, так и планируемых экологических программ. Выделяют экологические карты фактического состояния, аналитические и прогнозные. Карты фактического состояния несут конкретную информацию о свойствах природной среды. Аналитические карты отражают экологическую ситуацию как в комплексных, так и в конкретных количественных показателях. На них выделяются районы с различной остротой экологической напряженности, участки с высокой степенью риска возникновения экологических катастроф. Сопоставление прогнозных карт отражает развитие экологической ситуации при том или ином сценарии изменения экологической обстановки на данной территории (Тамплон, Елин, 1996). Примером аналитической карты может служить «Карта экологической ситуации промышленных районов Свердловской области» (1993).

Существуют экологические карты видов антропогенных нагрузок и интенсивности их проявления по компонентам среды: объему и структуре загрязняющих веществ промышленных предприятий и выбросов автотранспорта (Кропачева, Зернин, 1997).

Широкое распространение получило картирование на основе расчета концентраций загрязняющих веществ в воздухе (Koussoulakou, 1994; Поддубный и др., 1996; Старыгин и др., 1997). Другие виды экологического картирования основаны на использовании методов биоиндикации. В качестве биоиндикаторов могут выступать лишайники (Киселев и др., 1986; Пауков, 1997), древостои (Фимушин, 1976; Пастернак и др., 1993; Шейнгауз, 1994; Алексеев, Жеребцов, 1995), а также другие компоненты лесных экосистем (Крючков, 1991). Общим недостатком большинства карта-схем являются недостаточно обоснованные конфигурации зон с различной степенью состояния растительных сообществ.

2.1. ОБЪЕКТЫ И РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1.1. Климат Уральского региона во второй половине XX в. – начале XXI в.

Результаты анализа пространственно-временной динамики климата на территории Уральского региона (Приложения А–Д) во второй половине XX в., проведенного на основе метеорологических данных инструментальных наблюдений на метеостанциях Уральского региона, позволяют решать конкретные задачи климатической реконструкции с большей детализацией для малых масштабов по сравнению с существующими в настоящее время аналогами. Такая реконструкция очень важна для задач, связанных с оценкой реакции наземных экосистем на изменение климата, и в частности для задачи, связанной с моделированием смещения верхней границы леса на горных массивах Урала (Шиятов, Мазепа, 2002; Фомин и др., 2006; Капрапов и др., 2006; Шиятов и др., 2007).

2.1.2. Верхняя граница леса на горных массивах Полярного, Северного и Южного Урала

Для оценки пространственно-временной динамики верхней границы леса были выбраны три горных массива на Полярном, Северном и Южном Урале: Рай-Из, Ирмель и Тылайско-Конжаковско-Серебрянский (Конжаковский Камень) соответственно (Приложение А). Объект исследований – древесная растительность (реколесья и сомкнутые леса), произрастающая на горных склонах данных массивов.

Географические координаты района исследований на Полярном Урале – $66^{\circ}46'–66^{\circ}55'$ с.ш. и $65^{\circ}22'–65^{\circ}49'$ в.д. Максимальная высота местности составляет 359 м над ур. м. Массив Рай-Из сложен из перидотитов и габбро. В долинах рек Кердоманшор и Енгаю находятся поля моренных отложений последнего горно-долинного оледенения с большим количеством озер (Шиятов и др., 2005). В пределах экотона верхней границы древесной растительности преобладают чистые лиственничные (*Larix sibirica* Ledeb.) лесотундровые сообщества. В нижней части экотона встречаются лиственничные редколесья и леса с примесью ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и березы извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb.).

Координаты Тылайско-Конжаковско-Серебрянского горного массива – $59^{\circ}32'–59^{\circ}40'$ с.ш. и $59^{\circ}00'–59^{\circ}25'$ в.д. Максимальная высота – 1569 м над ур. м. Массив сложен пироксенитами, дунитами и габбро (Большая советская энциклопедия, 1973), склоны массива глубоко изрезаны речными долинами. Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour), береза извилистая (*Betula tortuosa* Ledeb.) и лиственница Сукачева (*Pinus*

sukaczewii Dyl.) – доминантные виды верхней границы леса на данном массиве (Горчаковский, 1975; Горчаковский, Шиятов, 1985).

Координаты участка земной поверхности, где расположен массив Ирмель, – 54°30′–54°34′ с.ш. и 58°49′–58°54′ в.д. Максимальная высота местности – 1586 м над ур. м. Массив сложен кварцевыми песчаниками, кварцито-песчаниковыми и подчиненными им темно-серыми и черными (углистыми) сланцами. По геоморфологическому строению данный район относится к сопочно-хребтовому рельефу (Цветаев, 1960). Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и береза извилистая (*Betula tortuosa* Ledeb.) являются основными древесными видами, формирующими верхнюю границу леса на Ирмеле. На некоторых участках встречаются другие виды: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.).

В непосредственной близости от районов исследований на Полярном, Северном и Южном Урале нет крупных промышленных предприятий, поэтому уровень аэропромышленного загрязнения является фоновым для региона. Деятельность человека на территории, прилегающей к массиву Рай-Из, до конца XX в. ограничивалась в основном выпасом оленей и сбором грибов и ягод. В настоящее время на территории, прилегающей к району исследований, проводится добыча хромитов.

Анализ литературных источников позволил установить несколько эпизодических воздействий на верхнюю часть склона Тылайско-Конжаковско-Серебрянского массива, связанных с разработкой двух медных рудников в первой половине XVIII в. (Чупин, 1877) и геолого-разведочными работами в 70-х годах XX в. (Ипполитов, 1976).

Относительно высокий уровень промышленной эксплуатации лесов в нижней части склона начался с 60-х годов XX в. (Бабаков, 1966; Ипполитов, 1976). Однако описанная выше деятельность не затронула участки массива в районе верхней границы леса.

Массив Ирмель расположен на границе Челябинской области и Республики Башкортостан. Достаточно интенсивная лесопромышленная деятельность наблюдалась во второй половине XX в. на территории, прилегающей к массиву Ирмель со стороны Челябинской области. Многочисленные вырубки видны на ландшафтных фотографиях, выполненных проф. С.Г. Шиятовым с массива Ирмель в 70-х – 80-х годах прошлого столетия.

Все три массива – относительно популярные места отдыха туристов. При восхождении на их вершины, как правило, используется ограниченное количество маршрутов, поэтому данный антропогенный фактор не может существенно повлиять на положение и конфигурацию верхней границы леса.

2.1.3. Древесная растительность, антропогенные воздействия и мезоклимат в районе исследований на Среднем Урале

Для разработки, апробации методик и исследования влияния антропогенных воздействий, в частности аэропромышленных загрязнений, на древесную растительность на Среднем Урале был подобран полигон прямоугольной формы с размерами сторон примерно 45×45 км. В его центральной части расположен Первоуральско-Ревдинский промышленный узел. Основным источником загрязнения атмосферы в данном районе является Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ, г. Ревда). Восточная сторона полигона

исследований примыкает к территории пригородных поселков г. Екатеринбург. Местоположение данного района исследований приведено на схеме в Приложении А. Кроме аэропромышленных загрязнений, на растительность данного района оказывают воздействие автотранспорт и население городов Екатеринбург, Ревды и Первоуральска (рекреационная нагрузка).

В качестве объекта исследований были выбраны отдельные деревья сосны (*Pinus sylvestris* L.) и сосновые древостои искусственного и естественно-го происхождения, произрастающие на разном удалении от СУМЗа. Исследования были проведены на разных уровнях организации живых систем: отдельных органов, организма в целом и популяции. Изучение реакции ростовых характеристик деревьев и реакций фотосинтетического аппарата хвои на действие естественных и антропогенных факторов носило как самостоятельный фундаментальный характер, так и прикладной методический аспект. Последний связан с необходимостью выбора информативных характеристик состояния деревьев и условий измерения их значений при проведении комплексной морфофизиологической оценки состояния как отдельных деревьев, так и древостоев.

В данном районе был проведен анализ взаимного влияния мезоклимата и аэропромышленных загрязнений, а также их комплексное воздействие на ростовые процессы деревьев сосны обыкновенной.

2.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА

2.2.1. Методика анализа изменений значений температуры воздуха и осадков

Изменения температуры воздуха и осадков на Полярном, Северном и Южном Урале исследовали на трех станциях: Салехард, Чердынь и Златоуст. Они имеют одни из наиболее длинных и полных рядов значений метеорологических параметров в Уральском регионе. Высотное расположение станций: Салехард – 15 м, Чердынь – 202 м, Златоуст – 468 м. Данные по среднемесячным значениям температуры воздуха представлены с 1883 по 2000 г., по осадкам – с 1891 по 2000 г. Для анализа рядов величин температуры и осадков описанных выше станций были выбраны следующие временные периоды: год, весенний (март–май), летний (июнь–август), осенний (сентябрь–ноябрь), зимний (декабрь–февраль) сезоны, а также вегетационный (май–август) и холодный (ноябрь–март).

Предварительно были рассчитаны средние величины температур воздуха по описанным выше временным периодам:

$$T = \frac{\sum_{\tau=1}^N t_{\tau} n_{\tau}}{\sum_{\tau=1}^N n_{\tau}}, \quad (1)$$

где T – средняя температура воздуха за период; t_{τ} – среднемесячная температура воздуха; n_{τ} – число дней в месяце, N – число месяцев в расчетном периоде. Аномалии средней температуры воздуха и суммарного количества осадков за каждый год были вычислены как разность между текущим значением и средним в базовом периоде (1961–1990 гг.).

Количественная оценка климатических условий и степени засушливости климата получена с помощью плювиотермического коэффициента, яв-

ляющегося условным показателем обеспечения растений влагой. Коэффициент представляет собой отношение количества выпавших осадков (мм) к сумме средних месячных температур за то же время (Педь, 1975). Выбор этого коэффициента обусловлен тем, что его расчет производится на основе средних месячных значений климатических характеристик. Расчеты были выполнены для трех метеостанций с учетом смещения сроков прохождения вегетационного периода в зависимости от широтного расположения территории. Таким образом, для Салехарда плювиотермический коэффициент вычислен за июнь и за июль–август, а в Чердыни и Златоусте началу и окончанию вегетационного периода соответствуют май–июнь и июль–август.

2.2.2. Методика исследования пространственно-временной динамики климата с учетом рельефа местности

Исследование пространственно-временной динамики климата Уральского региона основано на метеоданных за временной интервал с 1961 по 2000 г., характеризующий текущий или современный климат. Помимо указанных выше периодов (сезонов года, вегетационного и холодного), рассмотрены данные за каждые год, десятилетие и двадцатилетие.

Для анализа изменения температуры воздуха на Урале были выбраны 126 метеорологических станций. У некоторых станций в рядах метеоданных отсутствовали значения. Они были восстановлены с использованием статистических закономерностей. Восстановление проводили для метеостанций, имеющих статистически значимые линейные зависимости от близлежащих станций, со схожим высотным расположением и необходимыми значениями температуры. Коэффициенты детерминации почти всех линейных моделей были выше 90,4%. Исключение составили только четыре метеостанции: для трех из них величина R^2 была больше 62,9%, а для оставшейся – более 83,9%. После процедуры восстановления массив метеоданных был поделен на тестовую и обучающую выборки по 30% и 70 % от общего числа метеостанций в каждой соответственно. На основе данных обучающей выборки для каждого временного периода были построены множественные линейные регрессионные модели следующего вида:

$$T = a_0 + a_1 \text{long} + a_2 \text{lat} + a_3 \text{dem}, \quad (2)$$

где T – средняя температура за период; a_0 – свободный член; a_1 , a_2 , a_3 – коэффициенты при переменных; long – долгота, в.д.; lat – широта, с.ш.; dem – высота над уровнем моря. Данные модели позволяют реконструировать температуру воздуха в районе исследований.

Для представленных в работе средних температур воздуха по десятилетиям и двадцатилетиям коэффициенты детерминации моделей множественной регрессии $R^2 > 88,16\%$. Сдвиг среднего значения колеблется от 0,14 °C до 0,20 °C, в последнее десятилетие возрастая до 0,32 °C. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) лежит в пределах от 0,54 до 0,70 (Савельева и др., 1999).

В геоинформационной системе (ГИС) с использованием полученных уравнений были рассчитаны растры, ячейки которых содержат значения температуры воздуха. В качестве входных параметров модели были взяты цифровая модель рельефа Уральского региона (высота над уровнем моря), а также растры с ячейками, содержащими значения широты и долготы.

Для оценки изменения температуры в пространстве по десятилетиям и двадцатилетиям были получены дополнительные климатические карты, которые были рассчитаны в ГИС как разность растров температур двух соседних десятилетий или двадцатилетий соответственно.

Анализ распределения осадков на территории Урала проводился по данным 31 станций, расположенных на Северном и Среднем Урале. Только эти станции имеют полные ряды данных. Восстановление пропущенных значений на других метеостанциях не проводилось, так как величины сумм осадков на соседних станциях, как правило, слабо коррелируют между собой. Обработка данных заключалась в осреднении по десятилетним и двадцатилетним периодам суммарных годовых значений выпадающих осадков. Распределение осадков по территории Уральского региона также представлено в виде карт, на которых условными знаками показана динамика средних суммарных значений климатического показателя за указанный период.

Для описанных выше станций, по которым была получена полная информация о величинах температур и осадков, были рассчитаны пространственно осредненные среднегодовые аномалии и среднеквадратичные отклонения. При расчете плювиотермического коэффициента началом вегетационного периода были выбраны май–июнь с окончанием в июле–августе.

Пространственный анализ был выполнен с использованием географической информационной системы ARC/INFO (ESRI Inc., США). Математико-статистическая обработка проведена с помощью статистического пакета R (R core team, www.r-project.org).

2.3. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА

2.3.1. Методика сбора и обработки данных по древесной растительности на верхнем пределе ее распространения

Источником данных о положении границы леса на Полярном Урале в XX в. служили тематические карты лесотундровых сообществ (Шиятов и др., 2005). Для их создания в районе исследований С.Г. Шиятовым и М.М. Терентьевым было произведено описание современной и прошлой лесотундровой растительности по специально разработанной методике. Для каждого выдела были реконструированы состав и структура древостоя на начало 1960-х годов. Реконструкция была выполнена на основе анализа морфологической и возрастной структуры древостоев, использования описаний и перечетов деревьев на постоянных пробных площадях и профилях, заложенных в 1960–1962 гг., а также сравнительного анализа ландшафтных фотографий, сделанных 35–45 лет тому назад. Созданная геоинформационная база данных содержала информацию о расположении и конфигурации выделов, а также описания фитоценозов.

Количественная оценка пространственно-временного сдвига верхних границ распространения редколесий и сомкнутых лесов была произведена на основе полученных ранее тематических геоботанических карт масштаба 1:25 000, которые показывают распределение различных типов лесотундровых сообществ в начале 1960-х и 2000-х годов. Так как для данного района характерно островное расположение лесотундровых сообществ, особенно в

верхней части экотона верхней границы леса, то для получения непрерывной кривой, показывающей положение верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в рассматриваемые моменты времени, фронтальные границы самых верхних островков и массивов лесов были соединены между собой линией по кратчайшему пути или по изолинии определенной высоты. Небольшие островки редколесий, произрастающие у подножия гор Черной и Мал. Черной и удаленные от них на 0,5–2,0 км, при проведении границы не использовали. Если на участке склона выше сомкнутого леса отсутствовало редколесье, то принималось допущение, что граница редколесий совпадает с границей сомкнутого леса.

В 1956 г. С.Г. Шиятов исследовал состав, структуру и высотное положение верхней границы редколесий (мелколесий) на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве (Горчаковский, Шиятов, 1970). Под верхней границей редколесий понималась линия, до которой поднимаются лесные сообщества, сомкнутость крон древостоев которых была не менее 15–20%. Высотное положение этой границы было определено при помощи барометрического нивелирования и топографической карты М 1:100 000. Одновременно было произведено глазомерное описание состава и структуры древостоев, произрастающих в пределах верхней полосы редколесий шириной 50–100 м по следующим показателям: состав древостоя (по запасу стволовой древесины), сомкнутость крон, средняя высота и диаметр древостоя и отдельных видов деревьев, направление флагообразности крон. Верхняя полоса редколесий была разделена вдоль склона на однородные по составу и структуре выделы, при этом новый выдел выделялся при изменении состава древостоя на единицу и более. Всего было описано 124 выдела, абсолютная высота определена на 136 точках.

В 2005 г. Д.С. Капраловым и П.А. Моисеевым на данном горном массиве были проведены полевые работы для оценки изменений, которые произошли в составе, структуре и высотном положении верхней границы редколесий за последние 50 лет. При проведении исследований использовалась топографическая карта масштабом М 1:25 000, на которую предварительно была нанесена информация, полученная в 1956 г. (высотное положение верхней границы мелколесий, границы выделов, состав древостоев, высоты точек барометрических замеров). Местонахождение этих выделов и точек на местности были определены при помощи топографической карты, барометрического высотомера и приемника системы глобального позиционирования (GPS). При повторном описании редколесий на выделах 1956 г. выяснилось, что за последние 50 лет верхняя граница редколесий с сомкнутостью крон древостоев более 15–20% поднялась выше в горы на большинстве склонов. В связи с этим были проведены работы по картированию и описанию современной границы редколесий по методике 1956 г. Для оценки изменений, которые произошли на исследуемых участках, широко использовались повторные ландшафтные фотоснимки с тех же точек, с которых они были сделаны С.Г. Шиятовым в 1956, 1957 и 1969 гг.

При анализе верхней границы леса на массиве Иремель в 1973 г. С.Г. Шиятов изучал состав, структуру и высотное положение верхней границы редколесий горных вершин этого массива с использованием методики, описанной при проведении работ на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве. В ходе картирования верхняя полоса редколесий бы-

ла разделена вдоль склона на однородные по составу и структуре выделы. Основным критерием для разграничения выделов служило изменение состава древостоя на единицу и более. Всего описано 68 выделов, абсолютная высота определена на 106 точках.

В 2006 г. были выполнены повторные полевые исследования для оценки изменений, которые произошли в составе, структуре и высотном положении верхней границы редколесий за последние 33 года. При проведении работ была использована топографическая карта М 1:100 000, на которую предварительно нанесли информацию, полученную в 1973 г. (высотное положение верхней границы редколесий, границы выделов, состав древостоев, высоты точек барометрических замеров). Местоположение выделов и точек прошлого периода исследований на местности было определено при помощи топокарты и приемника GPS.

2.3.2. Методика количественной оценки вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы леса

Анализ пространственно-временной динамики верхней границы сомкнутого леса был проведен с использованием геоинформационной системы ARC/INFO. Источником данных о расположении верхней границы сомкнутого леса в середине и конце XX в. в районе исследований на Южном Урале служили топографические карты масштабов 1:50 000 и 1:100 000, созданные соответственно в 1960 и 1990 гг. Для анализа сдвига границы леса в районе исследований на Северном Урале были использованы лесостроительные карты масштаба 1:25 000, созданные в 1955–1956 и 1998 гг. Оригиналы карт были отсканированы и конвертированы в растровый формат GRID ГИС ARC/INFO, а затем проведена геопривязка растровых покрытий (слоев). На их основе цифрованием были созданы электронные слои, содержащие информацию о расположении и конфигурации границы леса в исследуемых массивах.

Цифровые модели рельефа (ЦМР) для каждого района исследований были созданы в ГИС ARC/INFO на основе топографических карт районов исследований масштаба 1:100 000. Оригиналы карт были отсканированы и геопривязаны в ГИС. На основе каждой геопривязанной карты цифрованием были созданы электронные покрытия, содержащие изолинии, отметки высот и объекты гидрологии. При помощи алгоритма TOPOGRID были созданы гидрологически корректные цифровые модели рельефа. Они были использованы при анализе изменения высотного положения границы сомкнутого леса. Для районов исследований на Северном и Южном Урале размер ячеек ЦМР составляет 30×30 м, размер ячейки ЦМР на Полярном Урале равен 10×10 м.

Для оценки вертикального смещения границы леса линейные слои границ в начале и конце исследуемого периода были растеризованы и наложены на цифровую модель рельефа в ГИС. Информация о высоте каждой ячейки растрового слоя границ была получена с цифровой модели рельефа. На основе этих данных были построены гистограммы распределения высот верхней границы леса в начале и конце исследуемого периода. Статистики полученных распределений были использованы для оценки величины вертикального смещения границы за исследуемый период. Схема, иллюстрирующая алгоритм оценки вертикального сдвига, изображена на рис. 4.

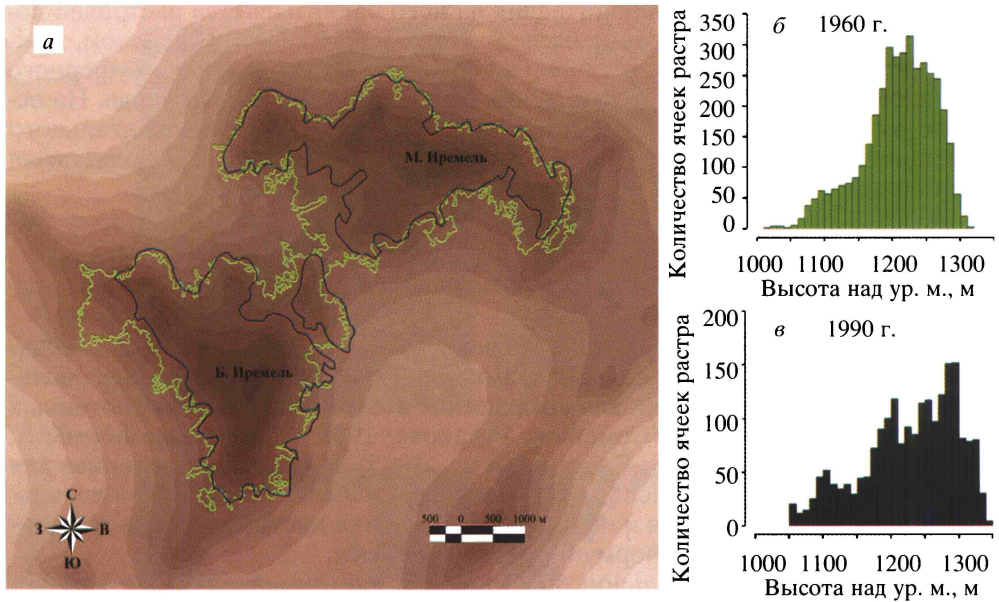


Рис. 4. Карта-схема, иллюстрирующая алгоритм расчета вертикального сдвига верхней границы леса.

а – изображение цифровой модели рельефа местности с наложенными на нее линиями границы леса в 1960 г. (зеленая линия) и 1990 г. (синяя линия), *б, в* – гистограммы распределения значений высот ячеек цифровой модели рельефа, соответствующих положению границы леса в начале и конце исследуемого периода

Для оценки горизонтального смещения границы был разработан алгоритм, а иллюстрирующая его схема представлена на рис. 5. От линии, характеризующей положение верхней границы леса в начале исследуемого периода, были построены буферные области. Буфер – это область, граница которой удалена от каждой точки исходной линии на заданное расстояние. В качестве исходной линии используется линия границы леса в начале исследуемого периода. Величины буферов кратны размеру ячейки цифровой модели рельефа района исследований. В результате проведения данной процедуры получается слой, содержащий буферные области, последовательно сменяющие друг друга.

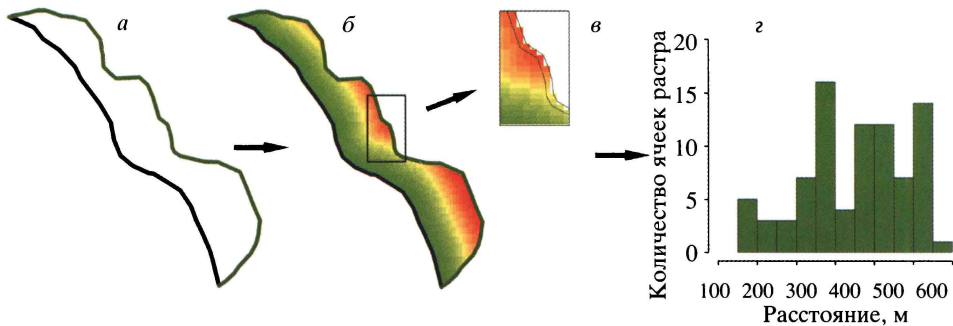


Рис. 5. Схема, иллюстрирующая алгоритм оценки горизонтального сдвига верхней границы леса:

а – положение границы леса в начале и конце исследуемого периода; *б* – изображение раstra горизонтального смещения с границами леса; *в* – наложение растеризованной линии границы леса в конце исследуемого периода на растр горизонтального смещения; *г* – гистограмма распределения величины горизонтального смещения

После растеризации данного слоя на него накладывается растровое покрытие границы леса в конце исследуемого периода. Таким образом, каждой ячейке границы леса в конце периода соответствует ячейка буферного слоя, содержащая величину смещения от границы в начале периода. На основе этих данных строится гистограмма распределения горизонтального смещения верхней границы леса. Статистики распределения используются для количественной оценки величины ее горизонтального сдвига.

2.4. МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЬЕВ ПО ЦИФРОВЫМ ФОТОГРАФИЯМ ИХ КРОН

Визуальная оценка состояния древостоев активно используется специалистами лесного хозяйства и экологами при проведении санитарного обследования лесов и оценке уровня воздействия естественных и антропогенных факторов на древостой (Семенюк, Рудакова, 1988; Санитарные нормы..., 1998; Muller, Stierlin, 1990; Власенко и др., 1995). В качестве критериев для отнесения дерева к определенной категории жизненного состояния используются степень пожелтения и покраснения хвои или листвы, степень дефолиации кроны, а также ее форму и протяженность.

Преимущества визуальной оценки перед инструментальными измерениями и комплексной морфофизиологической оценкой состояния древостоев (Shavnin et al., 1997) заключаются в относительной простоте определения состояния, высокой скорости проведения работ и их относительной дешевизне, а недостатки – в субъективности оценок и трудности определения промежуточных категорий ослабленности деревьев. Современный уровень развития технологий анализа изображений и программно-аппаратной базы позволяет в значительной степени избавиться от этих недостатков.

Для решения описанных выше проблем был разработан автоматизированный метод оценки состояния деревьев по цифровым фотографиям кроны с использованием компьютерной системы анализа изображений. При оценке состояния дерева предлагается использовать фотографию всей кроны (для отдельно стоящих деревьев) или верхней ее части (для деревьев в древостое). Крона не должна перекрываться кронами других деревьев.

При разработке методики были использованы фотографии отдельных деревьев с разной степенью повреждения кроны, которые были получены с использованием цифровой зеркальной фотокамеры Canon EOS 350D. Алгоритм обработки и анализа изображений реализован в программном модуле, созданном на базе платформы SIMAGIS (SIAMS (Россия) и Smart Imaging Technologies (США)). Данный программный продукт представляет собой систему анализа изображений, разработанную по технологии электронных таблиц. Ниже приведено краткое описание алгоритма.

Исходное изображение преобразуется в бинарное (черно-белое) с помощью функции «пороговая сегментация» по значениям интенсивности. Использование данной функции позволяет отделить крону от окружающего ее фона. Затем производится обработка маски кроны дерева – удаляются мелкие частицы, не относящиеся к кроне, и закрываются просветы в кроне. На рис. 6 приведены изображения, полученные на различных этапах обработки исходной фотографии.

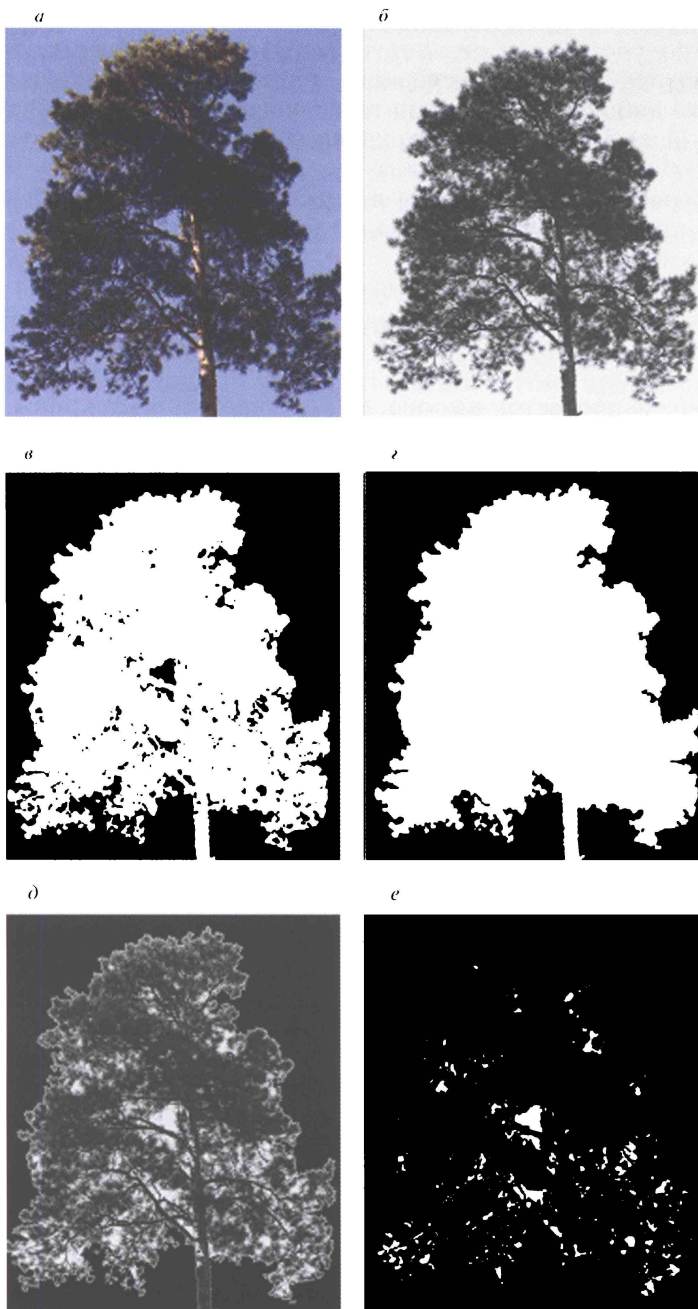


Рис. 6. Этапы обработки изображения:
a – исходное изображение; *б* – извлечение цветовой компоненты (интенсивность);
в – пороговая сегментация (выделение маски кроны); *г* – выделение силуэта кроны;
д – подготовка изображения для выделения просветов в кроне (результат вычитания из изображения *б* силуэта кроны *г*); *е* – выделение просветов в кроне

На следующем этапе производится выделение просветов в кроне. К изображению, полученному в результате вычитания инвертированного изображения силуэта кроны из исходного, применяется функция «пороговая сегментация» либо по значениям интенсивности, либо по синей цветоразности (chroma-blue). Для визуального контроля результатов выделения силуэта кроны и просветов в ней используется функция «наложение маски», которая накладывает маски силуэта и просветов на исходное изображение. Отношение площади силуэта кроны к площади просветов в ней характеризует степень дефолиации (D_d):

$$D_d = \frac{S_g}{S_c}, \quad (3)$$

где S_g – площадь просветов в кроне, S_c – площадь силуэта кроны.

Силуэт кроны угнетенного дерева обычно более изрезан по сравнению с силуэтом кроны дерева в хорошем состоянии. Степень изрезанности границ объекта характеризует круглый фактор формы, который определяется как отношение периметра круга, площадь которого равна площади выделенного объекта, к периметру объекта:

$$f = 2 \frac{\sqrt{\pi S}}{P}, \quad (4)$$

где S – площадь круга, равная площади объекта; P – периметр объекта.

При увеличении степени изрезанности кроны значение круглого фактора формы снижается. Для того чтобы изменения степени дефолиации и параметра, характеризующего форму кроны, носили однонаправленный характер, используется параметр, условно названный индекс формы (I_f):

$$I_f = 1 - f. \quad (5)$$

В качестве интегрального параметра, характеризующего состояние дерева, предлагается использовать среднее геометрическое от степени дефолиации и индекса формы (I_s):

$$I_s = \sqrt{DI_f}. \quad (6)$$

Среднее геометрическое более «чувствительно» к небольшим значениям входящих в него характеристик. Его использование по сравнению со средним арифметическим позволяет получать более значительные отличия между величинами индекса состояния для деревьев с промежуточным жизненным состоянием.

Значения всех описанных выше параметров лежат в пределах от нуля до единицы. Время обработки одного изображения с настройкой значений параметров функций лежит в диапазоне от несколько секунд до нескольких минут.

Разработка алгоритма обработки и тестирование автоматизированной методики оценки состояния дерева были выполнены на оригинальных фотографиях, а также 32 фотографиях деревьев *Picea abies* Karst, *Abies alba* Mill, *Larix decidua* Mill и *Pinus sylvestris* L., полученных в ходе выполнения научно-исследовательского проекта по визуальной оценке состояния лесов Европы SUNUSILVA (Muller, Stierlin, 1990). Европейские исследователи вы-

деляли четыре градации угнетения дерева по степени дефолиации кроны. Степень угнетения выражали в процентах в диапазоне от 0 до 75. При анализе состояния дерева также учитывали форму кроны и тип ветвей первого и более высокого порядков.

При получении фотографий были выполнены следующие условия. Крона дерева не должна пересекаться с кронами других деревьев. На фотографиях должна быть видна часть кроны от верхушки до нижних зеленых ветвей. Фотосъемка должна производиться в солнечную погоду в дневное время суток в июле–августе.

В табл. 1 приведены результаты визуальной оценки состояния четырех видов деревьев по 16 фотографиям, полученным в ходе выполнения проекта SUNASILVA, и автоматизированной оценки с использованием описанной выше методики. Эти данные свидетельствуют о том, что разработанный метод позволяет успешно определять категории жизненного состояния деревьев. При этом величина расхождений между категориями при автоматизированной оценке ниже, чем при визуальной, т. е. при визуальном наблюдении происходит завышение степени угнетения деревьев.

Использование цвета хвои или листвы для оценки состояния дерева в рамках описанного выше подхода также возможно. При этом лучше использовать фотографии не всей кроны, а отдельных ее ветвей или хвои (листвы).

Достаточно высокая точность оценки, объективность определения степени угнетения дерева в сочетании с высокой скоростью обработки изображений позволяет утверждать, что разработанный автоматизированный метод оценки его жизненного состояния превосходит метод визуальной оценки по данному показателю. Предлагаемая методика может быть использо-

Таблица 1

Результаты визуальной и автоматизированной оценки состояния деревьев

Вид	Визуальная оценка, %	Автоматизированная оценка, отн. ед.		
		Степень дефолиации	Индекс формы	Индекс состояния
<i>Abies alba</i> Mill	0	0,15	0,54	0,28
<i>Abies alba</i> Mill	30	0,17	0,58	0,31
<i>Abies alba</i> Mill	50	0,37	0,73	0,52
<i>Abies alba</i> Mill	70	0,44	0,76	0,58
<i>Picea abies</i> Karst	5	0,09	0,74	0,26
<i>Picea abies</i> Karst	30	0,18	0,73	0,37
<i>Picea abies</i> Karst	40	0,25	0,76	0,43
<i>Picea abies</i> Karst	60	0,40	0,82	0,60
<i>Larix decidua</i> Mill	0	0,16	0,75	0,34
<i>Larix decidua</i> Mill	25	0,29	0,82	0,49
<i>Larix decidua</i> Mill	50	0,32	0,86	0,52
<i>Larix decidua</i> Mill	75	0,46	0,87	0,64
<i>Pinus sylvestris</i> L.	5	0,18	0,67	0,35
<i>Pinus sylvestris</i> L.	25	0,23	0,76	0,42
<i>Pinus sylvestris</i> L.	45	0,30	0,78	0,48
<i>Pinus sylvestris</i> L.	75	0,53	0,83	0,66

вана при проведении экологического мониторинга, лесоустроительных работ и в лесном хозяйстве.

2.5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Современные системы анализа изображений представляют собой совокупность функционально объединенных устройств (устройство для получения изображения (микроскоп, видеокамера, фотоаппарат), видеотракт, управляющая и обрабатывающая программа), которые широко применяются в материаловедении (Гроховский, 2001; Веселов и др., 2005), медицине и биологии (Mangin et al., 2004; Chen et al., 2005; Stein et al., 2006), а также в других областях науки и человеческой деятельности (Scott et. al., 2003; Drăguț, Blaschke, 2006). Такие системы являются неотъемлемой частью многих методов измерений при исследовании объектов и контроле качества материалов. Они также широко применяются за рубежом, поэтому для их использования разработаны стандарты (BS 3406-4:1993; ASTM E 1245-03; ISO 13322-1:2000). В нашей стране уровень методического и нормативного обеспечения измерений с использованием таких систем все еще недостаточно высокий.

Методики выполнения измерений (МВИ), основанные на автоматизированном анализе изображений, более производительны и менее субъективны по сравнению с ручными МВИ или экспертными методами оценок, но их применение, особенно в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора (ГМКиН), без аттестации неправомерно (ФЗ РФ № 4871-1 «Об обеспечении единства измерений» от 27 апреля 1993 г.).

Аттестация методик выполнения измерений – процедура установления и подтверждения соответствия МВИ предъявляемым к ней метрологическим требованиям (ГОСТ Р 8.563-96). Цель аттестации – определение гарантированных метрологических характеристик погрешности измерений (Мигачев, 1997). Эта процедура позволяет избежать при выборе методик двух вероятных ошибок – завышения и занижения точности измерений. Каждая из этих ошибок влечет за собой ряд негативных последствий (Сычев, 1997).

Доля МВИ, основанных на автоматизированном анализе изображений, которые потенциально могут быть применимы в сферах ГМКиН, довольно велика, но лишь малая их часть прошла процедуру аттестации. Это связано прежде всего с тем, что порядок оценки всех составляющих погрешности таких МВИ еще недостаточно проработан. Среди факторов, являющихся причиной появления погрешности, можно выделить настройки оборудования, условия получения изображений и работу операторов.

Оператор при анализе изображения выступает в качестве эксперта, и результаты его работы во многом зависят от качества изображения. Влияние некоторых искажающих изображения факторов он может компенсировать внесением изменений в параметры настройки программы его обработки. Если он не может устранить влияние фактора, то результаты измерений нельзя признать достоверными. В этом случае проводить работы по определению показателей точности (правильности и прецизионности) не имеет смысла до тех пор, пока действие искажающего фактора не будет устранено или минимизировано.

В данном разделе приведены результаты исследований по разработке универсального подхода к выявлению уязвимых сторон и недостатков

МВИ, основанных на использовании систем автоматизированного анализа изображений, а также оценка показателей точности МВИ. В качестве объекта для апробирования предлагаемого подхода выбрана описанная выше программа для анализа состояния деревьев по цифровым фотографиям их крон: "Tree State Assessment".

Исследуемое программное решение является полуавтоматическим. Это означает, что оператору необходимо подбирать значения параметров настройки обработки изображения. У него имеется также возможность редактировать описанные выше маски измеряемых объектов вручную. Ручное редактирование используется только в том случае, если подбором параметров настройки обработки изображения не удастся достичь надлежащего качества выделения масок.

Точность МВИ определяется, во-первых, условиями получения изображения (в том числе настройками фото- и видеокамеры), а во-вторых, действиями оператора при его обработке. Поэтому предлагаемый подход содержит два этапа.

На первом этапе проводится анализ факторов, определяющих условия съемки и настройки аппаратуры для получения изображения, их ранжирование по степени влияния на качество изображения исходя из априорной информации. После этого для каждого выбранного для анализа фактора устанавливается диапазон допустимого варьирования его значений.

Далее выполняются исследования с применением методов планирования эксперимента. Проводится фотосъемка объекта при двух уровнях факторов с учетом всех их возможных комбинаций. По результатам измерений строится математическая модель вида

$$p = b_0 + k_1x_1 + \dots + k_nx_n + k_{12}x_1x_2 + \dots + k_{n-1n}x_{n-1}x_n + \dots + k_1k_2\dots k_nx_1x_2\dots x_n, \quad (7)$$

где в качестве зависимой переменной выступает параметр оптимизации, определяемый по формуле (8), а независимыми переменными являются факторы (x_1, x_2, \dots, x_n) :

$$p_i = \frac{y_i - y_{\text{опорное}}}{y_{\text{опорное}}} 100\%, \quad (8)$$

где $y_{\text{опорное}}$ – опорное значение, y_i – результат i -го измерения.

В качестве опорного было принято среднее значение нескольких результатов обработки изображения, полученного в наилучших с точки зрения исследователя условиях (сфокусированное, снятое при хорошем освещении с высоким разрешением и контрастом). Его обработку проводил наиболее компетентный оператор. Из всех предлагаемых в стандарте (ГОСТ Р ИСО 5725-2002, п. 3.5) способов получения принятого опорного значения только описанный выше способ пригоден для данного объекта измерения.

Параметр оптимизации позволяет легко интерпретировать результаты эксперимента. Он представляет собой относительное отклонение результата измерений (в процентах), полученного при данном сочетании уровней факторов, от опорного значения. Параметр оптимизации стремится к нулю при приближении результата измерения к опорному значению. О степени влияния соответствующего фактора на параметр оптимизации судят по ве-

личине коэффициентов регрессии. Значимость коэффициентов при факторах показывает, что оператор при помощи параметров настроек программы обработки изображения не может уменьшить их влияние.

Итогом первого этапа является выдача рекомендаций по выбору условий съемки для устранения влияния значимых факторов. Проведение такого исследования позволяет выбрать оптимальные настройки аппаратуры для получения изображений меньшего объема при сохранении требуемого качества. Это существенно влияет на скорость их обработки и играет важную роль при хранении цифровых фотографий на различных носителях информации.

Разрабатываются также рекомендации по выбору значений параметров настройки программы, способствующие уменьшению параметра оптимизации. В этом случае оператор, проводя настройку, может контролировать качество выделения маски не только визуально, но и руководствуясь формализованными критериями, что позволяет уменьшить изменчивость результатов измерений, связанную с работой операторов.

Второй этап заключался в оценке показателей точности (правильности и прецизионности) в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Фотографирование тестового объекта было произведено цифровой зеркальной фотокамерой Canon EOS 350D. При фотосъемке изменяли следующие настройки фотоаппарата: разрешение, контраст и резкость. В соответствии с матрицей планирования эксперимента для измерений и анализа были сделаны фотографии при максимальных и минимальных значениях описанных выше параметров фотокамеры, которые при построении модели принимали кодированные значения -1 и 1 . Для проверки адекватности модели были сделаны фотографии объекта (тестовая выборка) при нулевых уровнях (средних значениях настроек фотоаппарата) факторов.

Фактор «условия съемки» трудно формализуем, так как представляет собой сочетание условий среды, которые определяют освещенность исследуемого объекта. Фотосъемка была выполнена с 8.30 ч до 9.00 ч и с 12.30 ч до 13.00 ч в солнечную погоду при отсутствии облачности. Освещенность измеряли под пологом леса люксметром Ю16 с селеновым фотоэлементом Ф102 – она составила 14 и 90 лк для утренней и дневной съемок соответственно. Полученные фотографии были обработаны при помощи описанной выше методики. Статистическая обработка произведена в статистическом пакете «R».

В табл. 2 приведены параметры множественной регрессионной модели, которая устанавливает зависимость величины параметра оптимизации (за-

Таблица 2

Коэффициенты множественной регрессионной модели, устанавливающей взаимосвязь величины параметра оптимизации, характеристик настройки фотокамеры и условий фотосъемки

Параметры модели	Значения коэффициентов, отн. ед.
Свободный член (b_0)	8,8
Условия съемки (x_1)	-4,6
Разрешение (x_2)	-1,7
Резкость (x_3)	-2,6
Условия съемки и разрешение (x_1x_2)	1,1
Разрешение и резкость (x_2x_3)	1,0
Условие съемки, разрешение и контраст ($x_1x_2x_4$)	-1,0

висимая переменная) и характеристик настройки фотокамеры, а также условий фотосъемки. Коэффициент детерминации (R^2) модели равен 0,93. Все коэффициенты при переменных статистически значимы на уровне $\alpha < 0,05$. Величина коэффициента позволяет оценить вклад параметра оптимизации (отклонение от опорного значения) в процентах. Опорное значение было выбрано с использованием априорной информации об изображении наилучшего качества (величины всех уровней факторов равны 1). Эмпирические значения параметра оптимизации лежат в интервале 0–20,2%. По величинам отклонений экспериментальных значений, полученных на тестовой выборке, от расчетных была рассчитана среднеквадратическая ошибка (RMSE), значение которой равно 3,0%.

Линейные эффекты данной модели хорошо интерпретируются. При улучшении условий съемки, увеличении разрешения и резкости значение параметра оптимизации уменьшается. Интерпретация эффектов взаимодействия не так однозначна. При их анализе рекомендуется учитывать знаки линейных эффектов соответствующих факторов. Если эффект взаимодействия имеет знак плюс, а линейные эффекты отрицательны, то следует выбирать сочетание -1 и -1 (Адлер и др., 1976). Это означает, что при уменьшении значений факторов, например при снижении разрешения и уменьшении резкости, величина ошибки измерения увеличивается.

Для интерпретации эффекта взаимодействия трех факторов произведение двух из них можно условно считать одним фактором, т. е. тройное взаимодействие сводится к парному. Для взаимодействия условий съемки, разрешения и контраста два последних фактора рассматриваются как один, причем знаки при x_1 и x_1x_4 (положительный коэффициент при данном факторе незначим, поэтому в табл. 2 не приведен) разные. В этом случае рассматривают величины коэффициентов и учитывается больший из них (Адлер и др., 1976). В нашем случае учитывается фактор «условия съемки». Таким образом, при улучшении условий съемки сочетание данных факторов приводит к снижению ошибки измерения.

Анализ данных табл. 2 позволил установить, что наибольшее влияние на величину параметра оптимизации оказывают «условия съемки» – 4,6 %. Статистическая значимость коэффициента при факторе «контраст» была ниже требуемой, однако данный фактор влияет на параметр оптимизации в сочетании с условиями фотосъемки и разрешением. Их совместный вклад в величину параметра составляет наименьшее из всех рассмотренных значений – 1,0%. При проведении фотосъемки с настройками разрешения, контраста и резкости на уровне, который соответствует кодированному значению 0 ($x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0$), оценкой величины неучтенных факторов, в том числе влияние оператора, является значение коэффициента b_0 , равное 8,8%.

Модель позволяет сформулировать дополнительные рекомендации по проведению фотосъемки для устранения влияния наибольших по величине факторов. В первую очередь это относится к условиям съемки. Для снижения влияния данного фактора можно рекомендовать проводить фотосъемку в интервале с 11 до 14 ч дня в ясную солнечную погоду.

Показатели точности (правильности и прецизионности) оценивали в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. В эксперименте принимали участие шесть операторов. Каждый из них выполнил пять измерений на четырех изображениях деревьев, которые произрастали в условиях с разным уров-

нем загрязнения атмосферы промышленными выбросами медеплавильного завода. Затем был проведен графический анализ совместимости результатов измерений. Из дальнейшего анализа были исключены значения, признанные выбросами. На основании полученных данных были рассчитаны дисперсии повторяемости и воспроизводимости, а также проведена оценка величины систематической погрешности метода измерений. Значения систематической погрешности измерений по отношению к соответствующим принятым опорным значениям лежат в интервале от 1 до 7%.

Разработанный подход по выявлению недостатков МВИ и определению показателей их точности является универсальным и может быть использован при исследовании методик выполнения измерений по изображениям, полученным на макро- и микроуровнях.

2.6. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОМПЛЕКСНОЙ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЬЕВ И ДРЕВОСТОЕВ

2.6.1. Методики исследования реакции фотосинтетического аппарата хвои (*Pinus sylvestris* L.) на действие естественных и антропогенных факторов

Характеристики фотосинтетического аппарата хвои сосны обыкновенной, сформировавшейся в условиях с разными уровнями освещенности и загрязнения атмосферы промышленными выбросами, были изучены путем сравнения пигментного состава хвои и световых кривых параметров быстрой флуоресценции хлорофилла *a*. В качестве объекта исследования была использована хвоя деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на разном расстоянии от Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ, г. Ревда). Временные пробные площади (ВПП) – участки лесных насаждений, на которых был произведен сбор образцов, располагались на расстояниях 4,1 км (ВПП 7) и 13, 2 км (ВПП 33) в направлении доминирующих ветров, а контрольный участок (ВПП 20) – на удалении 18,9 км в противоположном направлении.

Согласно полученным ранее данным (Shavnin et al., 1997), ВПП 20 находится в фоновом (наименее загрязненном) районе, а ВПП 7 и ВПП 33 – в зонах с сильным и средним уровнями загрязнения соответственно. Зоны с различной степенью угнетения насаждений были выделены на основании измерений комплекса ростовых характеристик деревьев. ВПП сходны по лесорастительным условиям, составу древесных пород, возрасту (около 20 лет) и густоте древостоев. Исследования были проведены в конце сентября, что соответствует на Среднем Урале периоду перехода сосны в состояние покоя (Мамаев, Шавнин, 1976).

Для лабораторного изучения были срезаны побеги предыдущего года закладки из верхней, средней и нижней частей крон деревьев южной экспозиции. При помощи флуориметра РАМ-2000 (Walz, Германия) измеряли параметры быстрой флуоресценции хлорофилла *a* (Бухов, 1997) хвои, не отделенной от побегов. Четыре хвоинки каждого образца были вставлены в листодержатель (Leaf-Clip-Holder 2030-B, Walz, Германия), оборудованный квантовым сенсором для измерения фотосинтетически активной радиации (ФАР). Площадь исследуемого участка составляла 0,5 см². Интенсивность измерительного света не превышала 1 мкЕ/(м²·с). Актиничный свет ступен-

часто увеличивался от 0 до 180 мкЕ/(м²·с). Первое измерение флуоресцентных параметров было проведено после получасового периода темновой адаптации, а последующие – через 5 мин после изменения уровня освещения. Квантовый выход (Y), коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции (qN) и скорость фотосинтетического электронного транспорта (ETR) были рассчитаны по формулам (Snell et al., 1991; Schreiber, Bilger, 1993).

Содержание хлорофиллов a и b в хвое определяли путем экстрагирования 80%-ным раствором ацетона с последующим измерением оптической плотности экстракта на спектрофотометре СФ-46 (ЛОМО, Россия) на длинах волн 649 и 665 нм. Концентрации пигментов были рассчитаны по уравнениям Вернона (Гродзинский А., Гродзинский Д., 1973), а их количество – на абсолютно сухую хвою.

При определении валового содержания серы в хвое использовали методику, описанную в работе Ю.И. Маслова (1978). Сухой растительный материал сжигали в смеси концентрированной хлорной и азотной кислот. Избыток HNO_3 , мешающий определению, был удален восстановлением, а сера осаждена в присутствии детергента «твин 80» в виде $BaSO_4$. Концентрация последнего была определена турбидиметрически при помощи фотоэлектроколориметра КФК-2 МП (ЗОМЗ, Россия).

Измерение флуоресцентных характеристик было проведено в трех, а содержания пигментов в хвое – в трех-шести биологических повторностях по каждому ярусу кроны. Содержание серы в растительном материале измеряли в трех аналитических повторностях для средней пробы на каждый ярус.

2.6.2. Методики изучения взаимного влияния аэропромышленных загрязнений и мезоклимата и их действие на ростовые процессы деревьев сосны обыкновенной

Для изучения взаимного влияния аэропромышленных загрязнений и мезоклимата, а также динамики ростовых процессов деревьев, произрастающих в зонах с разным уровнем загрязнения атмосферы промышленными выбросами, были заложены три постоянные пробные площадки (ППП) на разном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода. Контрольная пробная площадка (ППП 4) располагалась в зоне с фоновым уровнем загрязнения атмосферы промышленными выбросами на удалении 19,1 км в юго-западном направлении от СУМЗа. Вторая пробная площадка (ППП 12) была заложена в импактной зоне на расстоянии 1,8 км в западном направлении от завода. Дополнительная контрольная площадка (ППП 16) находилась на удалении 57,5 км в западном направлении от СУМЗа в районе г. Михайловска.

Экологическое зонирование территории, прилегающей к Ревдинско-Первоуральскому промышленному узлу, было проведено ранее. Так как отдельные пробные площадки действующей сети наблюдений были задействованы при выполнении данных исследований, была использована уже существующая нумерация постоянных пробных площадей. На каждой из них были измерены диаметры всех деревьев сосны и составлено лесоводственно-таксационное описание. Характеристики древостоев пробных площадей приведены в табл. 3. На основе данных перечета деревьев на каждой пробной площадке произведена выборка 18–19 модельных деревьев с диаметрами, близкими к среднему. У этих деревьев возрастным буравом были взяты керны древесины с западной стороны ствола на высоте 0,3 м от шейки корня.

Таблица 3

Лесоводственно-таксационные характеристики древостоев на постоянных пробных площадях

№ ППП	Румб	Расстояние от СУМЗа, км	Возраст, лет	Средние		Тип ЛРУ
				диаметр, см	высота, м	
4	ЮЗ	19,1	80	36,5	27	331
12	ЮЗ	1,8	88	27,3	20,9	331
16	ЮЗ	57,5	60	30,7	26,9	331

Примечание. Тип ЛРУ – тип лесорастительных условий по классификации Б.П. Колесникова (Колесников и др., 1973).

Дендрохронологические исследования были проведены с учетом методик, изложенных в работах Н. В. Ловелиуса (1979) и С. Г. Шиятова (2000). После измерения ширины годичных колец на полученных образцах были построены индивидуальные древесно-кольцевые хронологии, которые перекрестно датировались с применением автоматизированной системы LINTAB в программном пакете TSAP. Расчет индексов приростов проводился с помощью программ TREND и ARSTAN (Cook, 1985). Годичный индекс прироста для ППП рассчитывали как среднее арифметическое индексов всей совокупности древесно-кольцевых хронологий пробной площади.

Для оценки климата района исследований были использованы данные инструментальных измерений метеорологических станций гг. Михайловск (287 м над ур. м.), Ревда (324 м над ур. м.) и Екатеринбург (280 м над ур. м.) (Метеорологический ежегодник, 1961–2002). Данные инструментальных измерений концентраций взвешенных веществ и диоксида серы на метеопосту, который расположен на удалении 9 км к северу от СУМЗа, представлены ГУ «Свердловский ЦГМС-Р». Для количественного описания климатических условий использован один из специальных гидротермических коэффициентов (Педь, 1975).

Оценку условий увлажнения в первой и второй половинах вегетационного периода производили с помощью плювиотермического коэффициента отдельно для мая–июня (PT_{5-6}) и июля–августа (PT_{7-8})

$$PT_{5-6} = \sum_{i=5}^{i=6} R_i / \sum_{i=5}^{i=6} t_i, \quad (9)$$

$$PT_{7-8} = \sum_{i=7}^{i=8} R_i / \sum_{i=7}^{i=8} t_i, \quad (10)$$

где R_i – количество осадков (мм) в i -м месяце, а t_i – сумма средних месячных температур в i -м месяце.

В средней полосе России данный коэффициент принято рассчитывать для периодов апрель–май и июнь–июль (Педь, 1975). Однако представляется целесообразным при изучении ростовых характеристик сосны обыкновенной в условиях Среднего Урала периодом вегетации считать временной отрезок с мая по август. Начало активности в камбиальной зоне у сосны обыкновенной отмечается при повышении температуры до 5 °С (Лебедеко, 1978). Данная температура на Среднем Урале обычно стабильно устанавливается в начале мая. В конце августа–сентябре древесные растения переходят в состояние глубокого покоя.

Расчет плювиотермического коэффициента был произведен на основе данных средних месячных температур и осадков мая–августа по данным метеостанции г. Екатеринбурга, которая имеет полные ряды наблюдений по этим показателям. Обеспеченность древостоев доступной влагой была оценена гидротермическим коэффициентом Селянинова (GT):

$$GT = \sum_{i=5}^{i=8} R_i / 0,1 \sum_{i=5}^{i=8} T_i, \quad (11)$$

где R_i – количество осадков (мм) в i -м месяце, а T_i – сумма средних суточных температур выше 10°C в i -м месяце.

На основании данных о максимальных и минимальных суточных температурах, зафиксированных метеостанциями гг. Ревды и Михайловска за период 1992–2002 гг., была рассчитана величина суточных перепадов температур воздуха на каждой станции. На основе значений суточных амплитуд температуры были рассчитаны среднемесячные значения амплитуды.

Оценка загрязнения атмосферного воздуха была проведена на основе средневзвешенных значений концентраций взвешенных веществ и диоксида серы по данным наблюдений ПНЗ № 1 ГУ «Свердловский ЦГМС-Р» в г. Первоуральске, рассчитанных для определенного временного периода по формуле

$$C = \frac{C_1 k_1 + C_2 k_2 + \dots + C_n k_n}{k_1 + k_2 + \dots + k_n}, \quad (12)$$

где C – средневзвешенное значение концентрации загрязняющего вещества ($\text{мг}/\text{м}^3$); C_1, C_2, C_n – значение средней концентрации загрязняющего вещества, рассчитанной для определенного месяца года ($\text{мг}/\text{м}^3$); k_1, k_2, k_n – число дней в месяце.

Статистическая обработка данных была проведена в статистическом пакете «R».

2.6.3. Методика количественной оценки степени влияния естественных и антропогенных факторов на биометрические характеристики сосновых древостоев, произрастающих в условиях горного рельефа местности

Действие агропромышленных загрязнений на биометрические характеристики сосновых древостоев естественного происхождения, произрастающих в условиях горно-увалистого рельефа, изучали на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда). Исследуемый участок местности представляет собой неправильный пятиугольник. Размеры наибольших взаимно перпендикулярных сторон составляют 7 и 9 км. Источником данных о древостоях служили материалы лесоустройства Ревдинского лесхоза Свердловского управления лесами за 1999 г.

При помощи геоинформационной системы ARC/INFO (ESRI Inc., США) были произведены регистрация и совмещение растровых изображений топографической карты масштаба 1:100 000 (Окрестности Екатеринбурга, 2000) и плана лесонасаждений Ревдинского лесничества масштаба 1:25 000. С растрового изображения плана лесонасаждений была произведена оцифровка контуров выделов, а 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 ввели в атрибутивную таблицу линейного слоя интерактивно в среде ARC/INFO.

На базе линейного покрытия с изолиниями была создана цифровая модель рельефа (ЦМР) этой территории с использованием модели нерегулярной триангуляционной сети с последующей ее конвертацией в специальный растровый формат ARC/INFO (GRID). На основе ЦМР получили 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 древостоев.

С помощью специальной процедуры «пересечением» описанных выше наборов растровых покрытий был создан текстовый файл, содержащий в столбцах значения характеристик древостоев для соответствующих ячеек исходных растров. Каждой строке файла соответствует ячейка растра с определенными координатами участка соснового насаждения. Размер ячейки составлял 100×100 м.

На рис. 7 изображена поверхность района исследований. Для большей наглядности реальные отметки высот были увеличены в 5 раз. Усиление интенсивности окраски означает снижение высоты местности.

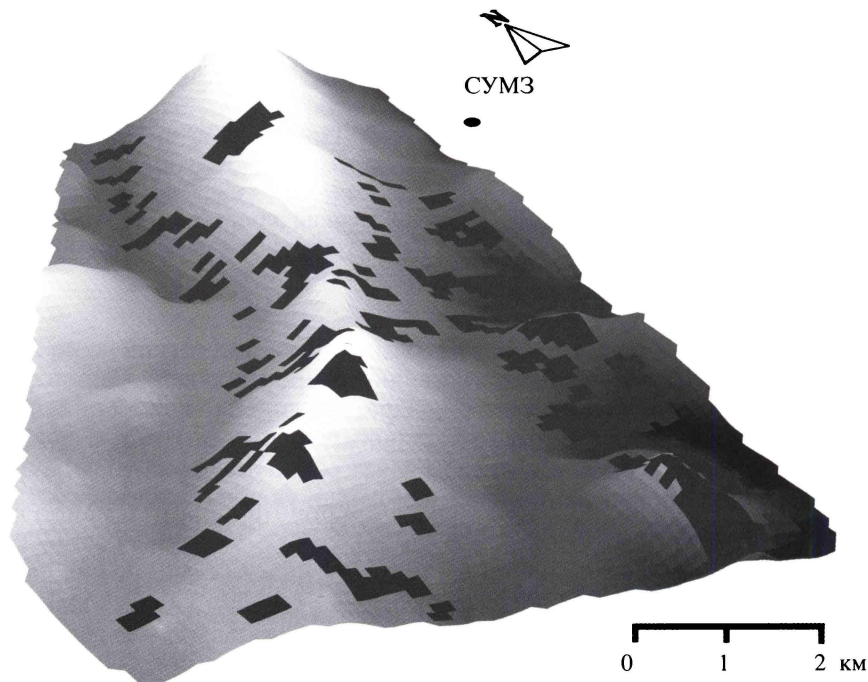
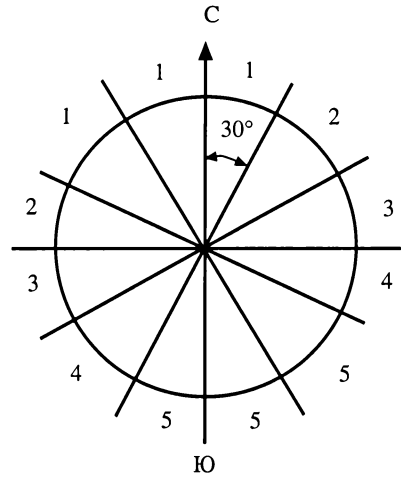


Рис. 7. Поверхность района исследований. Черным цветом выделено местоположение исследуемых участков

Рис. 8. Схема кодировки экспозиции склонов.
Цифрами обозначены коды направлений

Для описания состояния древостоев были использованы следующие их характеристики и параметры местоположения: средние возраст (A), высота (H) и диаметр (D), относительная полнота (P), бонитет (B), запас на 1 га древостоя основного элемента леса (Z), расстояние до СУМЗа (R), высота местности над уровнем моря (E), экспозиция (Asp) и уклон склона (S). На рис. 8 представлена схема кодировки направлений экспозиций склонов. Ровному местоположению участка соответствовал код 4.



2.6.4. Методы комплексной оценки состояния древостоев и экологического зонирования территорий

Состояние древостоев исследовали на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда, Свердловская область). В данном районе было заложено 140 временных пробных площадей (ВПП) прямоугольной формы в искусственных молодняках сосны обыкновенной с максимально совпадающими лесорастительными условиями. На всех ВПП выполнены стандартные лесоводственно-таксационные описания. На основании сплошного перечета (каждая ВПП имела не менее 300 деревьев преобладающей породы) была выделена группа из 40 модельных деревьев с диаметрами, наиболее близкими к среднему. У каждого дерева из данной группы определен радиальный прирост ствола на высоте 1,3 м за последние 5 и 10 лет. У трех модельных деревьев произведены измерения высот и приростов по высоте за эти же периоды (Приложения 3, И). Пробные площади, которые значительно отличались от остальных по густоте и типам условий местопрорастания, были исключены из анализа. Экологическое зонирование выполнено на основе 119 пробных площадей (Приложения Е, К).

При комплексной оценке состояния древостоев использована модель, основанная на функции желательности Харрингтона (Калинин и др., 1991; Shavnin et al., 1997; Фомин, Шавнин, 2001). В основе модели лежит способ преобразования натуральных значений частных признаков в шкалу кодированных откликов, составленную на базе величин диагностических характеристик древостоев на контрольной (фоновой) и наиболее пораженной ВПП. 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 ВПП.

Вычисление величин ПС и ОПС было выполнено отдельно для I и II классов возраста. На всех ВПП величины диаметров и высот были приве-

дены к 15 и 30 годам для насаждений I и II классов возраста соответственно. Для этого к значениям диаметров и высот прибавляли или из них вычитали средние величины радиальных приростов или приростов по высоте за соответствующие периоды.

Для создания карт состояния были построены виртуальные поверхности. В качестве координат X и Y использованы реальные координаты пробных площадей (абсолютные значения (км) были взяты с топографической карты масштаба 1:200 000), в качестве аппликаты Z – 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 использован метод пространственной интерполяции – кригинг, который нашел широкое применение в почвенном картировании (McBratney, Webster, 1986; Oliver, Webster, 1990). В основе метода лежит нахождение зависимости значений семиварианс (полудисперсий) от расстояния между точками, расположенными на земной поверхности (семивариограмма). Величину семивариансы рассчитывают по формуле

$$\gamma(h) = 1/2N(h) \Sigma[z(x_i) - z(x_i + h)]^2, \quad (13)$$

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 (h) принято называть лагом. Семивариограмма является автокорреляционной статистикой. Ее построение позволяет находить пространственную корреляцию между значениями параметров в точках и рассчитывать весовые коэффициенты, которые в дальнейшем используются для расчетов значений показателя в любой точке карты по формуле

$$z(x_0) = \lambda_1 z(x_1) + \lambda_2 z(x_2) + \dots + \lambda_n z(x_n), \quad (14)$$

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 ВПП значения полудисперсии возрастают до определенного предела. При дальнейшем росте лага ее величины остаются примерно на одном уровне, который принято называть sill). Величину h , при которой значение $\gamma(h)$ достигает своего максимума, называют рангом (a). Ранг показывает максимальное расстояние между точками, при котором еще существует пространственная корреляция между значениями параметров. Для аппроксимации семивариограмм применяют различные математические функции. В данной работе были использованы сферическая и экспоненциальная модели.

Формула для сферической модели имеет вид

$$\gamma(h) = C_0 + C\{3h/2a - (h/a)^3\} \text{ для } 0 < h \leq a, \quad (15)$$

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

где C_0 – шумовая вариация; C – структурная вариация; a – ранг; $C_0 + C$ – силл. Формула для экспоненциальной модели имеет вид

$$\gamma(h) = C_0 + C\{1 - \exp(-h/r)\} \text{ для } h > 0, \quad (16)$$

где r – параметр, определяющий пространственную шкалу вариации показателя аналогично определению ранга 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).

Семивариансный анализ и создание поверхностей состояния были выполнены в геостатистическом пакете «GS + for Windows», а также ГИС «ARC/INFO». Для создания электронной карты рельефа местности использована ГИС «ARC/INFO».

2.6.5. Методики комплексной морфофизиологической оценки состояния деревьев и экспресс-оценки их состояния с использованием цифровых фотографий крон

Сравнительный анализ морфофизиологической оценки состояния деревьев и экспресс-оценки их состояния с использованием автоматизированной системы анализа изображений был проведен на пробных площадях, расположенных на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда). Пробные площади были заложены в молодых (20–40 лет) и старшевозрастных (70–130 лет) сосновых насаждениях, произрастающих на разном удалении от источника загрязнений (рис. 9, Приложение Ж). Были подобраны пары участков таким образом, чтобы в каждом конкретном месте рядом располагались молодые и старшевозрастные сосновые древостои. Однако в ряде случаев не удалось обнаружить сосновые древостои старших возрастов рядом с молодняками, поэтому было заложено 12 пробных площадей в старшевозрастных насаждениях и 15 – в сосновых молодняках искусственного происхождения.

На указанных участках был проведен пересчет деревьев в соответствии с общепризнанными методиками (Огиевский, Хиров, 1974; ОСТ-56-69-83). На каждой пробной площади подбирали модельные деревья, у которых измеряли диаметр на высоте 1,3 м с точностью до 0,1 см. У каждого дерева на этой высоте были взяты керны древесины.

Для каждого дерева рассчитывали обобщенный показатель состояния (ОПС_{морф}) на основе двух показателей – диаметра на высоте 1,3 м и радиального прироста ствола за последние 5 лет. Древостои на пробных площадях имеют разный возраст, поэтому для получения корректной оценки их со-

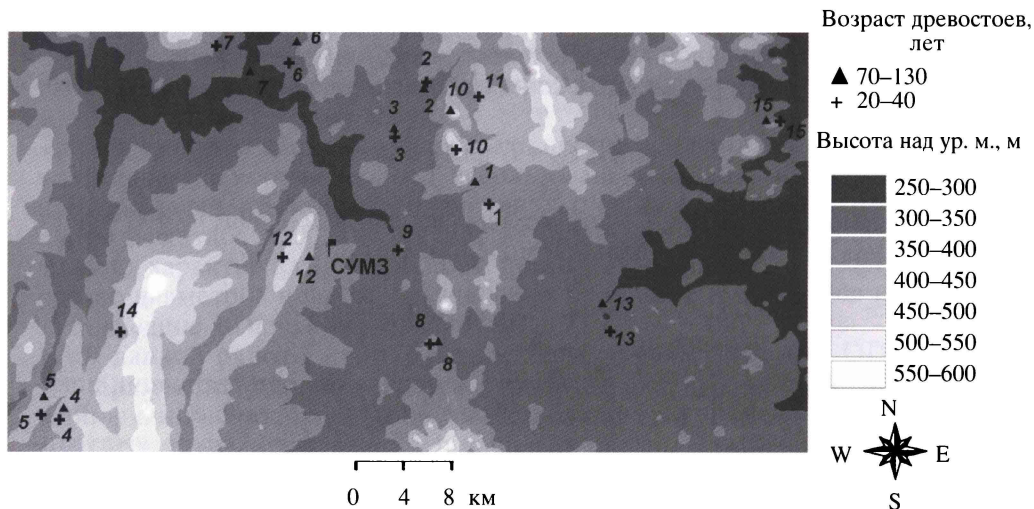


Рис. 9. Карта-схема расположения постоянных пробных площадей в районе исследований

стояния диаметры модельных деревьев были приведены к одному возрасту: молодняки – к 30 годам, а старшевозрастные древостои – к 70, путем прибавления или вычитания величин радиальных приростов за соответствующие периоды времени.

Расчет $ОПС_{морф}$ проводили с использованием методики, описанной в предыдущем разделе, но она была доработана для получения возможности оценки состояния каждого дерева на пробных площадях. В качестве контрольного участка принята ППП 4, расположенная на расстоянии 18,9 км (молодняки) и 19,1 км (старшевозрастные) к юго-востоку от источника загрязнений (Фомин, 1998; Попов, 2006). Поскольку медиана является более устойчивой статистикой по сравнению со средним арифметическим при условии, что выборка не подчиняется нормальному распределению, для проведения оценок выбрали медиану, первый и третий квартили. Интервалам значений $ОПС_{морф}$ соответствуют качественные определения состояний древостоев. Если показатель имеет значение 27 баллов и меньше, то состояние оценивается как очень плохое, 28–37 – плохое, 38–47 – удовлетворительное и свыше 47 – хорошее (Фомин, Шавнин, 2001).

При оценке состояния древостоев по $ОПС_{фото}$ были использованы следующие градации: менее 0,14 и ниже – хорошее состояние; 0,15–0,20 – удовлетворительное; 0,21 и выше – плохое.

Морфофизиологические показатели древостоев позволяют комплексно подойти к решению проблемы оценки их состояния. В их целях в сосновых молодняках искусственного происхождения у модельных деревьев были определены высоты и приросты по высоте за последние 5 лет (по мутовкам). Небольшая высота молодых деревьев позволила брать из средней части кроны хвою для изучения ее пигментного состава. Содержание хлорофил-

ла a определяли по общепризнанной методике (Методы..., 1978; Крючков и др., 1988). Средние значения физиологических характеристик на пробных площадях приведены в Приложении И.

Для учета сезонной динамики физиологических характеристик были проведены повторные замеры на контрольных пробных площадях (Приложение Л). На основе пяти показателей состояния (диаметр, радиальный прирост за 5 лет, высота, прирост по высоте за 5 лет, содержание хлорофилла a), полученных для каждого модельного дерева в молодняках сосны, рассчитывали обобщенный показатель состояния на основе морфофизиологических характеристик ($ОПС_{\text{морф+хл.}a}$). Методика расчета этого показателя аналогична той, что использовалась при определении $ОПС_{\text{морф}}$.

Крона модельных деревьев старших возрастов располагается на высоте, не позволяющей проводить сбор хвои на анализ. Поэтому на данных пробных площадях содержание хлорофилла a не определяли.

Автоматизированный метод оценки состояния деревьев по цифровым фотографиям с использованием компьютерной системы анализа изображений был разработан в целях устранения отдельных недостатков глазомерного метода, а также для упрощения оценки состояния крон высоких деревьев. На пробных площадях была произведена фотосъемка крон деревьев цифровым фотоаппаратом Canon EOS D350. При фотографировании деревья подбирали таким образом, чтобы крона дерева не перекрывалась кронами соседних деревьев, а на снимке была видна вся крона.

Фотосъемку производили в дневное время в режиме с автоматической настройкой баланса белого. Полученные фотографии были обработаны в описанном выше программном модуле «Tree State Assessment». Для каждой пробной площади обработано не менее 5 фотографий.

На основе полученных данных рассчитывали обобщенный показатель состояния ППП ($ОПС_{\text{фото}}$) по формуле (6) для каждого дерева и на пробную площадь в целом. Следует отметить, что увеличение значений $ОПС_{\text{фото}}$ свидетельствует об ухудшении состояния древостоев.

На всех ППП были взяты образцы почв и измерено содержание в них меди. Образцы были подготовлены к анализу по стандартной методике (Аринушкина, 1970) с использованием сита диаметром 0,312 мм. Концентрацию меди определяли по общепризнанной методике в вытяжках, полученных при обработке образцов азотной кислотой, на атомно-абсорбционном спектрометре «Спираль-14» (среднее квадратичное отклонение < 7%).

2.7. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ И ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

Апробация разработанных подходов и методов была проведена на модельных территориях – районах исследований (см. Приложение А). В изучаемых районах на Полярном, Северном и Южном Урале были выполнены натурные обследования древостоев и проведен комплекс камеральных работ. В ходе исследований с использованием бу-

мажных оригиналов топографических карт были созданы цифровые карты (изолинии и отметки высот, водные потоки, озера, дороги) масштабов 1:25 000 и 1:100 000 общей площадью 320 км², а на их основе – цифровые модели рельефа. Всего обработано 27 аэрофотоснимков районов исследований масштабом 1:25 000–1:50 000, полученных в 1961–2000 гг.

В процессе работы были созданы геоинформационные базы данных лесотундровых сообществ на Полярном Урале (около 500 выделов и 10 000 описаний); лесных выделов – на Северном Урале на основе лесостроительных данных 1955–1998 гг. (примерно 7000 выделов и свыше 30 000 описаний). Разработаны электронные карты-схемы положения верхней границы редколесий и сомкнутого леса в районах исследований за период с 1955 по 2006 г. (всего 6 шт.). Произведен поиск точек съемки, с которых осуществлялось фотографирование ландшафтов в этих районах разными исследователями в XX в., и проведена геопривязка точек фотосъемки для базы данных исторических ландшафтных фотографий – 378 шт.

Для оценки изменений климата была создана база данных средних месячных значений климатических параметров метеостанций Урала за период с 1961 по 2004 г. – всего 131 метеостанция и около 130 000 значений.

В ходе выполнения проектов INTAS 01-0052, РФФИ № 01-04-96428-р2001, РФФИ № 06-04-63006, госбюджетной темы 1.4.95 в районе исследований на Среднем Урале были заложены 170 пробных площадей в сосновых древостоях, на которых выполнено около 65 000 прямых измерений биометрических параметров деревьев. Автором произведена закладка и измерение значений характеристик на 45 пробных площадях и проведены обработка и анализ данных, собранных на всех пробных площадях.

Произведено фотографирование крон деревьев и проведены измерения – 110 фотографий и несколько сотен измерений параметров состояния деревьев.

В заключение необходимо отметить особенности статистической обработки данных, которые описаны в главах 2–6. Они связаны с выбором статистических параметров при получении оценок. При проведении исследований наиболее часто применяют оценивание с использованием среднего арифметического и стандартного отклонения. При этом, как правило, исследователи не имеют возможности (либо не делают по разным причинам) проверить данные на соответствие формальным критериям, позволяющим корректно применять такое оценивание при анализе результатов. В таких случаях обычно приводятся общие положения, например ссылки на центральную предельную теорему. При этом существуют исследования и рекомендации, полученные на их основе, которые позволяют использовать в качестве статистической оценки не среднее арифметическое, а медиану (Хогг, 1984), так как она является более устойчивой статистикой по сравнению со средним арифметическим.

В главах 3–5 (за исключением раздела 3.2) оценивание было проведено с использованием среднего арифметического. Это обусловлено

тем, что для получения данных были использованы общепринятые методики или лесоустроительные материалы, которые опираются на оценивание с использованием среднего арифметического и стандартного отклонения. Для того чтобы не смешивать разные статистические методы оценивания, нами были использованы среднее арифметическое и стандартное отклонение при проведении оценок на основе этих материалов. В главе 6 и разделе 3.2 приведены результаты, полученные на основе ошибкоустойчивого оценивания с использованием медианы и квартилей. Применение этих двух методов в данной работе является допустимым, так как в ней непосредственно не сравниваются данные, полученные с помощью разных методов оценивания.

РЕАКЦИЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ДЕЙСТВИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

3.1. ВЛИЯНИЕ АЭРОПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ И СВЕТОВЫХ УСЛОВИЙ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ХВОИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

Известно, что SO_2 , который преобладает в структуре выбросов Среднеуральского медеплавильного завода, оказывает ингибирующее действие на фотосинтетическую активность хлоропластов, которое выражается в прямом влиянии серосодержащих ионов на компоненты электронно-транспортной цепи, дезорганизации мембран пластид, нарушении функционирования водоокисляющего комплекса, изменении рН стромы, а также ингибировании активности ферментов цикла Кальвина (Барахтенова, Николаевский, 1988; Schmidt et al., 1990). Нарушения в ультраструктуре мембран хлоропластов сопровождаются изменениями в пигментной системе, которые выражаются в снижении содержания хлорофиллов в листьях и хвое (Кривошеева и др., 1991; Кирпичникова и др., 1995).

Адаптационная реакция фотосинтетического аппарата (ФСА) на изменение интенсивности освещения характеризуется перестройками на структурном и биохимическом уровнях. Световые кривые скорости ассимиляции CO_2 листьев растений, произрастающих в хорошо освещенных местах, достигают насыщения при большей интенсивности света, чем у затененных листьев (Крамер, Козловский, 1983; Берри, Даунтон, 1987; Lambers et al., 1998). При этом теневые листья содержат меньше хлорофилла на единицу поверхности листа (Крамер, Козловский, 1983; Lichtenthaler, Rinderle, 1988), а их хлоропласты имеют меньший объем стромы, но большее количество гран. В целом количество компонентов ФСА, определяющих фотосинтетическую способность единицы поверхности, у световых листьев выше по сравнению с теневыми (Lambers et al., 1998).

Отдельные показатели флуоресценции хлорофилла обладают достаточно высокой чувствительностью к действию атмосферных загрязнений (Lichtenthaler, Rinderle, 1988; Кирпичникова и др., 1995). Изучение индукционных переходов у листьев шпината позволило установить, что действие SO_2 вызывает замедление процесса окисления первичного акцептора Q_A - и подавление активности цикла Кальвина (Schmidt et al., 1990), а также снижение скорости электронного транспорта в хлоропластах (Snell et al., 1991).

Исследование влияния O_3 на флуоресцентные характеристики ФСА листьев березы (Shavnin et al., 1999) показали, что в результате этого воздействия снижается световой порог второй фазы световой кривой нефотохимического тушения флуоресценции. В связи с этим возникает вопрос о наличии данного эффекта у других видов древесных растений, а также его проявление при длительном воздействии комплекса аэропромышленных поллютантов в естественных условиях.

Физиологические и анатомические отличия ФСА световых и затененных листьев позволяют ожидать соответствующего изменения энергетического баланса хлоропластов в зависимости от световых условий среды, в которых происходило формирование фотосинтезирующих органов. В частности, насыщение ассимиляции CO_2 у теневых листьев при более низком уровне ФАР (Lambers at al., 1998) дает основание предполагать у них возможность перехода хлоропластов в более энергизованное состояние при меньшей освещенности. В этом случае эффекты влияния загрязнений и различных световых условий среды могут частично совпадать или перекрываться.

В целях решения этих вопросов и проверки высказанных предположений нами изучены характеристики фотосинтетического аппарата хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сформировавшейся в условиях с разными уровнями освещенности и загрязнения атмосферы промышленными выбросами, путем сравнительного изучения пигментного состава хвои и световых кривых параметров быстрой флуоресценции хлорофилла *a*. В качестве объекта исследования использована хвоя деревьев, произрастающих на разном расстоянии от Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ, г. Ревда). Объекты и методика исследований описаны в разделе 2.6.1.

В табл. 4 приведены значения характеристик фотосинтетического аппарата хвои. На рис. 10–12 представлены усредненные световые кривые параметров быстрой флуоресценции хлорофилла *a* хвои. Бары на графиках соответствуют стандартной ошибке среднего. При статистической обработке использованы результаты всех измерений. Величина общего содержания серы на ВПП 7 достоверно выше ($P \geq 0,95$), чем на ВПП 33 и

Таблица 4

Значения вариабельной флуоресценции хлорофилла (Fv/Fm, отн. ед.), содержание пигментов (мг/г сухого веса), величина их отношения (отн. ед.) и валовое содержание серы (%) в хвое сосны из разных частей крон деревьев в зонах с различными уровнями загрязнения атмосферы

Характеристика	ВПП 7 (зона сильного загрязнения)			ВПП 33 (зона среднего загрязнения)			ВПП 20 (контроль)		
	Ярус кроны								
	верхн.	средн.	нижн.	верхн.	средн.	нижн.	верхн.	средн.	нижн.
Хлорофил <i>a</i>	1,16± 0,18	1,25± 0,20	1,39± 0,17	1,67± 0,02	1,88± 0,08	2,18± 0,06	2,07± 0,07	2,45± 0,11	2,45± 0,03
Хлорофил <i>b</i>	0,53± 0,08	0,57± 0,08	0,63± 0,11	0,88± 0,02	1,01± 0,04	1,33± 0,04	1,17± 0,03	1,39± 0,09	1,46± 0,13
Хл. <i>a</i> /хл. <i>b</i>	2,21± 0,16	2,21± 0,20	2,23± 0,12	1,89± 0,02	1,87± 0,05	1,64± 0,02	1,77± 0,10	1,77± 0,14	1,71± 0,10
Fv/Fm	0,84± 0,01	0,84± 0,02	0,82± 0,07	0,80± 0,01	0,81± 0,08	0,77± 0,03	0,81± 0,02	0,81± 0,02	0,79± 0,02
Содержание серы	0,21±0,04			0,14±0,03			0,10±0,01		

Примечание. Измерение Fv/Fm производили в 3, а содержание пигментов в хвое – в 3–6 биологических повторностях по каждому ярусу кроны. Содержание серы определяли в 3 аналитических повторностях для средней пробы на каждый ярус.

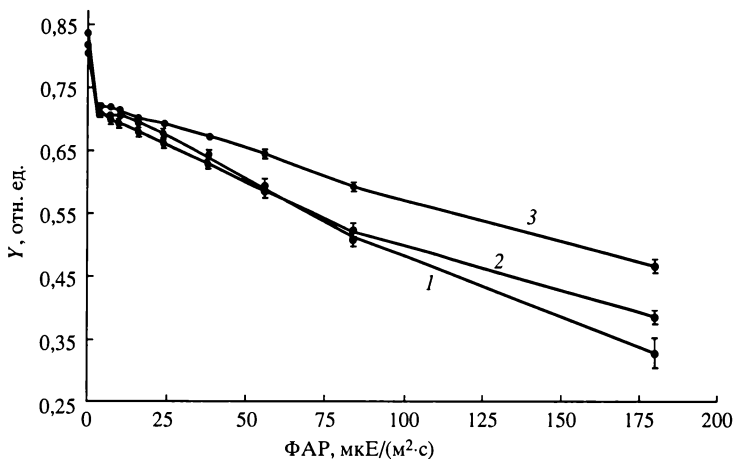


Рис. 10. Зависимость квантового выхода фотосистемы II (Y) хвои деревьев сосны, произрастающих в условиях с разной степенью загрязнения атмосферы промышленными выбросами, от ФАР.

1, 2, 3 – зоны с высоким, средним и фоновым уровнями загрязнения соответственно. Здесь и на рис. 11, 12 приведены средние значения Y ($n = 3$), бары на графиках соответствуют стандартной ошибке среднего, а при величине стандартной ошибки менее 0,01 бары не показаны

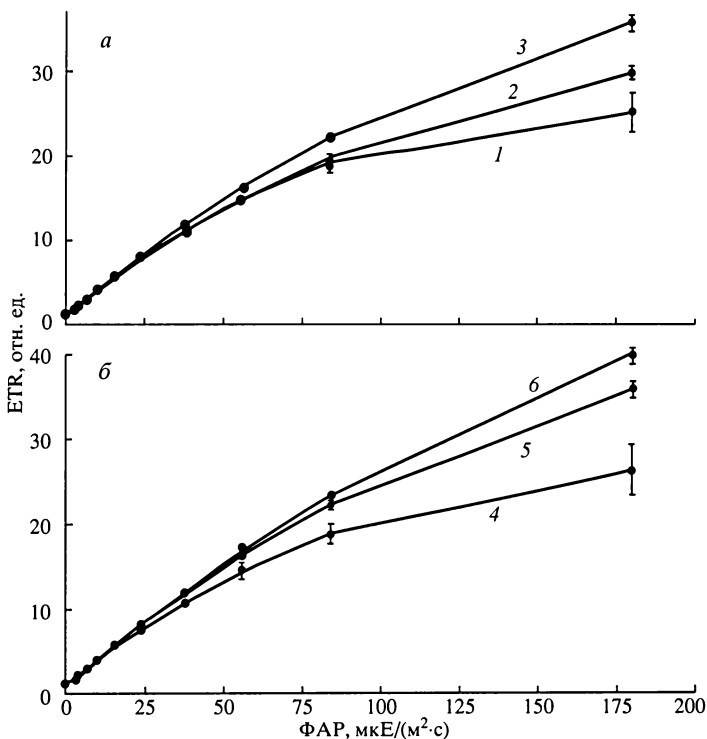


Рис. 11. Световые зависимости скорости нециклического электронного транспорта (ETR) фотосинтетического аппарата хвои сосны, произрастающей в условиях с различной степенью загрязнения (а) и разным уровнем освещенности (б).

1, 2, 3 – ETR хвои из зон с высоким, средним и фоновым уровнями загрязнения; 4, 5, 6 – ETR хвои из нижнего, среднего и верхнего ярусов кроны дерева ВПП 20 (контроль). При величине стандартной ошибки менее 0,5 бары не показаны

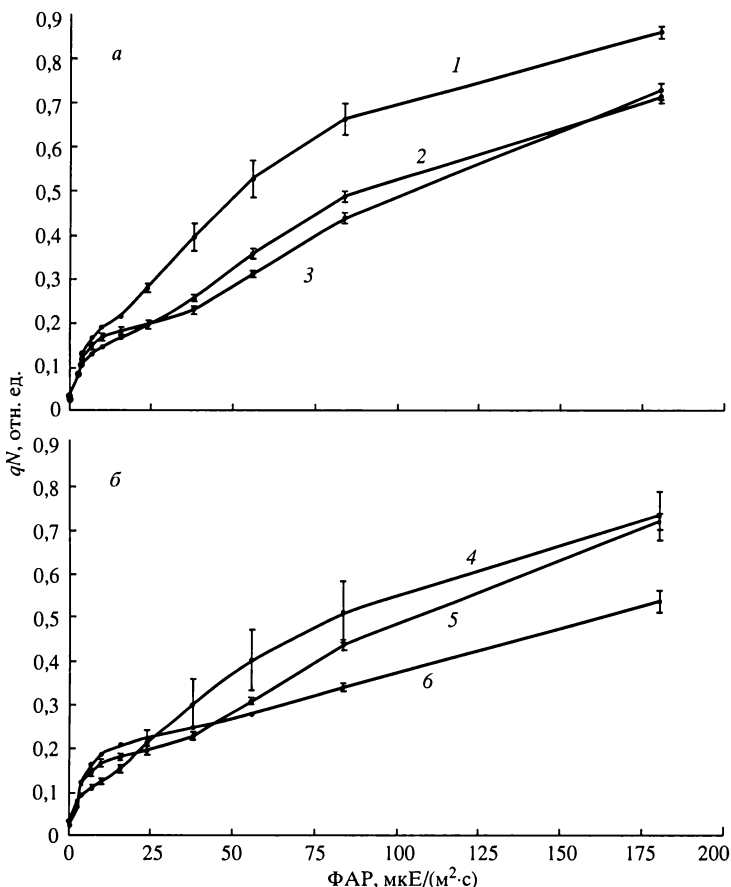


Рис. 12. Световые зависимости коэффициента нефотохимического тушения (qN) фотосинтетического аппарата хвои сосны, произрастающей в условиях с различной степенью загрязнения (а) и с разными уровнями освещенности (б).

1, 2, 3 – qN хвои из зон с высоким, средним и фоновым уровнями загрязнения; 4, 5, 6 – qN хвои из нижнего, среднего и верхнего ярусов кроны дерева ВПП 20 (контроль). При величине стандартной ошибки менее 0,01 бары не показаны

на ВПП 20, в 1,5 и 2 раза соответственно, что является прямым подтверждением увеличения уровня техногенной нагрузки с приближением к СУМЗу (см. табл. 4). С приближением к заводу содержание зеленых пигментов в хвое деревьев всех ярусов кроны снижается, а величина отношения содержания хлорофиллов a и b (хл. a /хл. b) при этом возрастает. Различия между значениями всех параметров на ВПП 7 и ВПП 20 достоверны на уровне значимости 0,05. В нижних частях крон деревьев на ВПП 33 и ВПП 20 отмечено увеличение содержания пигментов в хвое и снижение отношения хл. a /хл. b . Величины Fv/Fm у хвои этих ярусов на ВПП 33 и ВПП 20 достоверно ниже, чем на ВПП 7.

При слабой интенсивности света (менее 10–15 $\mu E/(m^2 \cdot s)$) отличия между величинами Y на всех ВПП незначительны. При ΦAP выше 15 $\mu E/(m^2 \cdot s)$ наблюдается существенное снижение этого параметра у хвои деревьев из зон с сильным и средним уровнями загрязнения атмос-

сферы по сравнению с контролем (рис. 10). В интервале 0–40 мкЕ/(м²·с) световые кривые *ETR* хвой деревьев на всех ВПП имели линейные участки и практически совпадали (рис. 11). При плотности светового потока более 40 мкЕ/(м²·с) происходит отклонение зависимости от линейной в сторону уменьшения угла наклона. Возрастание уровня загрязнения вызывало снижение *ETR*. В более затененных частях кроны также наблюдали уменьшение значений этого параметра.

Световые кривые *qN* имели двухфазный характер (см. рис. 12). При увеличении ФАР от темнового уровня смене фаз соответствуют точки перегибов графиков. Значения абсцисс этих точек на световых кривых *qN* хвой, взятой с ВПП 7, 33 и 20, примерно равны 15, 25 и 45 мкЕ/(м²·с) соответственно. Кроме того, при увеличении уровня загрязнения отмечено возрастание *qN* на участках кривых, соответствующих второй фазе.

Результаты исследований хвой из разных частей кроны (см. рис. 12) показывают, что адаптация ФСА к более низкой освещенности приводит к увеличению *qN* при ФАР выше 25–50 мкЕ/(м²·с). При этом перегибы графиков зависимости *qN* от ФАР у хвой, взятой из верхней, средней и нижней частей кроны, происходят при 60, 25 и около 10 мкЕ/(м²·с) соответственно.

Результаты исследований особенностей пигментного состава ФСА хвой из различных ярусов кроны (см. табл. 4) в целом соответствуют известным данным о повышении содержания пигментов при затенении деревьев хвойных пород (Кирпичникова и др., 1995; Завьялова, Юшков, 1979; Юшков, Завьялова, 1988), однако достоверного уменьшения отношения хлорофиллов *a* и *b*, описанного в этих работах, у хвой, сформировавшейся при низкой освещенности, не наблюдается.

Увеличение содержания хлорофиллов, связанное с затенением нижних ярусов, сопровождается существенными изменениями первичных процессов преобразования световой энергии, которые приводят к уменьшению *ETR* (см. рис. 10). При этом у хвой нижнего яруса установлено существенное снижение *ETR* при ФАР выше 80 мкЕ/(м²·с), тогда как в среднем и верхнем ярусах световое насыщение, по-видимому, происходит при освещенностях выше 200 мкЕ/(м²·с).

Эти данные согласуются с результатами изучения хвой ели Дугласа (Snell et al., 1991). Описанные этими авторами эффекты сопровождаются существенной трансформацией зависимостей *qN* от ФАР. Они заключаются в уменьшении *qN* на участке первой фазы и снижении светового порога второй фазы у теневой хвой (см. рис. 12).

Ранее было высказано предположение, что первая фаза, наблюдаемая при низких ФАР, связана с переходом хлоропластов из состояния 1 в состояние 2 (Shavnin et al., 1999), что приводит к уменьшению притока энергии на фотосистему II (ФСII). Принимая во внимание, что отличия как *Y*, так и *ETR* у хвой разных ярусов на начальных участках световых кривых незначительны, описанное выше уменьшение *qN* можно объяснить увеличением диссипации световой энергии в светособирающих комплексах (Walters, Horton, 1993). Ввиду совпадения особенностей *Y* и *ETR* у хвой, выросшей в условиях затенения и при загрязнении, снижение *qN* хвой с ВПП 7 и 33 на начальных участках графиков (см. рис. 12) по сравнению с хвоей на ВПП 20 также можно объяснить этим механизмом.

Увеличение значений qN на участке кривой, соответствующей второй фазе, вызвано возрастанием градиента электрохимического потенциала H^+ в мембранах тилакоидов (Krause, Weis, 1991; Pfundel, Bilger, 1994) и включением виолоксантинового цикла (Pfundel, Bilger, 1994; Demmig-Adams et al., 1989). В связи с этим возрастание величин qN при затенении и действии загрязнений на соответствующих участках световых кривых (рис. 12) указывает на усиление этих процессов под влиянием данных факторов.

Результаты экспериментов, проведенных с хвоей сосны, произрастающей в условиях сильного загрязнения, хорошо согласуются с данными, полученными при длительной фумигации саженцев березы озонном (Shavnin, 1999) и саженцев ели Дугласа сернистым ангидридом (Snell et al., 1991). Эти авторы наблюдали снижение скорости фиксации CO_2 , величин Y и ETR листьев и хвои под влиянием загрязняющих веществ.

Низкий порог светового насыщения ETR (см. рис. 11), а также высокие значения qN (см. рис. 12) правее точки перегиба как у затененной, так и подверженной действию загрязнений хвои свидетельствуют о том, что влияние обоих факторов выражается в затруднении процесса утилизации энергии хлоропластами. У темновой хвои это связано, вероятно, с меньшим объемом стромы и, следовательно, меньшим количеством локализованных в ней ферментов цикла Кальвина (Lambers et al., 1998). Снижение активности углеродного цикла при воздействии загрязняющих веществ описано в литературе (Dann, Pell, 1989; Landry, Pell, 1993).

Таким образом, основной эффект действия загрязнений и затенения заключается в снижении светового порога перехода ФСА хвои сосны в соответствующее второй фазе световой кривой qN состояние, уменьшении безызлучательной диссипации поглощенной световой энергии при низких и ее увеличении при высоких ФАР, а также значительном снижении скорости электронного транспорта между ФСII и ФСI. Перечисленные элементы сходства изменений ФСА на функциональном уровне сопровождаются существенными отличиями в пигментном составе хвои – увеличении содержания хлорофиллов в условиях затенения и его снижении при действии загрязнений.

Полученные результаты позволяют заключить, что снижение эффективности преобразования световой энергии, вызванное действием загрязнений и затенения, является общим механизмом энергообмена в хлоропластах. При этом у затененной хвои вклад в снижение эффективности преобразования световой энергии преобладает над эффективностью ее захвата.

3.2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЬЕВ И ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ИХ СОСТОЯНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Оценка состояния древостоев была проведена на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ). Объекты и

Таблица 5

Обобщенные показатели состояния, рассчитанные по диаметрам и радиальным приростам (ОПС_{морф}), комплексу морфофизиологических характеристик (ОПС_{морф+хл.а}) древостоев, а также содержание меди в почве пробных площадей в искусственных молодняках сосны

№ ППП	Расстояние до СУМЗа, км	Содержание меди в почве, мг/г	ОПС _{морф}		ОПС _{морф+хл.а}	
			Медиана	1-й квартиль/3-й квартиль	Медиана	1-й квартиль/3-й квартиль
1	10,0	233	27,0	24,0 29,8	39,7	36,2 43,2
2	11,9	46	55,1	46,9 60,7	58,7	52,7 64,6
3	8,0	211	38,9	31,3 40,8	42,6	36,6 48,9
4	19,2	30	65,6	58,4 67,3	60,8	57,1 64,2
5	20,0	23	62,9	56,8 66,2	62,3	57,6 65,9
6	11,8	95	33,2	23,3 41,2	33,9	28,5 41,5
7	14,3	23	49,2	37,3 54,9	57,4	49,8 61,1
8	8,0	362	46,5	40,9 49,3	56,7	52,5 61,8
9	4,0	376	11,3	9,4 13,7	9,3	7,5 11,6
10	9,8	118	37,3	31,9 41,7	47,0	43,9 50,7
11	13,0	117	22,9	19,2 26,0	37,5	32,8 40,1
12	3,0	360	37,8	36,6 42,2	34,7	32,8 39,0
13	17,5	101	53,3	49,0 62,1	57,4	50,5 64,1
14	13,6	23	68,1	62,3 70,7	61,9	58,0 66,9
15	28,3	46	49,2	45,5 51,3	52,5	47,1 56,9

методика подробно описаны во второй главе. В табл. 5 и 6 приведены данные о содержании меди в почве, а также величины обобщенного показателя состояния, рассчитанного на основе значений приведенных диаметров и радиальных приростов за 5 лет (ОПС_{морф}). Для молодняков значения обобщенного показателя состояния рассчитаны на основе комплекса морфофизиологических характеристик (ОПС_{морф+хл.а}), а для старшевозрастных основных насаждений – вычислены по фотографиям (ОПС_{фото}).

Числовые значения, представленные в столбце ОПС_{морф} двух таблиц, были переведены в качественные показатели. После этого было проведено сопоставление состояния древостоев различных возрастов, произрастающих в непосредственной близости друг от друга. Сосновые молодняки в основном характеризуются хорошим (7 пробных площадей) и удовлетвори-

Таблица 6

Обобщенные показатели состояния, рассчитанные по диаметрам и радиальным приростам за последние 5 лет (ОПС_{морф}), по фотографиям (ОПС_{фото}) древостоев, а также содержание меди в почве пробных площадей, заложенных в старшевозрастных сосновых древостоях естественного происхождения

№ ППП	Расстояние до СУМЗа, км	Содержание меди в почве, мг/г	ОПС _{морф}		ОПС _{фото}	
			Медиана	1-й квартиль/3-й квартиль	Медиана	1-й квартиль/3-й квартиль
1	9,8	432,5	38,9	32,2 48,0	0,26	0,22 0,30
2	11,5	59,9	34,9	27,2 38,9	0,18	0,12 0,20
3	8,4	274,2	30,8	25,0 33,6	0,22	0,18 0,25
4	18,6	25,3	59,4	48,0 65,1	0,12	0,11 0,16
5	19,3	63,1	37,3	30,7 45,6	0,14	0,14 0,14
6	12,9	129	37,4	33,9 42,4	0,18	0,16 0,19
7	12,0	170,8	32,1	25,9 40,0	0,20	0,17 0,22
8	9,8	364,5	13,5	13,0 15,0	0,18	0,15 0,20
10	11,3	81,5	40,5	39,9 43,5	0,16	0,15 0,16
12	1,3	280,7	17,9	17,5 18,3	0,21	0,18 0,24
13	16,7	129,1	36,4	34,0 40,3	0,20	0,19 0,21
15	27,6	281	21,0	18,4 27,4	0,19	0,18 0,19

Примечание. Увеличение ОПС_{морф} означает улучшение, а возрастание значений ОПС_{фото} – ухудшение состояния древостоев.

тельным (2 пробные площади) состоянием. Очень плохим состоянием отличаются древостои ППП 1, 9 и 11: ПП 9 находится вблизи СУМЗа, а ППП 1 и 11 расположены на восточной границе г. Первоуральска. Угнетение древостоев на данном участке обусловлено относительно высоким уровнем загрязнения атмосферы промышленными выбросами вблизи завода. Кроме того, в районе исследований преобладают ветры западного направления, что способствует переносу загрязненных поллютантами воздушных масс в направлении данных участков.

Положение в рельефе также может косвенно влиять на рост древостоев: так, на верхних частях склона, как правило, встречаются маломощные и относительно бедные почвы.

Использование физиологического показателя при оценке состояния деревьев приводит к повышению значений обобщенных показателей древостоев. Физиологические параметры более лабильны по сравнению с морфометрическими, поэтому их использование предпочтительно для выявления

эпизодических и сильных воздействий. Однако применение физиологических параметров при оценке состояния древостоев отдельно от ростовых характеристик в зонах со средним и низким уровнем загрязнения атмосферы поллютантами будет приводить к завышенной оценке их состояния.

Старшевозрастные древостои двух из 12 пробных площадей характеризуются удовлетворительным состоянием. В очень плохом состоянии находятся древостои ППП 8, 12 и 15. Пробные площади 12 и 15 находятся на возвышенных элементах рельефа вблизи СУМЗа. Плохое состояние имеют древостои на ППП 2, 3, 7 и 13, расположенные в непосредственной близости от г. Первоуральска (ППП 3), пос. Билимбай (ППП 7) и г. Екатеринбурга (ППП 15) соответственно, а также в восточном направлении от СУМЗа на достаточном удалении от него (ППП 13). На данных участках, за исключением ППП 2, установлен достаточно высокий уровень содержания меди в почве, что свидетельствует о влиянии выбросов завода на древостои. Угнетенное состояние на ППП 2 можно объяснить влиянием комплекса антропогенных факторов, обусловленных близостью города, и в частности воздействием его промышленных предприятий. Величина ОПС_{морф} характерная для древостоев с хорошим состоянием, получена только для контрольной ППП 4.

Значительно отличаются по состоянию молодняки и старшевозрастные древостои на ППП 15. Данные участки находятся в непосредственной близости от г. Екатеринбурга – крупного промышленного центра. Уровень загрязнения атмосферы вблизи города выше фонового уровня региона. Использование физиологического параметра привело к увеличению значения обобщенного показателя состояния в молодняках. В соответствии с теорией стресса можно предположить, что их фотосинтетический аппарат адаптирован к уровню загрязнения атмосферы на данном участке. Это состояние соответствует второй фазе стресса.

Оценка состояния по ростовым характеристикам также свидетельствует об относительно хорошем состоянии молодых деревьев. Древостои, возраст которых более чем в 2 раза превышает возраст молодняков, длительное время находятся под влиянием загрязнения атмосферы предприятий г. Екатеринбурга, поэтому испытывают более значительное угнетение. Оценка состояния древостоев по фотографиям свидетельствует об удовлетворительном (ближе к границе плохого) состоянии.

Таким образом, состояние молодых сосновых древостоев искусственного происхождения, произрастающих на территории района исследования, лучше, чем состояние расположенных рядом с ними старшевозрастных древостоев. Содержание меди в почве является показателем уровня техногенной нагрузки, которую испытывают лесные экосистемы. Значения этого параметра на пробных площадях коррелируют с величинами обобщенного показателя состояния, рассчитанного по величинам диаметров и радиальных приростов за последние 5 лет.

Для получения объективной и точной оценки состояния древостоя желательно использовать не только показатели, которые характеризуют ростовые процессы деревьев, но и параметры, позволяющие оценить особенности протекания в них физиологических процессов. Дополнение ОПС_{морф} молодняков данными о приведенных высотах, приростах по высоте за последние 5 лет и содержании хлорофилла *a* в хвое модельных деревьев позволило

сделать оценку древостоев более точной. Коэффициент корреляции между $ОПС_{\text{морф+хл.д}}$ и показателем загрязненности почвы медью составил $-0,66$ при уровне значимости ниже $0,01$.

Обобщенный показатель состояния старшевозрастных древостоев, рассчитанный по фотографиям крон деревьев ($ОПС_{\text{фото}}$), также коррелирует с величиной содержания меди в почве ($r = 0,55$, уровень значимости ниже $0,05$), т. е. увеличение содержания металла в почве сопровождается ростом показателя $ОПС_{\text{фото}}$, что соответствует ухудшению состояния древостоя. Древостои на ППП 4 и 5, расположенных на удалении $19,1$ и $19,7$ км в юго-западном направлении от СУМЗа, имеют наименьшие значения показателя $ОПС_{\text{фото}}$ ($0,12$ и $0,14$), что соответствует хорошему состоянию. Насаждения ППП 1, 3 и 12 характеризуются высокими значениями $ОПС_{\text{фото}}$ (соответственно $0,26$; $0,22$ и $0,21$), что позволяет оценить их состояние как плохое. Данные участки расположены на удалении $9,4$; $8,8$ и $1,8$ км от завода. Медианы $ОПС_{\text{фото}}$ на данных пробных площадях достоверно отличаются от аналогичных показателей ППП 4 и 5. Значения медиан обобщенного показателя состояния, рассчитанного по фотографиям крон, для участков с удовлетворительным состоянием древостоев находятся в интервале между $0,15$ и $0,20$. Таким образом, анализ фотографий крон деревьев сосны старших возрастов позволил выделить три состояния древостоев (хорошее, удовлетворительное, плохое) на основании вычисления $ОПС_{\text{фото}}$.

Проведенные нами исследования показали, что молодые насаждения, произрастающие в районе действия СУМЗа, находятся в лучшем состоянии, чем старшевозрастные. Физиологические параметры, как правило, более лабильны, поэтому их использование предпочтительно для экспресс-оценки эпизодических и сильных воздействий. Однако использование физиологических параметров при оценке состояния древостоев отдельно от ростовых характеристик в зонах со средним и низким уровнем загрязнения атмосферы поллютантами будет приводить к завышенной оценке состояния.

Применительно к древостоям старших возрастов перспективным выглядит использование метода автоматизированного анализа фотоизображений кроны. Причем этот метод применим как для проведения экспресс-оценки, так и в сочетании с другими методами оценки состояния древостоев, в том числе и традиционного визуального оценивания.

3.3. ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ АЭРОПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ И МЕЗОКЛИМАТА. ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА РОСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

В работах, посвященных дендроклиматическим и дендрэкологическим исследованиям, в основном сопоставляются особенности динамики ростовых процессов деревьев под действием абиотических, биотических или антропогенных факторов. При этом, как правило, устанавливается взаимосвязь между глобальными и региональными изменениями условий среды и реакцией на них растительности (Шиятов и др., 2005, 2007; Капралов и др., 2006). Исследованию влияния аэропромышленных загрязнений на древесные растения также уделяется много внимания (Воробейчик, Хантемирова, 1994; Фомин, Шавнин, 2001, 2002). Однако взаимосвязь между концентрацией в воздухе загрязняющих веществ и отдельных микроклиматических по-

казателей, а также их совместное влияние на рост древесных растений мало изучены. Ниже приведены результаты изучения отдельных аспектов такого взаимодействия. Объекты и методика исследований подробно описаны во второй главе. Для соответствия номеров вновь заложенных и уже существующих площадей была использована нумерация существующей сети.

На рис. 13 представлена динамика индексов радиальных приростов основных древостоев, сформировавшихся на различном удалении от СУМЗа, за период времени с 1962 по 2002 г. Видно, что с приближением к Среднеуральскому медеплавильному заводу и, следовательно, с усилением влияния промышленных выбросов на сосновые древостои величины ранговой корреляции между древесно-кольцевыми хронологиями снижаются. Значение коэффициента Спирмена (R_s), рассчитанного для хронологий деревьев на ППП 16, расположенной вне зоны действия поллютантов, и фоновой ППП 4, составляет 0,44 при уровне значимости меньше 0,05 ($\alpha < 0,05$). Для хронологий ППП 4 и импактной ППП 12 он равен 0,34 ($\alpha < 0,05$). Достоверных значений коэффициента ранговой корреляции между индексами радиальных приростов на ППП 16 и ППП 12 не установлено.

Сравнительный анализ древесно-кольцевых хронологий с показателями плювиотермического коэффициента, рассчитанного для вегетационного периода (май–август) 1962–2002 гг. по данным метеостанции г. Михайловска, позволил установить взаимосвязь значений плювиотермического коэффициента и величин индекса радиального прироста на ППП 16 ($R_s = 0,33$; $\alpha < 0,05$). Можно предположить, что рост коэффициента указывает на улучшение обеспечения деревьев доступной влагой.

Известно, что обеспеченность растений доступной влагой в период вегетации является одним из важных условий их нормального роста, причем наиболее интенсивный рост деревьев сосны наблюдается в первой половине вегетационного периода (Лебедеико, 1978). По-видимому, хорошая обеспеченность влагой в первой половине вегетационного сезона приводит к стимулированию ростовых процессов деревьев на ППП 16.

Значения коэффициентов корреляции и уровни значимости между величинами приростов древостоев на ППП 4 и ППП 12 и гидротермическими коэффициентами свидетельствуют об отсутствии корреляции между этими показателями.

Наличие данных о средних концентрациях взвешенных веществ и диоксида серы в воздухе позволяет оценить, каким образом загрязнения влияют на динамику ростовых процессов деревьев сосны обыкновенной. Были проанализированы данные о загрязнении атмосферы в районе исследований с 1992 по 2002 г. R_s , рассчитанный между индексами радиальных приростов контрольной ППП 4 и средневзвешенными значениями концентрации диоксида серы в воздухе в мае–июне, составляет величину 0,67 ($\alpha < 0,05$). Таким образом, рост концентрации данного поллютанта в воздухе в период начала роста древостоев сопровождается достоверным увеличением радиального прироста на контрольной пробной площади.

Установлена взаимосвязь между индексами радиальных приростов древостоев наиболее угнетенной ППП 12 и средневзвешенными значениями концентрации SO_2 , рассчитанными для временного промежутка с апреля по июнь: R_s составил $-0,52$ при уровне значимости ниже 0,11. Данный факт

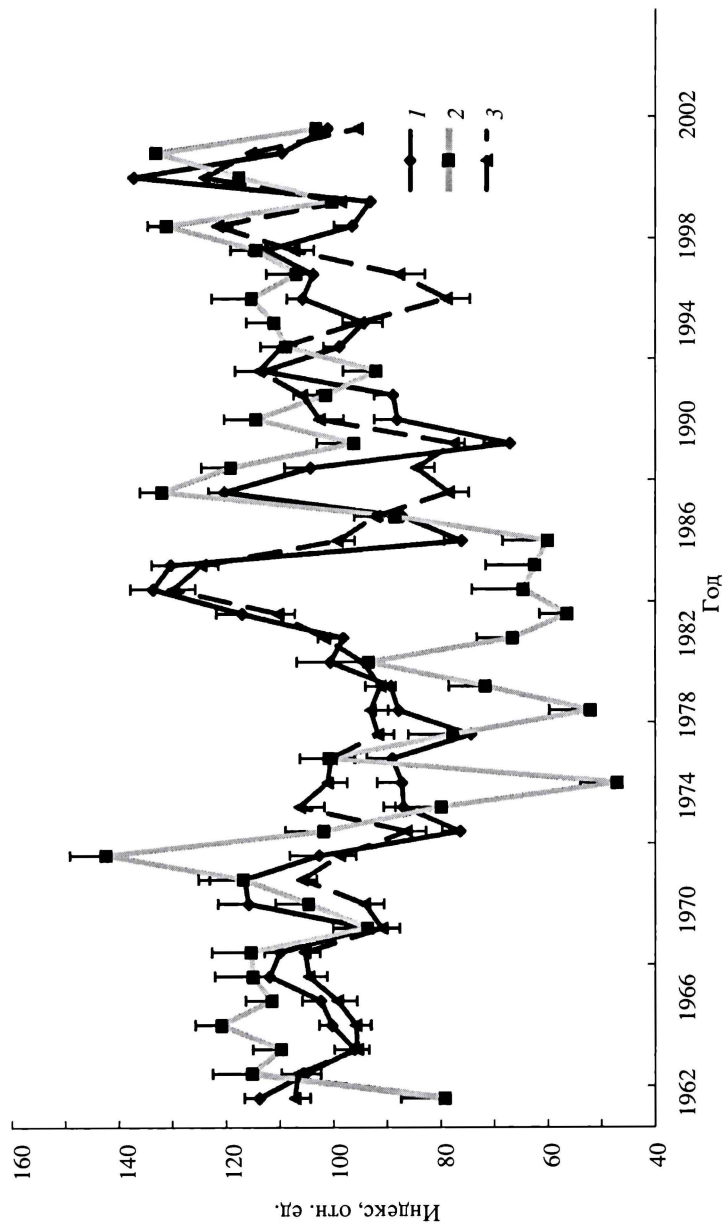


Рис. 13. Динамика индексов приростов сосновых древостоев, сформировавшихся в условиях фонового (ППП 4 – 1) и импактного (ППП 12 – 2) уровня загрязнения атмосферы промышленными выбросами, а также на значительном удалении от СУМЗа, вне зоны действия выбросов предприятия (ППП 16 – 3). Бары на графиках соответствуют ошибке среднего. Чтобы не загромождать рисунок, они отложены в одну сторону

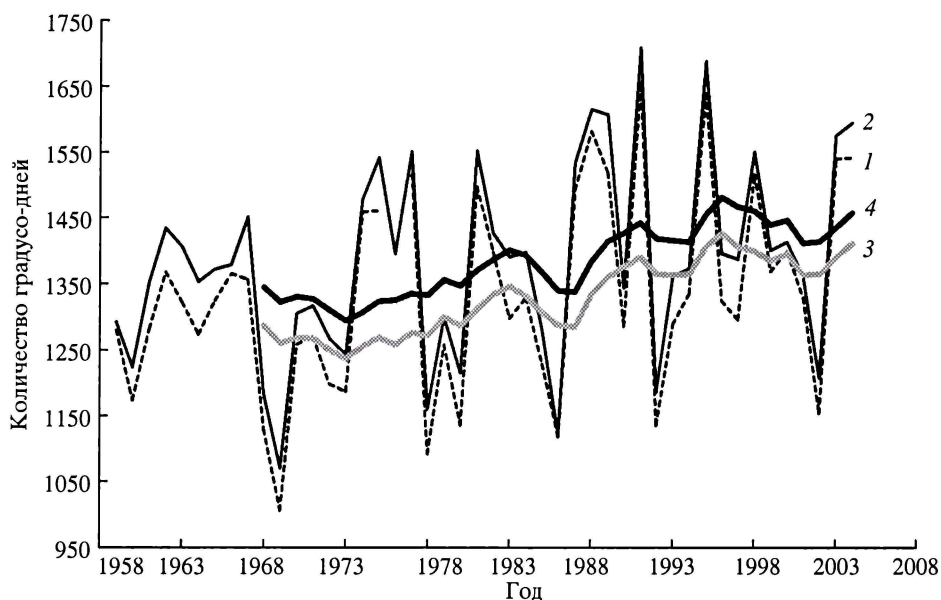


Рис. 14. График хода градусо-дней с порогом 5 °С по данным метеостанций гг. Ревды (1) и Михайловска (2); 3, 4 – скользящие десятилетние средние соответственно для гг. Ревды и Михайловска

свидетельствует о том, что повышение концентрации диоксида серы в воздухе в начале периода вегетации сопровождается снижением в текущем году интенсивности ростовых процессов сосновых деревьев, расположенных в импактной зоне. Напротив, рост концентрации взвешенных веществ в воздухе в марте–мае сопровождается увеличением индексов прироста деревьев текущего года на ППП 12 ($R_s = 0,66$; $\alpha < 0,05$), для вегетационного периода (май–август) значение данного показателя составляет 0,62 ($\alpha < 0,06$).

На рис. 14 приведены графики хода градусо-дней – суммы температур, превышающих порог 5 °С, рассчитанных по данным метеостанций гг. Ревды и Михайловска. Видно, что с 1959 по 2004 г. прослеживается общая тенденция увеличения значений данного показателя для обеих метеостанций.

На рис. 15 представлен график разности среднемесячных значений амплитуд температуры по результатам измерений на метеостанциях гг. Михайловск и Ревды в 1992–2002 гг. Видно, что усредненные по месяцам значения разности между максимальными и минимальными температурами, измеренными на метеостанции г. Михайловска, были больше аналогичного показателя, рассчитанного для метеостанции г. Ревды, почти на всем исследуемом временном отрезке. Можно предположить, что данный факт объясняется более высокой концентрацией взвешенных веществ и газов в атмосфере в районе действия СУМЗа. По-видимому, это создает «эффект покрывала», что приводит к сглаживанию суточных изменений температуры воздуха в районе задымления, ослабляя, возможно, отрицательное действие на ростовые процессы экстремально низких температур.

Для выяснения степени возможного влияния на древесную растительность сокращения значений суточных амплитуд температур была проведена оценка продолжительности теплого периода на метеостанциях гг. Ревды

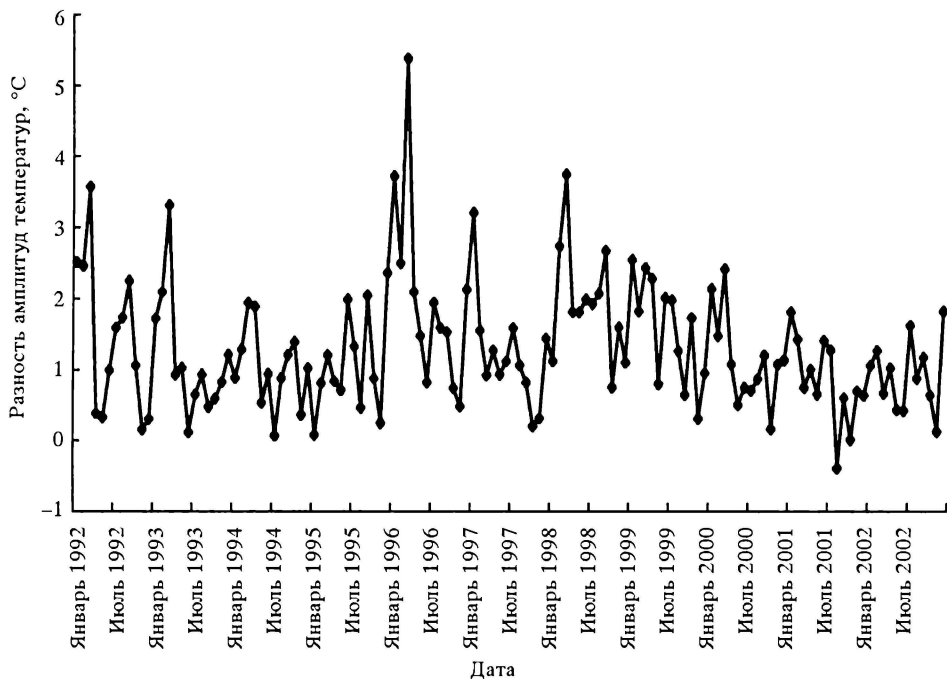


Рис. 15. Разность средних месячных значений амплитуд температур на метеостанциях гг. Михайловска и Ревды в 1992–2002 гг. (положительные значения указывают на превышение среднемесячного значения амплитуд температуры в г. Михайловске над среднемесячным значением амплитуд температуры в г. Ревде, отрицательное значение свидетельствует об обратном)

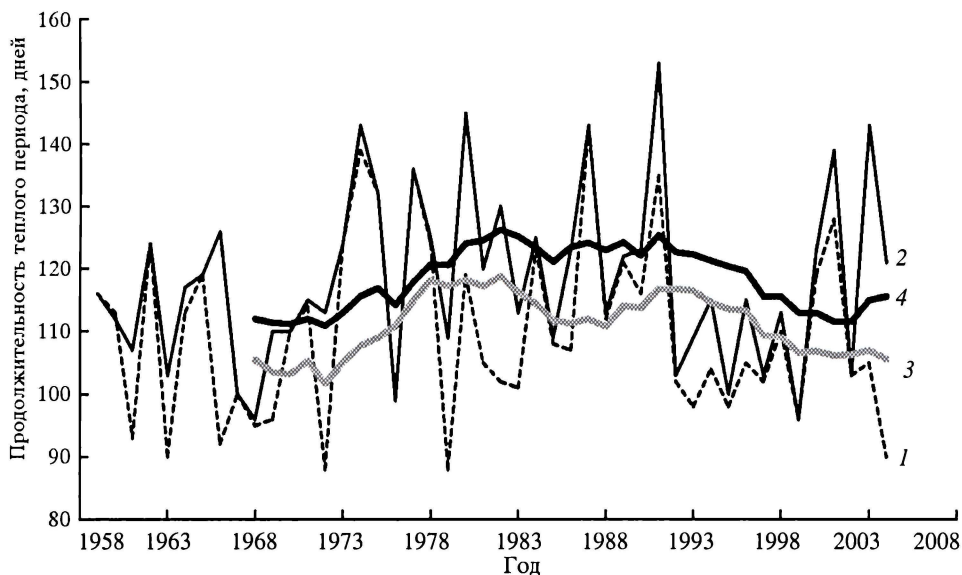


Рис. 16. Продолжительность теплого периода (непрерывный период – количество дней, при которых температура не опускалась ниже 5 °С) на метеостанциях гг. Ревды (1) и Михайловска (2); 3, 4 – скользящие десятилетние средние соответственно для гг. Ревды и Михайловска

и Михайловска, а также количества и продолжительности майских и сентябрьских заморозков – количество дней, при которых температура опускалась ниже 0 °С. Продолжительность теплого периода оценивали как непрерывный период – количество дней, при которых температура не опускалась ниже 5 °С.

Так как высотное положение метеостанций отличается (метеостанция в г. Михайловске находится на 37 м ниже, чем в г. Ревде), то, как и ожидалось, в целом продолжительность теплого периода в г. Михайловске была больше, чем в г. Ревде (рис. 16). Интерес представляет факт снижения продолжительности теплого периода на обеих станциях в 1990-е годы, хотя в этот период количество градусо-дней было выше, чем в предыдущие десятилетия (см. рис. 14).

Анализ хода климатических показателей, рассчитанных с порогом 10 °С, также имеет хорошо выраженный тренд к увеличению значений в исследуемый период (данные на рисунке не приведены). При этом и продолжительность теплого периода имеет хорошо выраженную тенденцию увеличения с конца 50-х годов XX в. до начала XXI в. Это свидетельствует о том, что, хотя продолжительность теплого периода в 1990-е годы была несколько меньше, чем в предыдущее десятилетие (см. рис. 15), эти годы были более теплыми.

Несмотря на то, что климатические условия в данном районе исследований не являются экстремальными для выживания и роста древесной растительности, тем не менее требуется исследование влияния на растения сокращения продолжительности теплого периода при увеличении его средней температуры. Приведенные выше результаты важны для исследования временных рядов данных показателей в климатически экстремальных для роста растений районах. Известно, что в таких условиях продолжительность вегетационного периода – один из критически важных показателей для выживания молодого поколения леса.

Интерес также представляет анализ майских и сентябрьских заморозков на метеостанциях гг. Ревды и Михайловска. За исследуемый период майские заморозки были зафиксированы с 1961 по 2000 г. При этом на метеостанциях они наблюдались в 13-ти и 8-ми годах соответственно, а количество заморозков составляло 17 и 10 общей продолжительностью 25 и 13 дней. Эти данные хорошо согласуются с тем фактом, что метеостанция г. Михайловска расположена на меньшей высоте по сравнению со станцией г. Ревды. Однако в сентябре температура опускалась ниже нуля с 1959 по 1996 г. За этот период заморозки были зафиксированы в 8-ми и 9-ти годах в Ревде и Михайловске соответственно. При этом количество заморозков на обеих станциях было одинаковым – 10, а их общая продолжительность составила 16 и 15 дней соответственно.

Также следует отметить, что с 2000 г. в мае и с 1996 г. в сентябре заморозков в исследуемых районах не наблюдалось. Причины такого расхождения в частоте и продолжительности майских и сентябрьских заморозков требуют дальнейшего изучения. Можно предположить, что для роста растений более критическими являются заморозки в начале периода вегетации. Осенью, при переходе растений в период глубокого покоя, их негативное действие, возможно, уменьшается. Тем не менее этот аспект взаимодействия агропромышленных загрязнений и мезоклимата и их совместное влияние на выживаемость и рост древесных растений требуют дальнейшего изучения.

Известно, что фактор загрязнения влияет на ростовые процессы деревьев преимущественно в импактной зоне, причем увеличение концентрации диоксида серы подавляет их ростовую активность на ППП 12. Сравнительный анализ характеристик климата и показателей загрязнения воздуха не позволил обнаружить наличие достоверной корреляции между концентрацией взвешенных веществ в воздухе в мае–августе и плювиотермическим коэффициентом, однако была установлена взаимосвязь между временными рядами значений концентраций в воздухе взвешенных веществ в мае–июне и величинами гидротермического коэффициента Селянинова, рассчитанного по данным метеостанции г. Михайловска ($R_S = 0,79$; $\alpha < 0,05$).

На рис. 17 представлены графики хода концентрации взвешенных веществ в воздухе и суммы выпавших осадков в мае–августе 1992–2002 гг.; видно, что увеличение концентрации взвешенных веществ в течение периода вегетации сопровождается ростом количества выпадающих за этот период осадков. Эти данные хорошо согласуются с результатами корреляционного анализа между величинами гидротермического коэффициента Селянинова, рассчитанного по данным метеостанции г. Михайловска, и концентрацией взвешенных веществ в воздухе, рассчитанной для начала периода вегетации. Можно предположить, что при выпадении осадков концентрация взвешенных веществ у поверхности земли будет выше, так как часть из них будет перенесена осадками в приземный слой воздуха, где и измеряли концентрацию.

Известно, что изменения климата могут воздействовать на перераспределение и смешивание поллютантов в атмосфере. Как правило, это обусловлено изменением ветровых условий, а также количеством и интенсивностью выпадения осадков (Bytnerowicz et al., 2007). Кроме того, нельзя исключать также тот факт, что пылевые частицы могут служить дополни-

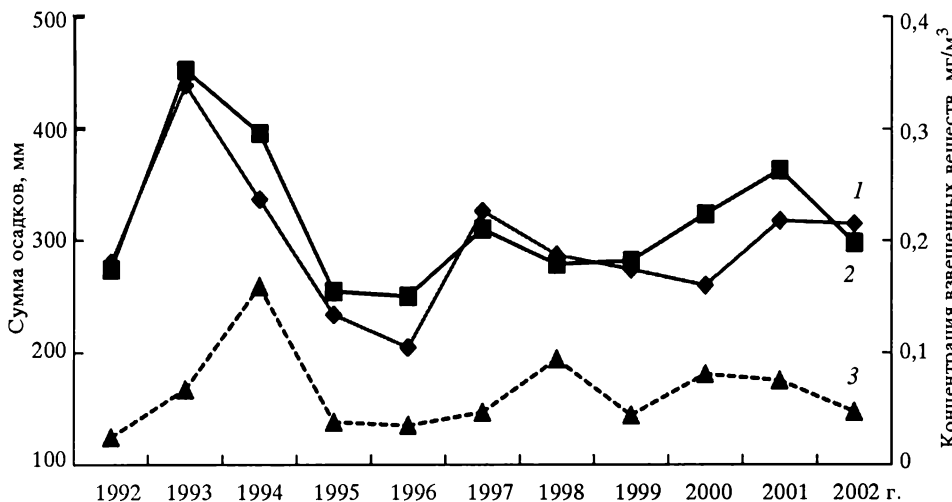


Рис. 17. Графики хода суммы выпавших осадков за май–август по данным метеостанций г. Ревды (1) и Михайловска (2), а также концентрации взвешенных веществ в воздухе (3) на основе данных поста наблюдений ПНЗ № 1 ГУ «Свердловский ЦГМС-Р» за период с 1992 по 2002 г.

тельными ядрами конденсации в облаках. Поэтому загрязнение атмосферы взвешенными частицами может способствовать выпадению большего количества осадков.

Таким образом, под воздействием аэропромышленных выбросов медеплавильного производства происходит нарушение динамики радиальных приростов деревьев сосны обыкновенной. При этом наибольшие отклонения хода индексов приростов деревьев, произрастающих в импактной зоне, по сравнению с контрольными деревьями приходится на 70-е – начало 80-х годов XX в. – самый холодный период второй половины XX века. В этот же период на Среднем Урале наблюдалось сокращение количества осадков.

Известно, что в экстремальных почвенно-климатических условиях растения очень остро реагируют даже на незначительное изменение климата. Существенное отклонение хода значений индексов прироста в импактной зоне позволяет предполагать, что древесные растения, произрастающие в экстремальных условиях загрязнения атмосферы выбросами медеплавильного производства, становятся более чувствительными к изменению климатических условий.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ В ЗОНАХ ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

4.1. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ

Экологическое зонирование лесов в районах антропогенного воздействия имеет важное фундаментальное и прикладное значение. На основании его результатов представляется возможным судить о состоянии лесных сообществ, их пространственно-временной динамике, а также позволяет обосновать подходы к оценке ущерба, нанесенного лесам аэропромвыбросами, и планировать проведение лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение их продуктивности и средообразующих функций.

Широкое распространение получило зонирование состояния лесных экосистем с использованием методов 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 состояния древесной растительности 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, а диагностика и экологическое зонирование – необходимыми предварительными этапами при создании системы постоянных пунктов слежения за изменениями, происходящими в лесных биогеоценозах.

Ниже приведены результаты исследований по экологическому зонированию состояния лесов в районах действия атмосферных промышленных загрязнений вокруг городов Первоуралька и Ревды на основе морфометрических характеристик древостоев с использованием географической информационной системы (ГИС) и геостатистического пакета программ. Зонирование было проведено с использованием метода пространственной интерполяции «кригинг» и рассмотрены возможности перечисленных подходов в пространственном анализе отдельных компонентов лесных насаждений и действующих на них факторов.

В табл. 7 приведены параметры уравнений, аппроксимирующих семивариограммы, полученные для различных характеристик древостоев. Модель с анизотропической ориентацией осей хорошо описывает семивариограммы только по отдельным направлениям, а по другим уровень аппроксимации значительно ниже требуемого. В целом значения коэффициентов детерминации изотропических моделей значительно выше, чем анизотропических, поэтому для описания зависимостей семиварианс от лага использо-

Таблица 7

Параметры уравнений, аппроксимирующих семивариограммы, рассчитанные по различным характеристикам древостоев

Характеристика	Тип модели	C_0	$C_0 + C$	a или $3r, км$	R^2
Диаметр, см ²	Экспоненциальная	2,480	4,113	21,72	0,965
Высота, м ²	Сферическая	1,961	4,170	12,00	0,950
Радиальный прирост за 10 лет, см ²	Экспоненциальная	0,075	0,192	8,10	0,950
Прирост по высоте за 10 лет, м ²	–”–	0,179	0,825	12,00	0,970
Обобщенный показатель состояния (ОПС), балл	–”–	87,100	174,300	18,00	0,965

вали два вида изотропических моделей – экспоненциальную и сферическую. Коэффициенты детерминации для всех уравнений составляют величины 0,95 и выше.

На рис. 18 представлена семивариограмма, рассчитанная на основе величин обобщенных показателей состояния (ОПС) по морфометрическим характеристикам. Форма кривой, изображенной на рисунке, а также данные таблицы свидетельствуют о том, что максимальное расстояние между ВПП, при котором еще существует пространственная корреляция между значениями ОПС, составляет 18 км. Чем меньше удаление одной ВПП 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 ВПП 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 ВПП.

Коэффициент автокорреляции Морана также широко используется в автокорреляционной статистике. С уменьшением расстояния между пробными площадями значения коэффициентов последовательно возрастают, что сви-

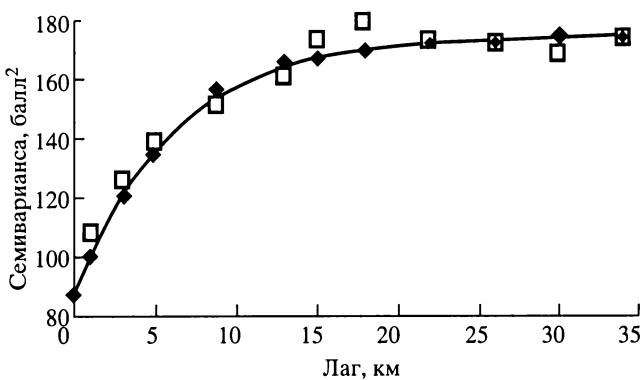


Рис. 18. Зависимость значений семиварианс от расстояния между пробными площадями (лаг), рассчитанная на основе величин обобщенных показателей состояния (квадраты – средние значения семиварианс, сплошная линия – расчетные величины)

детельствует о наличии пространственной корреляции значений параметра между ВПП. При лаге 2 км величина коэффициента достигает 0,37.

На основе результатов анализа семиварианс была произведена интерполяция значений характеристик древостоев методом «кригинг». Для всех поверхностей характерно снижение значений морфометрических параметров в центральной части района исследований. Минимальные величины характеристик наблюдаются в точке с координатами местоположения СУМЗа.

Поверхность, полученная в результате интерполяции величин диаметров, изображена на рис. 19. Наблюдаемая на ней вытянутая в восточном направлении «низменность» 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». Дополнительная информация о расположении СУМЗа, структуре и объеме поллютантов и других показателей не привлекалась.

Таким образом, существенное снижение величин морфометрических характеристик роста деревьев с приближением к СУМЗу свидетельствует о значительном отрицательном влиянии загрязнений завода на состояние

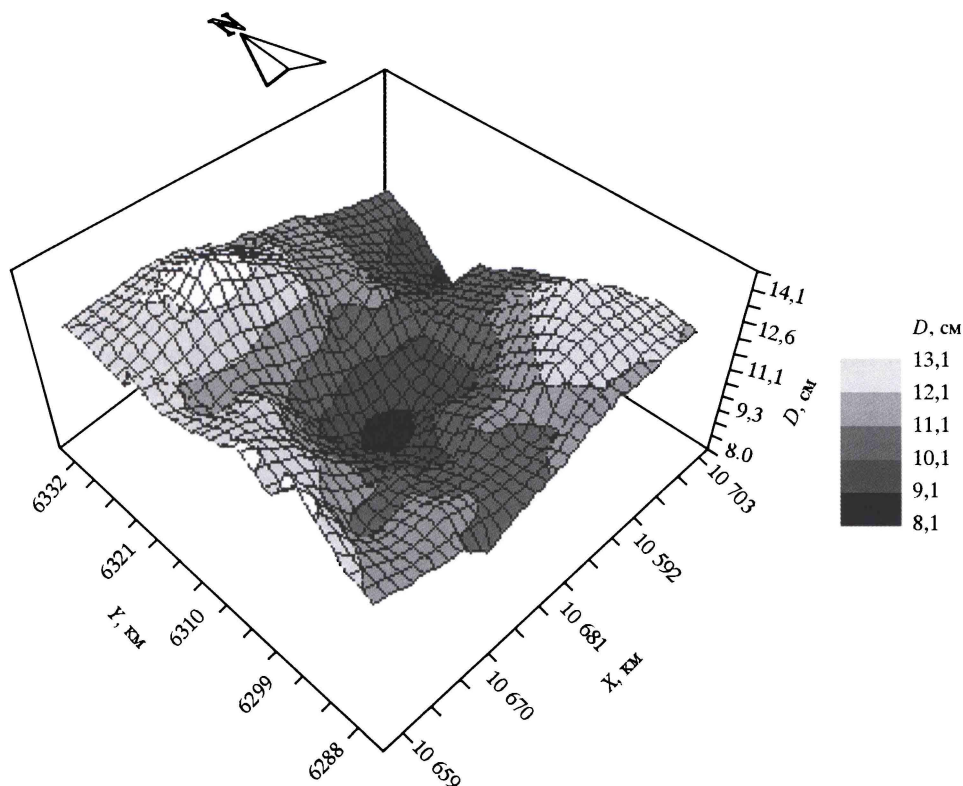


Рис. 19. Поверхность, полученная в результате интерполяции величин средних приведенных диаметров древостоев

древостоев. Карта-схема зон состояния сосновых молодняков, рассчитанная по величинам ОПС, изображена на рис. 20. Увеличение интенсивности цвета означает ухудшение состояния лесных насаждений.

Для оценки влияния орографического фактора на состояние древостоев была создана электронная карта рельефа местности (рис. 21). Величины ОПС для зон с различным состоянием древостоев, 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 баллов – хорошее (IV). Параметры распределения значений ОПС по всем 119 ВПП свидетельствует о нормальном распределении. 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 \pm стандартное отклонение.

Из анализа рис. 20 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 вы-

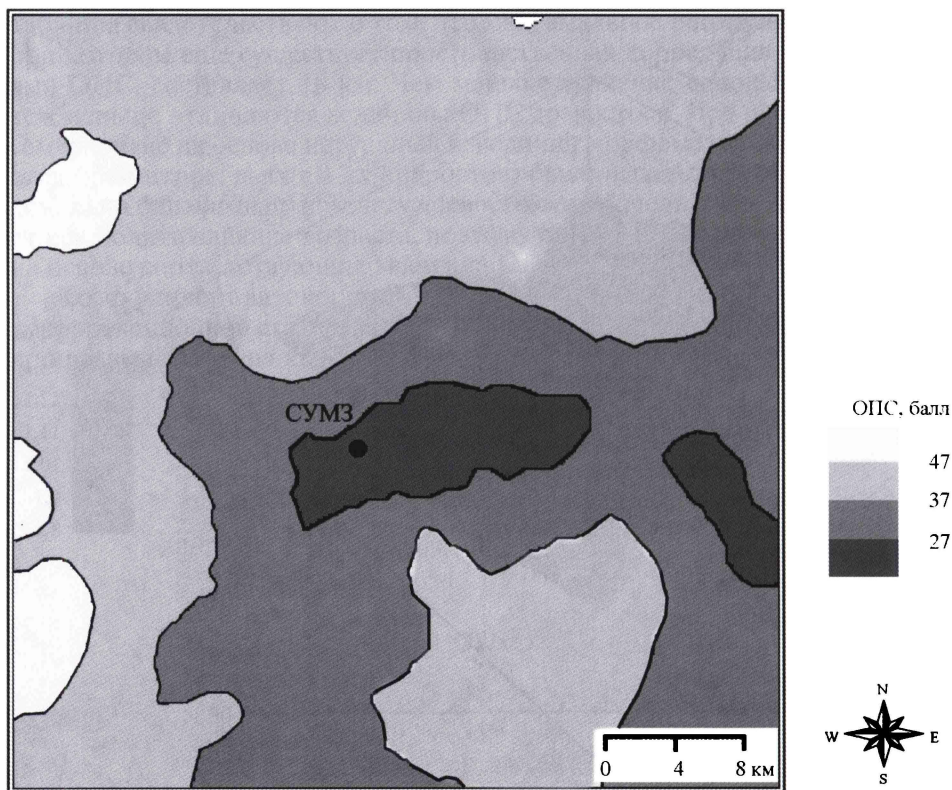


Рис. 20. Карта-схема зон состояния насаждений, составленная по величинам обобщенных показателей состояния древостоев

Рис. 21. Карта рельефа местности района исследований

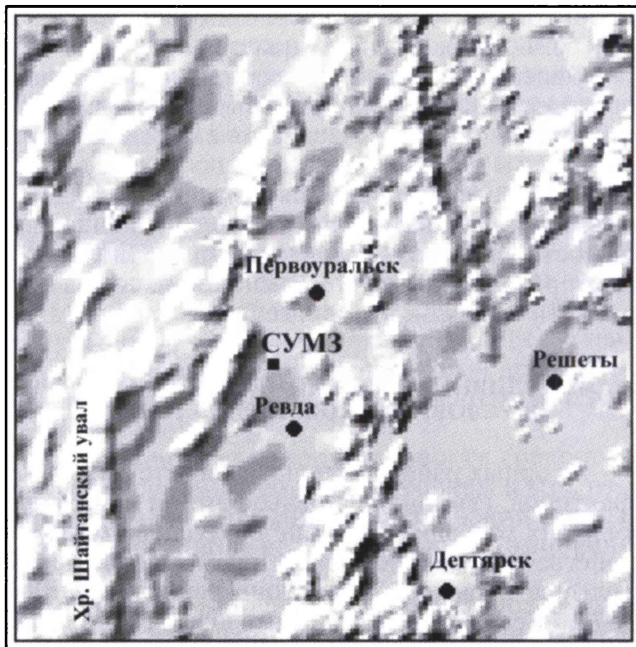
раженным рельефом местности на этом участке. Второй участок, на котором расположена зона с очень плохим состоянием древостоев, находится у восточной границы района исследований (на удалении примерно 20–25 км от СУМЗа). Низкий балл состояния на пробных площадях, расположенных внутри данной зоны, можно объяснить их близостью к железной дороге и транспортному узлу Решеты.

Зона с баллом состояния древостоев 27–37 также вытянута на восток, но имеет не-

сколько 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 (рис. 21), что способствует беспрепятственному продвижению сюда загрязненных воздушных масс от СУМЗа. 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 интерполяции значений параметров между экспериментальными точками. Применение анализа полученных с использованием интерполяции поверхностей дает возможность сделать объективное заключение



0 4 8 км



ние о том, что с приближением к основному источнику аэропромвыбросов состояние древостоев ухудшается.

Описанный выше подход оценки состояния древостоев и картирования 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 картой рельефа местности позволяет 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.

4.2. ВЛИЯНИЕ АЭРОПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ДРЕВОСТОИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОРАСЧЛЕНЕННОГО РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

В горных районах лесные экосистемы испытывают действие комплекса факторов, 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 (Сысуев, 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 угнетения 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 информации 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 степени влияния на них рельефа уделяется недостаточно внимания. В данном разделе приведены результаты количественной оценки комплексного действия рельефа и аэропромышленных загрязнений на биометрические параметры сосновых древостоев на примере конкретного района.

Было проведено исследование сосновых древостоев естественного происхождения, произрастающих в условиях горно-увалистого рельефа на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда). Объекты и методика исследований подробно описаны во второй

главе. Факторный анализ методом главных компонент на основе комплекса описанных выше параметров древостоев позволил 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 средние высота, диаметр, возраст и запас, весовые коэффициенты которых имеют значения 0,980, 0,949, 0,891 и 0,728 соответственно (табл. 8). Максимальная абсолютная нагрузка на отрицательной полуоси первого фактора приходится на относительную полноту 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 характеристиками древостоев. С учетом этого факта первую главную компоненту условно можно назвать «антропогенно-фитоценотической».

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

Пространственные закономерности распределения параметров древостоев и характеристик рельефа лесных участков на территории района исследований характеризуют третий фактор. По отношению к исследуемому 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 (табл. 8). Отрицательный весовой коэффициент экспозиции склона (–0,383) свидетельствует о снижении величины кода экспозиции участков с удалением от СУМЗа. Факторные нагрузки по остальным переменным невелики, что свидетельствует об относительно небольшом увеличении возраста древостоев, диаметра, высоты, относительной полноты и запаса, а также снижении бонитета с увеличением расстояния до завода.

Таблица 8

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

Характеристика	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Экспозиция склона (<i>Asp</i>)	0,030	0,640	–0,383
Высота над уровнем моря (<i>E</i>)	0,162	–0,650	0,448
Уклон склона (<i>S</i>)	0,048	–0,051	0,789
Расстояние до СУМЗА (<i>R</i>)	0,387	0,120	0,651
Возраст (<i>A</i>)	0,891	–0,362	0,123
Бонитет (<i>B</i>)	–0,065	–0,776	–0,196
Средний диаметр (<i>D</i>)	0,949	–0,253	0,104
Средняя высота (<i>H</i>)	0,980	0,065	0,147
Относительная полнота (<i>P</i>)	–0,330	0,755	0,122
Запас (<i>Z</i>)	0,728	0,543	0,254

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

$$D^{1/2} = 2,150 + 0,040A_{sp} + 0,157R - 0,005E - 0,964P + 0,517A^{1/2},$$

$$R^2 = 0,941, \quad (17)$$

где R^2 – коэффициент детерминации; расшифровка переменных A_{sp} , R , E , P и A приведена в табл. 8. 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 удалением от СУМЗа возрастает значение среднего диаметра, а при увеличении высоты местности над уровнем моря и возрастании относительной полноты его величина снижается. Возрастание относительной полноты при фиксированном возрасте может означать как увеличение диаметров стволов при снижении густоты древостоя, так и уменьшение 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:

$$H = -25,979 + 0,348A_{sp} + 1,159R - 0,018E + 10,988\ln A, \quad (18)$$

$$R^2 = 0,956.$$

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, равна 8,4%. Знаки коэффициентов при A_{sp} , R и E в уравнениях (17) и (18) 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 model) позволило выделить участки территории, различающиеся по интенсивности и длительности освещения в течение светлого времени суток и разработать вариант кодировки, приведенный на рис. 8.

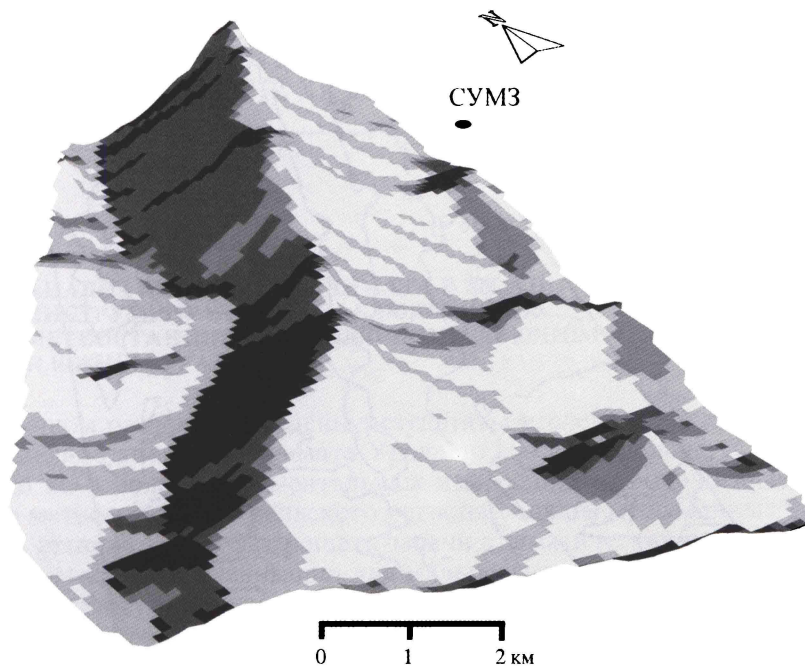


Рис. 22. Поверхность района исследований с нанесенными на нее кодами экспозиции склонов (см. рис. 8). Усиление интенсивности окраски означает снижение их значений. Реальные отметки высот на рисунке увеличены в 5 раз по сравнению с фактическими

Поверхность района исследований с нанесенными на нее кодами экспозиции склонов изображена на рис. 22.

Лесостроительные материалы несут достаточно ограниченный объем информации о древостоях, не отражающей 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 (17) и (18) и хорошая интерпретируемость входящих в них параметров являются важными их достоинствами.

Используя алгебраические уравнения, с помощью растрового моделирования в ГИС можно создавать карты с искомыми параметрами. На основе уравнения (18) были рассчитаны средние высоты сосновых насаждений в возрасте 100 лет на всей территории района исследований (рис. 23). Изолинии средних высот древостоев графически отражают комплексное влияние местности и аэропромышленных загрязнений на величину данного параметра. Данный рисунок 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.

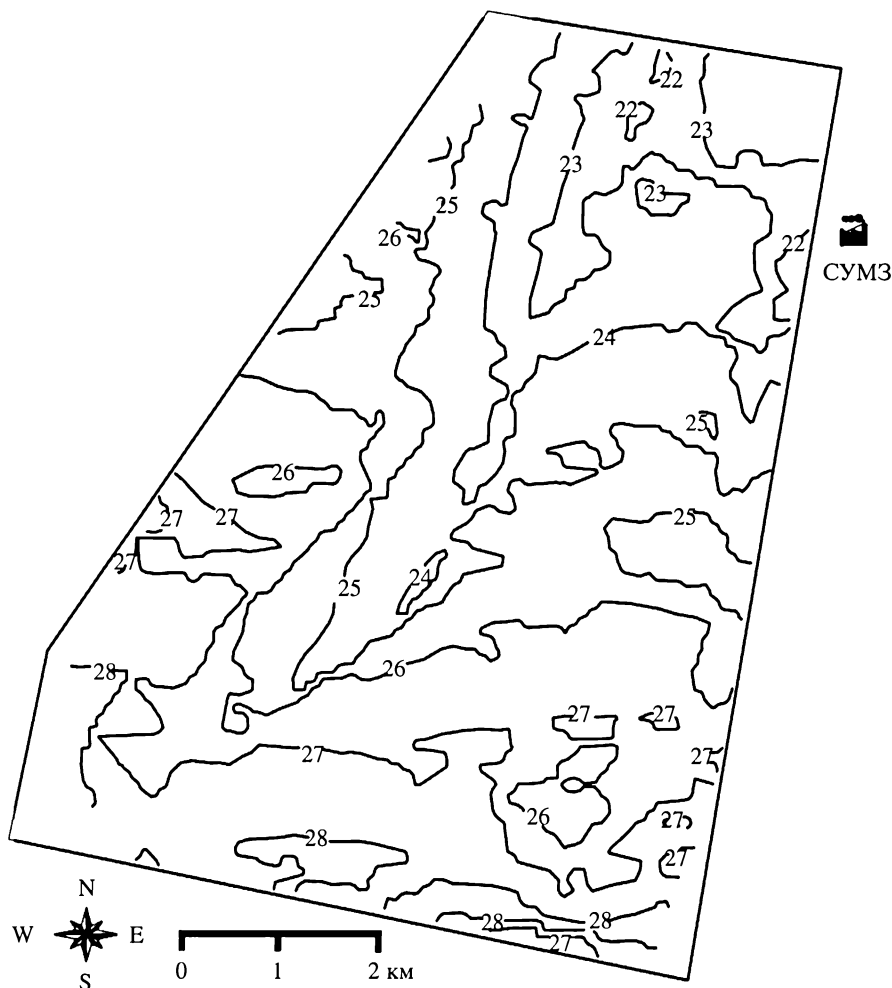


Рис. 23. Изолинии прогнозируемых средних высот сосновых насаждений района исследований в возрасте 100 лет, рассчитанные по уравнению (18)

С помощью уравнений зависимости базовых характеристик древостоев от параметров местоположения лесного участка можно 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 в целом.

Совершенствование моделей и расчет прогнозных карт базовых таксационных характеристик древостоев на основе регрессионных уравнений и растрового моделирования с помощью ГИС в перспективе позволят увеличить ревизионный период между повторным лесоустройством и снизить затраты на его проведение.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.

5.1. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В XX в. ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА МЕТЕОСТАНЦИЯХ НА ПОЛЯРНОМ, СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ УРАЛЕ

В данном разделе приведены результаты исследований пространственно-временной динамики климата Урала во второй половине XX в., проведенного на основе инструментальных измерений метеорологических данных на метеостанциях Уральского региона. Анализ метеоданных десятков и сотен станций позволяет решать задачи климатической реконструкции с высокой степенью детализации для малых масштабов. Такая реконструкция очень важна для задач, связанных с оценкой реакции наземных экосистем на изменение климата, и в частности для задачи, связанной с исследованием смещения верхней границы леса (Шиятов, Мазепа, 2002; Капралов и др., 2006; Фомин и др., 2006; Шиятов и др., 2007).

В XX в. на горных массивах Урала установлено повторное за последнее тысячелетие поднятие верхней границы леса. Предыдущий подъем границы леса происходил в средневековье, в 1100–1200 гг. (Шиятов, Мазепа, 2002; Демежко, 2003). За последнее столетие произошло значительное увеличение густоты, сомкнутости крон и продуктивности древостоев в экотоне верхней границы леса, а также увеличение степени облесенности территории. Экспансия древесной растительности в горную тундру обусловлена повышением температуры воздуха в летнее и, особенно, в зимнее время (Моисеев и др., 2004), а также увеличением длительности вегетационного периода, так как для древостоев, произрастающих на верхнем пределе распространения, эти факторы являются лимитирующими (Шиятов и др., 2005).

Учитывая практическую значимость происходящих потепления и увлажнения климата и их влияние на биопродуктивность растительности на горных массивах, которая в свою очередь является одним из важнейших климатообразующих факторов (Основы лесной биогеоценологии..., 1964), представляется необходимым проведение исследований изменения температуры воздуха и выпадения осадков на Урале в XX в.

Анализ пространственно-временной динамики температуры воздуха и количества выпадающих осадков на Урале – одна из задач, решение которой позволит получить данные об изменении климатических характеристик на территории Уральского региона. Это необходимо также для уточнения общих моделей изменения климата в масштабе региона с учетом сложнорасчлененного рельефа.

Урал является уникальным районом для изучения климата благодаря значительной меридиональной протяженности. Часть его территории рас-

положена в высоких широтах, для которых установлены максимальные температурные аномалии. Это позволяет более детально оценить последствия потепления и увеличения количества осадков в горной местности. Кроме того, регионы с континентальным типом климата более чувствительны к влиянию происходящих глобальных изменений (Ефимова и др., 2004).

На Урале климат формируется в основном под воздействием воздушных масс: с запада – атлантических, с севера – арктических, при этом большая часть осадков выпадает на западных склонах Уральской горной страны. Неоднородность климата определяется изменчивостью во времени и пространстве ведущих климатических показателей, в первую очередь температуры воздуха и количества выпадающих осадков. На основании полученных нами данных проведен анализ изменения температур воздуха и осадков, подтверждающий тенденцию потепления и увлажнения климата на Урале во второй половине XX в.

Временные ряды среднегодовых аномалий, приведенные на рис. 24 *a–e*, отражают временную динамику температуры воздуха и количества осадков на метеостанциях городов Салехард (Полярный Урал), Чердынь (Северный Урал) и Златоуст (Южный Урал). На рисунках также представлены тренды линейной зависимости и значения скользящего среднего с десятилетним периодом сглаживания для визуализации тенденций, свидетельствующих об изменении величин температур и осадков во времени. Аномалии среднегодовой температуры показывают (см. рис. 24 *a, в, д*) увеличение отклонений от базового периода для линейных трендов станций, расположенных в Златоусте (1,26 °C за 100 лет), Чердыни (1,01 °C за 100 лет) и Салехарде (0,77 °C за 100 лет). Максимальные положительные аномалии температуры отмечены в 1995 г. в Салехарде и Чердыни, а в Златоусте – одни из самых высоких.

Анализ данных метеостанций за другие периоды показал, что наиболее значительное потепление характерно для зимнего периода (максимальный рост температур зафиксирован в Чердыни, а также Златоусте, в меньшей степени – в Салехарде). В летние месяцы наибольшие изменения температуры воздуха произошли в Салехарде и Чердыни, в меньшей степени – в Златоусте. Общей тенденцией изменения аномалий суммарных годовых осадков можно назвать рост их значений за исследуемый период на всех трех станциях (см. рис. 24 *б, г, e*).

На рис. 25 изображены временные ряды среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли и суммарного количества осадков для описанных выше метеостанций. Хорошо виден тренд увеличения значений климатических показателей в XX в. Увеличение среднегодовой температуры обусловлено в основном потеплением холодного периода года (ноябрь–март).

Соотношение тепла и влаги, определяемое плювиотермическим коэффициентом, для большинства лет превышает норму, что позволяет говорить об избыточном увлажнении климата на Урале. Максимальные значения коэффициента отмечены на всех трех станциях в 1966 и 1969 гг., что обусловлено низкими значениями температур и высокими величинами сумм осадков в эти годы. Анализ линейного тренда аномалий плювиотермического коэффициента на всех трех станциях показал, что их значения изменяются несущественно.

Временные ряды пространственно осредненных данных по всем представленным в работе метеостанциям Урала отражают положительные

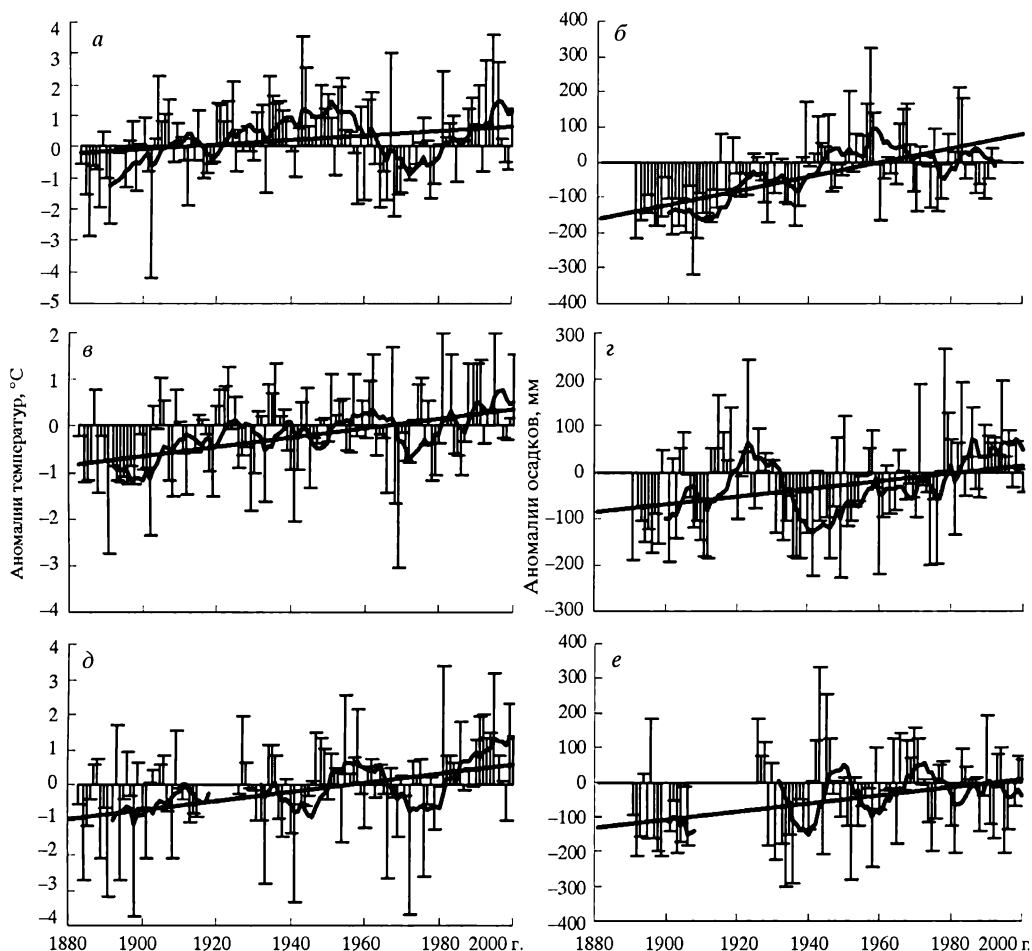


Рис. 24. Временные ряды отклонений среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли и суммарного количества осадков за год от нормы для метеостанций Салехард (Полярный Урал – а, б), Чердынь (Северный Урал – в, з) и Златоуст (Южный Урал – д, е). За норму принят период 1961–1990 гг. Жирной линией показаны линейные тренды и кривые скользящего среднего с десятилетним периодом сглаживания

тренды среднегодовой температуры воздуха и суммарных годовых осадков (рис. 26 а, б). Максимальные температуры за период с 1961 по 2000 г. отмечены в 1995 г., а минимальные – в 1969 г. Наибольшее и наименьшее суммарное количество осадков выпало соответственно в 1990 и 1975 гг.

Для большинства станций Северного и Среднего Урала значения плювиотермического коэффициента соответствуют избыточному увлажнению воздуха. Максимальные аномалии величин данного коэффициента (4,6 °C) получены в 1969 г. для начала вегетационного периода, а наименьшие (–2,3 °C) – в 1981 г. для конца периода вегетации.

В целом динамика величин плювиотермического коэффициента носит характер увеличения значений аномалий в конце периода вегетации, а для

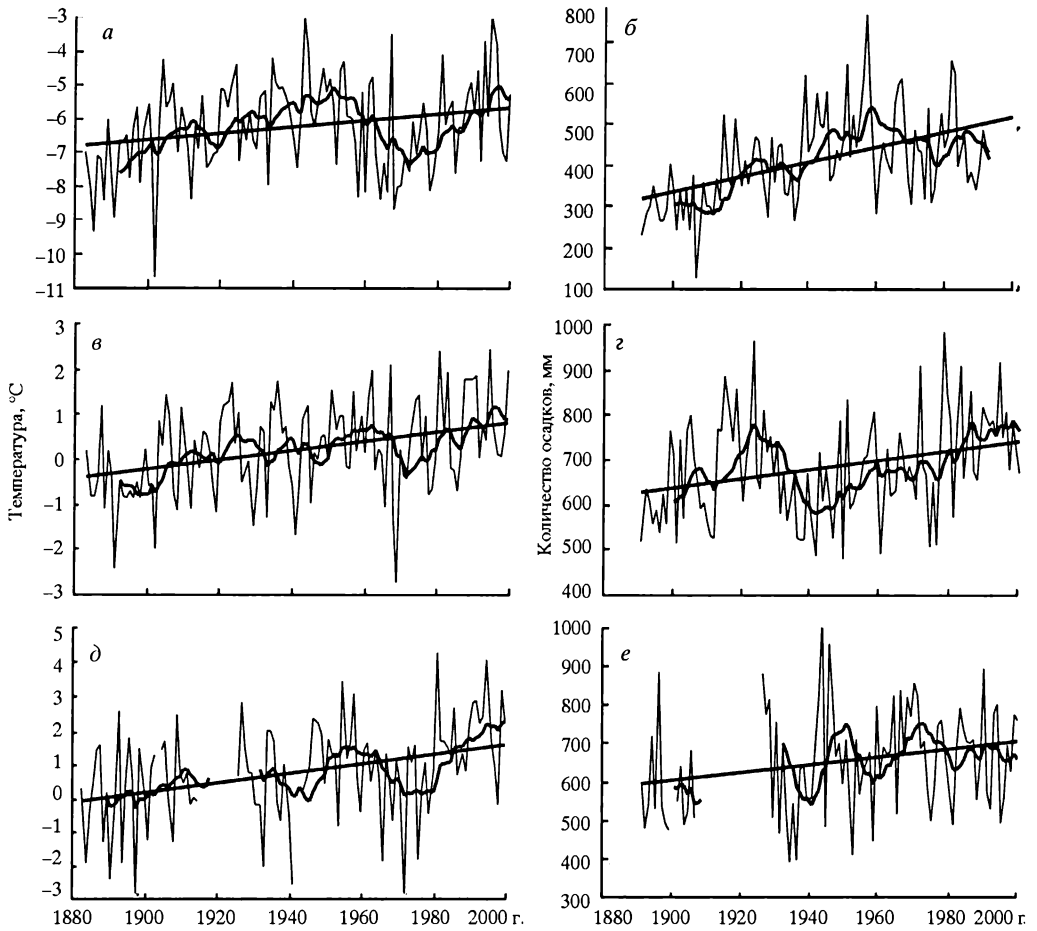


Рис. 25. Временные ряды среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли и суммарного количества осадков за год для метеостанций Салехард (Полярный Урал – а, б), Чердынь (Северный Урал – в, г) и Златоуст (Южный Урал – д, е)

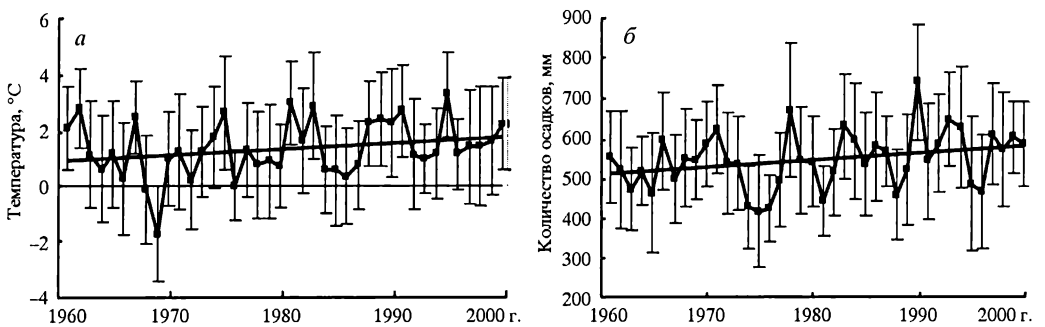


Рис. 26. Временные ряды пространственно осредненных среднегодовых температур воздуха у поверхности земли (а) и суммарного количества осадков за год со среднеквадратичным отклонением (б) для Уральского региона

начала характерно уменьшение разброса отклонений, особенно в последнем десятилетии.

5.2. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ НА УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.

Анализ пространственного распределения значений климатических показателей на Урале выявил ряд его особенностей, связанных с географическим и высотным положением. В частности, при сопоставлении температурных карт для двадцатилетий 1961–1980 и 1981–2000 гг. прослеживается явно выраженная тенденция смещения границ температурных зон, что соответствует наиболее существенному потеплению в северных широтах (рис. 27–28). Это подтверждает и климатическая карта распределения разности температур между двадцатилетиями, на которой явно прослеживается северо-восточное направление градиента потепления (рис. 29). В среднем разность температур между двадцатилетиями составила $0,77\text{ }^{\circ}\text{C}$, достигая максимальной величины $1,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ на Полярном Урале, при этом в горах потепление происходило менее интенсивно по сравнению с равнинными участками.

Сравнительный анализ карт средних температур для десятилетних временных интервалов (Приложения Б–Д) позволил установить следующие тенденции. В 1960-е и 1970-е годы наблюдалось незначительное потепление (до $0,23\text{ }^{\circ}\text{C}$) по направлению от горных массивов Урала к юго-западу. В противоположном, северо-восточном, направлении происходил процесс похолодания (до $-0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$). В результате среднее значение температуры воздуха для разности по этим десятилетиям составляет $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. 1980-е годы были теплее, чем предыдущее десятилетие, примерно на $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а градиент потепления направлен с запада на восток с максимальной разницей температур воздуха $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характерная особенность этого периода – хорошо выраженное потепление в горах, особенно на Полярном Урале.

Сравнение карт температур 1980-х и 1990-х годов позволяет судить о потеплении по направлению к северо-востоку от Среднего Урала (до $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$) и похолоданию к юго-западу (до $-0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$) с более высокими температурами по всей протяженности горных массивов по сравнению с равнинной территорией, особенно на Северном и Полярном Урале.

Анализ климатических данных позволяет утверждать, что на Урале наблюдается тенденция к повышению увлажнения климата (см. рис. 25 и 29). Среднее значение разности суммарных среднегодовых осадков между двадцатилетиями составило $39,2\text{ мм}$. Анализ распределения осадков по десятилетним временным интервалам свидетельствует об уменьшении количества осадков в 1970-е годы по сравнению с 1960-ми на большинстве станций Среднего Урала. Исключение составляют метеостанции западного макросклона Северного Урала, на которых прослеживается тенденция роста количества выпадающих осадков. В 1980-е годы наблюдается увеличение количества осадков на всех станциях Северного и Среднего Урала по сравнению с предыдущим десятилетием. Сравнение 1980-х и 1990-х годов позволило выявить только различия по суммам осадков (до 150 мм) на некоторых станциях Северного Урала.

Описанные выше результаты хорошо согласуются с данными пространственно-временной динамики горных растительных сообществ. На рис. 30 *а–е* приведены исторические ландшафтные фотографии верхней

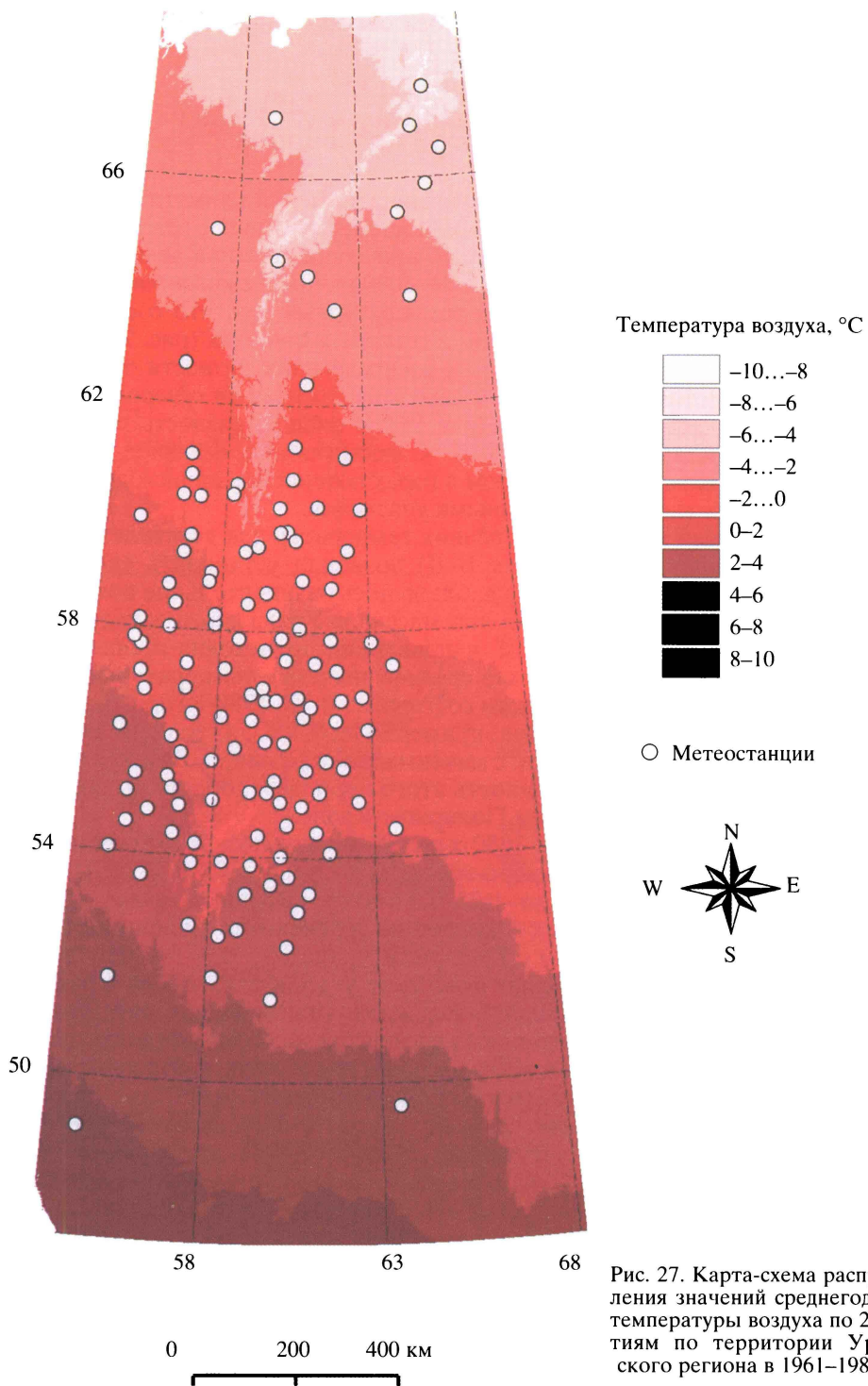
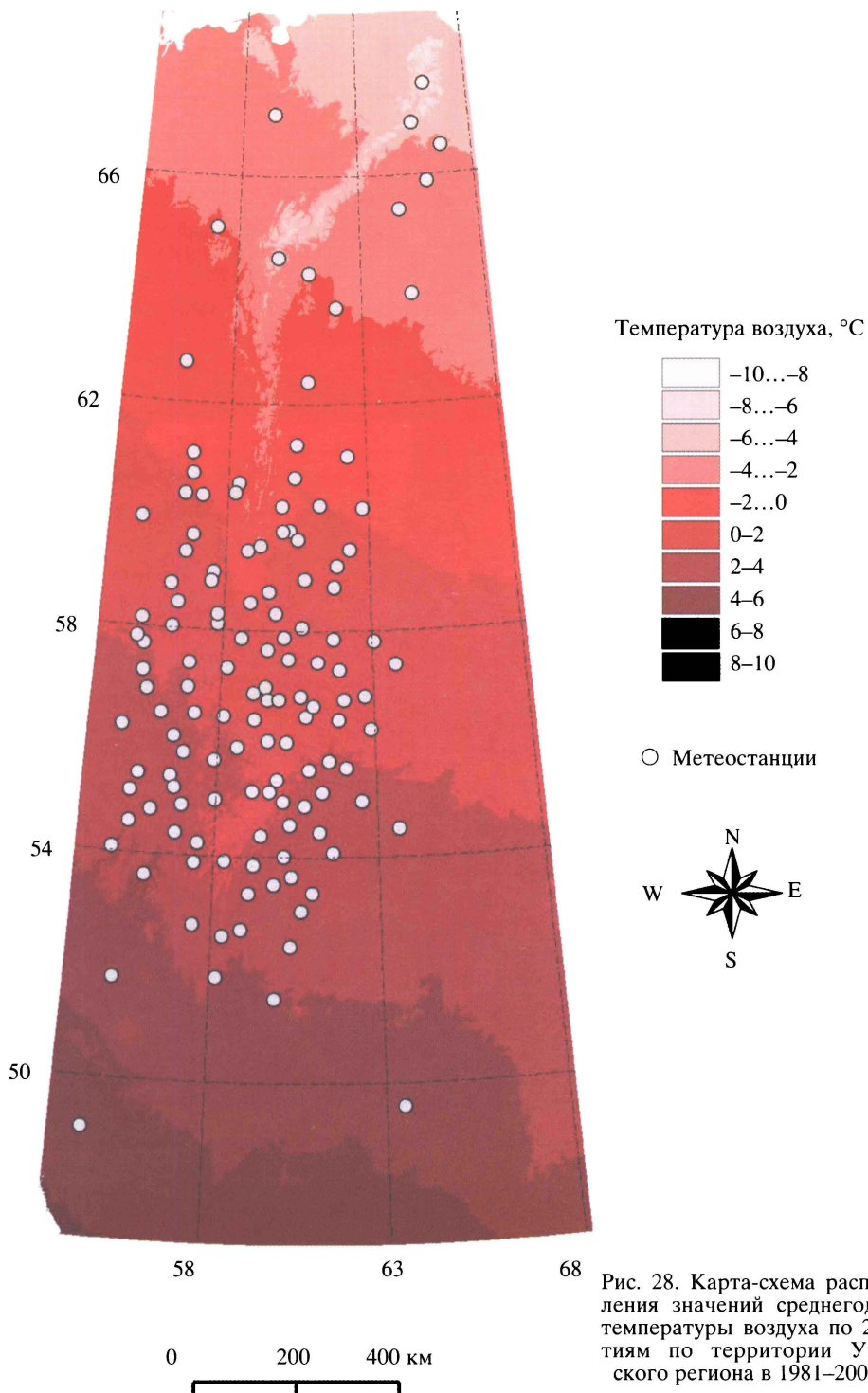


Рис. 27. Карта-схема распределения значений среднегодовой температуры воздуха по 20-летиям по территории Уральского региона в 1961–1980 гг.



68 Рис. 28. Карта-схема распределения значений среднегодовой температуры воздуха по 20-летиям по территории Уральского региона в 1981–2000 гг.

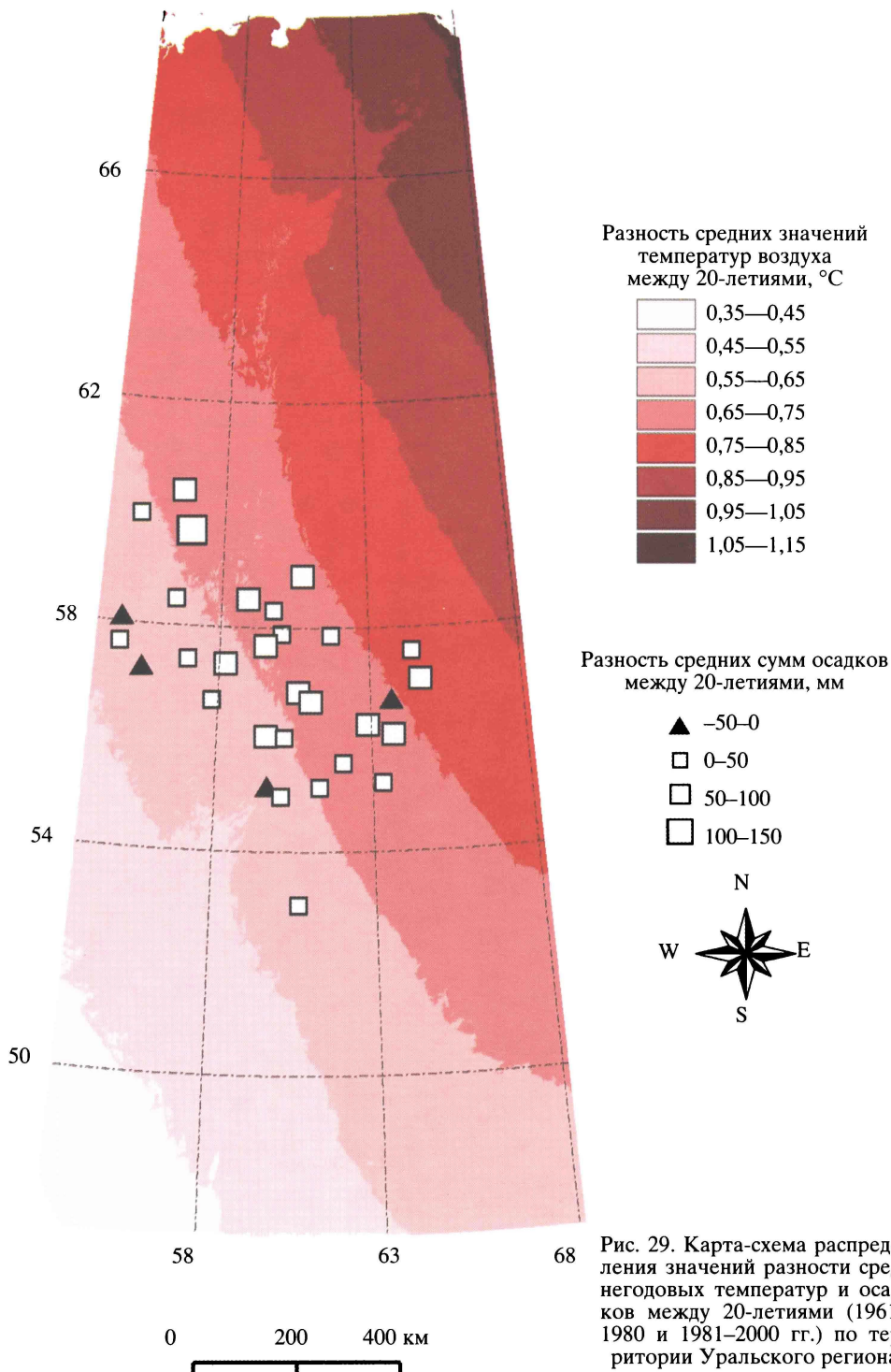


Рис. 29. Карта-схема распределения значений разности среднегодовых температур и осадков между 20-летиями (1961–1980 и 1981–2000 гг.) по территории Уральского региона

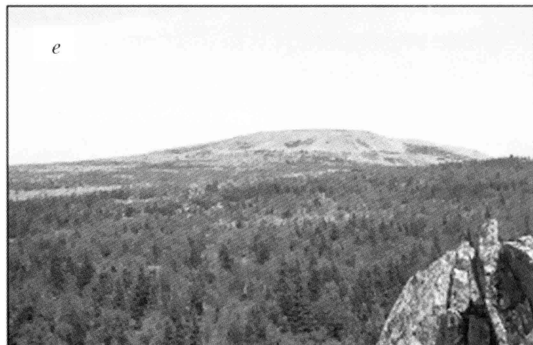
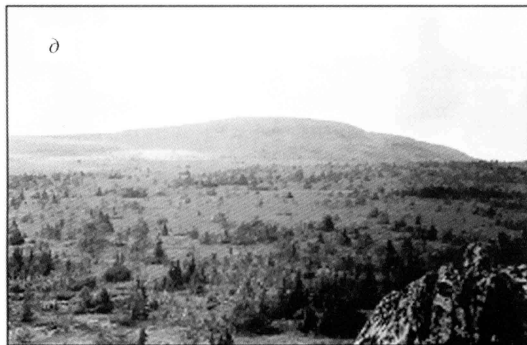
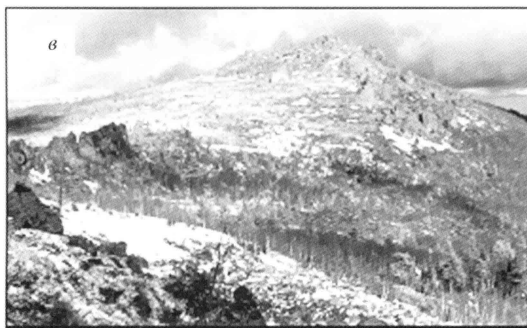
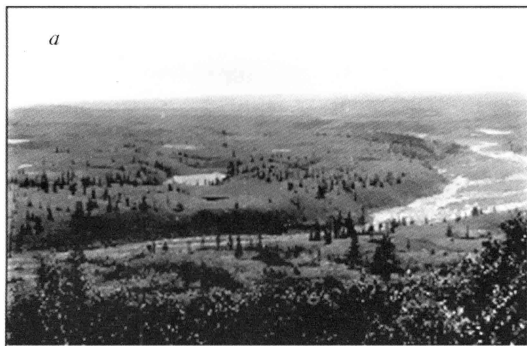


Рис. 30. Ландшафтные фотографии массива Рай-Из (Полярный Урал) в 1965 (а) и 2005 (б) гг. – сделаны С.Г. Шиятовым; г. Конжаковский Камень (Северный Урал) – сделаны в 1956 г. С.Г. Шиятовым (в) и в 2006 г. П.А. Моисеевым (z); г. Малый Ирмель (Южный Урал) – сделаны в 1973 г. С.Г. Шиятовым (д) и в 2006 г. В.В. Фоминым (е)

границы леса на горных массивах Полярного (массив Рай-Из), Северного (Тылайско-Конжаковско-Серебрянский массив) и Южного (массив Ирмель) Урала в начале и конце второй половины XX в. На фотографиях видно смещение границы леса вверх по склонам, увеличение густоты и сомкнутости древостоев.

Представленные в данном разделе результаты анализа изменения климата на Урале во второй половине XX в. подтверждают гипотезу о климатогенной природе процесса подъема растительности в горы. Анализ пространственно-временной динамики климата Урала, включающий рассмотрение особенностей рельефа, в дальнейшем позволит дать более точные оценки взаимосвязи (и взаимовлияния) изменения климата и реакции растительности.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.

6.1. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ

Анализ распределения различных типов лесотундровых сообществ (отдельные деревья в тундре, редины, редколесья и сомкнутые леса) на Полярно-уральском экологическом мониторинговом полигоне позволил установить значительное увеличение площади редколесий и сомкнутых лесов за счет облесения тундр, а также густоты и продуктивности ранее существовавших древостоев (Шиятов и др., 2005, 2007). На многих склонах зарегистрирован факт поднятия верхней границы распространения редин, редколесий и сомкнутых лесов. Однако надежные количественные данные о величине и скорости смещения этих границ отсутствуют.

Одна из целей исследований в данном районе – количественная оценка вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы распространения чистых лиственничных (из *Larix sibirica* Ledeb.) редколесий и сомкнутых лесов, которые произошли с 1960 по 2000 г., т. е. в период, который характеризовался благоприятными климатическими условиями для произрастания древесной растительности.

Сдвиг верхних границ редин и отдельных деревьев в тундре не рассматривается в связи с трудностью определения их границ на местности. В анализ была включена закартированная территория экотона верхней границы древесной растительности (ЭВГДР) площадью около 50 км², на которой преобладают сравнительно пологие склоны, а положение верхней границы древесной растительности в основном определяют климатические факторы (от восточного отрога массива Рай-Из на севере до ручья Орех-Юган на юге). У подножия гор Черной и Мал. Черной преобладает ветровой тип верхней границы леса, а на южном склоне массива Рай-Из – термический (Шиятов, 1970).

Под термином «экотон верхней границы древесной растительности» понимается переходный пояс растительности в горах между верхними границами распространения сомкнутых лесов и отдельных деревьев в тундре. В настоящее время высотный диапазон этого экотона в районе исследований на Полярном Урале колеблется от 140 до 560 м над ур. м. Лиственничные редколесья и сомкнутые леса произрастают у подножия и в нижней части склонов, их верхняя граница проходит в среднем на высоте 260 и 230 м соответственно. Отдельно растущие деревья в тундре на защищенных от ветров склонах поднимаются до высоты 500–560 м.

К сомкнутому лесу были отнесены сообщества, в которых среднее расстояние между деревьями составляет менее 7–10 м, а к редколесьям – от 7–10 до 20–30 м. Более подробные сведения о районе исследований и методике картографических работ приведены во второй главе, а также в ранее опубликованной работе (Шиятов и др., 2005).

На рис. 31 и 32 изображены карты-схемы сдвигов верхней границы редколесий и сомкнутых лесов, а в табл. 9 и 10 приведены статистические данные, характеризующие величину их вертикального и горизонтального сдвигов за последние 40 лет. На рисунках видно, что произошло повсеместное поднятие верхней границы как редколесий, так и сомкнутых лесов. На разных участках склонов эти сдвиги были неодинаковыми, так как часть из них менее благоприятна для произрастания древесной растительности. Наиболее часто отсутствие или незначительный сдвиг объясняются наличием крутых каменистых склонов или сильно ветрообдуваемых местообитаний. Анализ рис. 31, 32 и табл. 9 свидетельствует о том, что в районе исследований отсутствуют участки, на которых происходило снижение высотного положения этих границ за рассматриваемый промежуток времени.

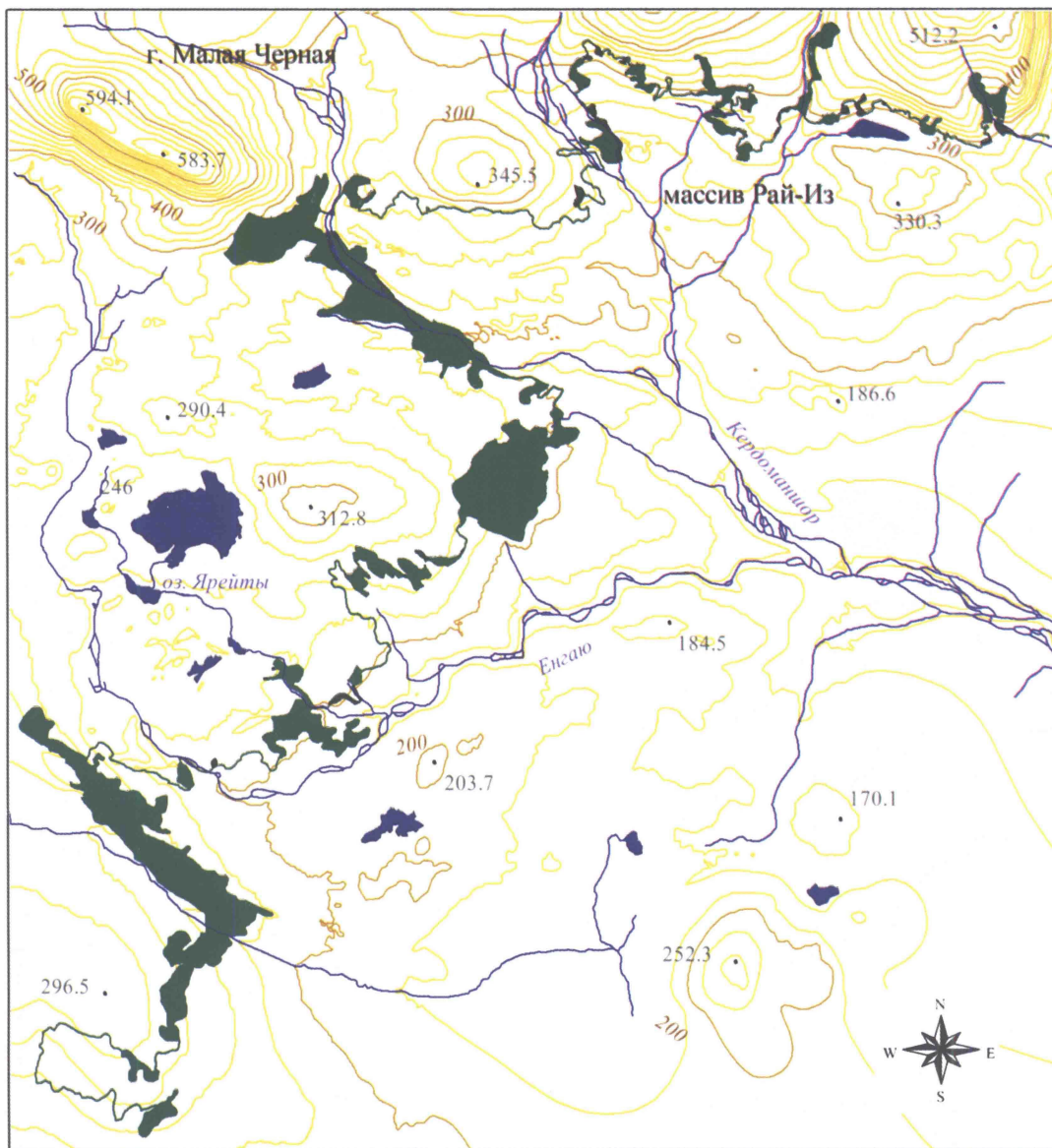
Для оценки величины и скорости сдвигов использованы значения медианы, так как она является более устойчивой статистикой по сравнению со средним значением. Вертикальный сдвиг составил для редколесий 18 м, для сомкнутых лесов – 14 м, а горизонтальный для редколесий – 175 м, для сомкнутых лесов – 180 м (см. табл. 9, 10). Таким образом, за исследуемый период скорость вертикального сдвига границ составила примерно 5 и 3 м за десятилетие, а горизонтального – примерно 44 и 45 м. Максимум вертикального смещения редколесий с 1960 по 2000 г. составил 67 м. Максимальная высота, на которой находились сомкнутые леса в 1960 г., не изменилась и в 2000 г. Горизонтальное смещение максимума для редколесий составило 890 м, сомкнутых лесов – 990 м. Наиболее существенные сдвиги границ произошли на южном склоне массива Рай-Из, по правому берегу р. Кердоманшор и правому берегу р. Енгаю.





Значительный сдвиг верхней границы редколесий и сомкнутых лесов произошел как на склонах, испытывающих в зимние месяцы воздействие сильных западных ветров (междуречье рек Кердоманшор и Енгаю), так и на территории, где основным лимитирующим фактором является термический режим летнего периода (южный склон массива Рай-Из). Это свидетельствует о том, что ветровые и температурные условия в течение последних 40 лет стали более благоприятными для произрастания древесной растительности. По-видимому, в результате более раннего начала вегетационного периода и большей его длительности молодые побеги лиственницы успевают полностью закончить цикл роста и развития и лучше подготовиться к суровым

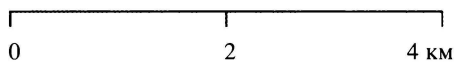
Таблица 9

Высота границы редколесий в 1960 и 2000 гг. и величины ее горизонтального и вертикального сдвигов в районе исследований на Полярном Урале (горный массив Рай-Из) за этот период

Характеристика распределения	Высота границы, м		Сдвиг, м	
	1960 г.	2000 г.	вертикальный	горизонтальный
Минимум	186	193	7	–
1-й квартиль	209	228	19	70
Медиана	240	258	18	175
3-й квартиль	266	284	18	320
Максимум	343	410	67	890
Среднее	243	263	20	225
Стандартное отклонение	36	45	–	191

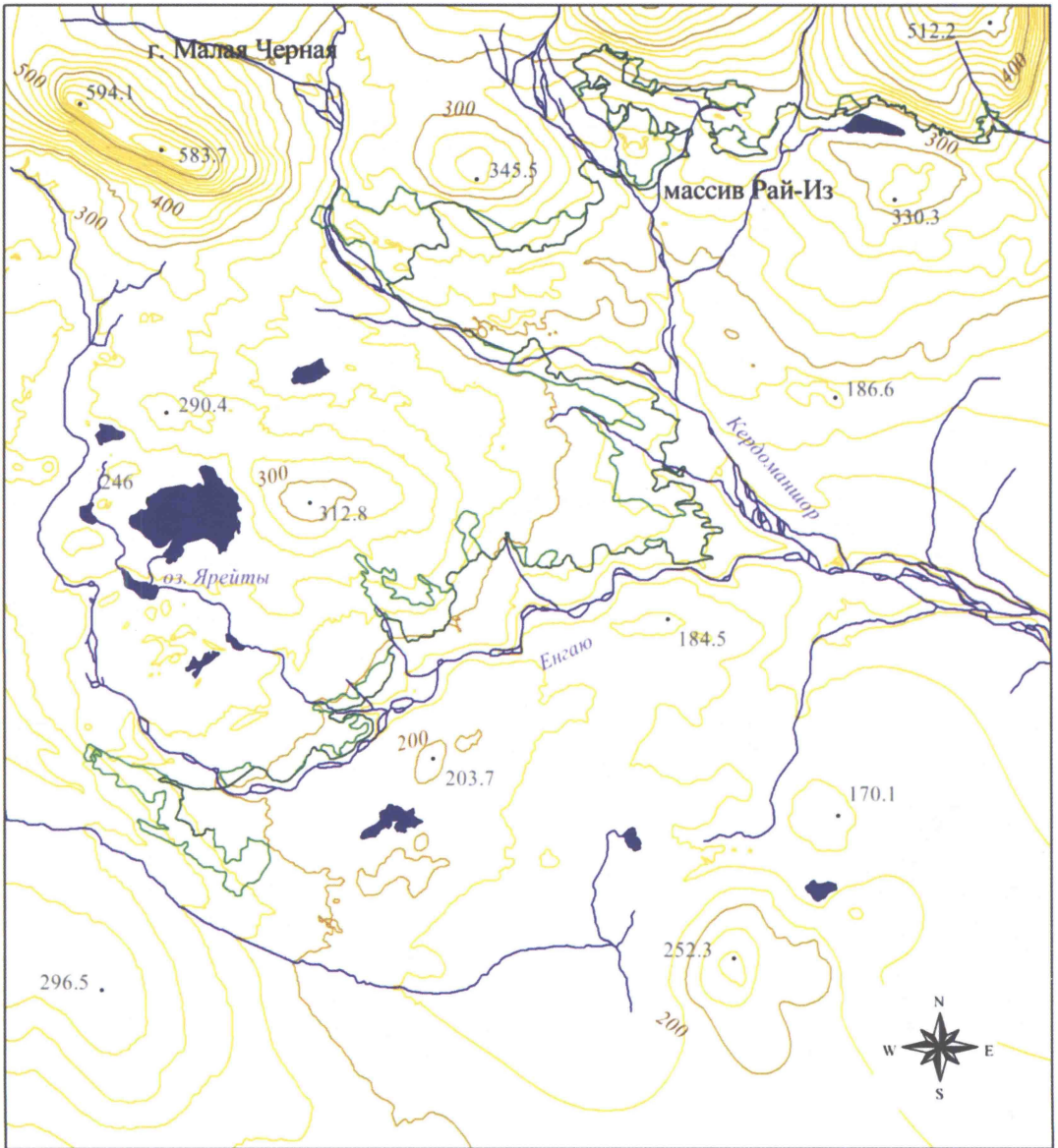






- Отметки высот
-  Реки
-  Область сдвига границы редколесий
-  Граница редколесий
-  Озера

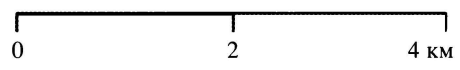


Изолинии проведены через 40 м

Рис. 31. Карта-схема сдвига границы редколесий на Полярном Урале (массив Рай-Из) с 1960 по 2000 г.



- Отметки высот
-  Реки
-  Область сдвига границы редколесий
-  Граница редколесий
-  Озера



Изолинии проведены через 40 м

Рис. 32. Карта-схема сдвига границы сомкнутых лесов на Полярном Урале (массив Рай-Из) с 1960 по 2000 г.

Таблица 10

Высота границы сомкнутого леса в 1960 и 2000 гг. и величины ее горизонтального и вертикального сдвигов в районе исследований на Полярном Урале (горный массив Рай-Из) за этот период

Характеристика распределения	Высота границы, м		Сдвиг, м	
	1960 г.	2000 г.	вертикальный	горизонтальный
Минимум	148	168	20	–
1-й квартиль	189	198	9	80
Медиана	217	231	14	180
3-й квартиль	250	253	3	350
Максимум	343	343	0	990
Среднее	219	233	14	244
Стандартное отклонение	41	39	–	210

зимним условиям. Если до начала современного потепления климата на сильно ветрообдуваемых и малоснежных местообитаниях произрастала исключительно лиственница стланиковой формы роста, то к настоящему времени стланики превратились в многоствольные деревья высотой до 5–6 м, а молодые деревья имеют в основном одноствольную форму роста.

Полученные данные о величине и скорости вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы редколесий и сомкнутых лесов на Полярном Урале подтверждают сделанный ранее вывод об интенсивной экспансии древесной растительности выше в горы в результате потепления и увлажнения климата, которые наблюдались в XX столетии (Шиятов и др, 2005). Об этом свидетельствуют и результаты анализа, описанные во второй главе.

Вертикальный градиент температуры воздуха в летние месяцы составляет примерно 0,3–0,5 °С. Отсюда следует, что климатическая граница, при которой возможно существование древесных растений, поднялась выше в горы примерно на 50 м, что в 3–4 раза превышает величину фактического вертикального сдвига верхней границы редколесий и сомкнутых лесов. Другими словами, в настоящее время древесная растительность еще не достигла климатически обусловленного предела из-за слабой обеспеченности семенами лиственницы тундровых участков, расположенных в верхней части ЭВГДР, хотя на отдельных участках склонов она и приблизилась к нему.

Таким образом, анализ вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы редколесий и сомкнутых лесов свидетельствует о происходившем в течение последних 40 лет на восточном макросклоне Полярного Урала повсеместном и интенсивном расселении древесной растительности выше в горы, которое может быть объяснено улучшением климатических условий.

6.2. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА СЕВЕРНОМ УРАЛЕ

На Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве (Северный Урал) проведены исследования изменений в составе, структуре и высотном положении редколесий (мелколесий) на верхнем пределе их произрастания,

которые произошли за период с 1956 по 2005 гг. Сравнительный анализ описаний древостоев в пределах верхней полосы редколесий шириной 50–100 м позволил установить увеличение доминирования березы извилистой в их составе. Если в 1956 г. в целом по массиву протяженность выделов с преобладанием березы составляла 38%, то в 2005 г. – 53%, т. е. увеличилась на 15%.

Наиболее интенсивная экспансия березы наблюдалась на Серебрянском Камне, где протяженность выделов с доминированием березы возросла на 27% (с 17 до 44%). На Конжаковском и Тылайском Камнях, где березовые древостои на верхней границе мелколесий были широко представлены в 1956 г. (53 и 46% соответственно), также произошло увеличение протяженности выделов с преобладанием березы на 10 и 6% соответственно.

Доминирование хвойных видов в составе древостоев на выделах, описанных в 1956 г., снизилось или осталось на том же уровне. Установлено сокращение доли ели сибирской и особенно лиственницы сибирской в целом по массиву на 5 и 10% соответственно, в то время как доминирование кедра осталось на прежнем уровне (15%). Наиболее значительное снижение доли лиственницы (на 24%) было установлено на Серебрянском Камне за счет появления березы или увеличения ее доли в составе лиственничных или березово-лиственничных древостоев. Протяженность выделов с доминированием ели снизилась как на Конжаковском (на 10%), так и на Тылайском Камнях (на 8%). Доля кедра увеличилась на Тылайском и Конжаковском Камнях на 2 %, в то время как на Серебрянском Камне она снизилась на 3%.

Одновременно с изменением состава древостоев произошло увеличение сомкнутости их крон в среднем на 11% (с 49 до 60%), при этом в наибольшей степени это характерно для выделов с доминированием кедра (на 26% – с 46 до 72%). За последние 50 лет практически не изменилась сомкнутость крон на выделах с доминированием ели. Средняя высота древостоев увеличилась на 0,6 м (с 4,8 до 5,4 м).

На рис. 33 показаны области сдвига редколесий за период с 1956 г. по 2005 г. На рис. 34 приведена карта-схема границы сомкнутого леса. При ее создании были использованы планы лесонасаждений Кытлымского лесничества Карпинского лесхоза 1955 и 1998 гг. лесоустройства масштабом 1: 50 000.

За рассматриваемый промежуток времени на большей части склонов произошел сдвиг границы редколесий выше в горы. Лишь на незначительных по протяженности крутых склонах, а также на сильно ветрообдуваемых перевалах такого сдвига не установлено. Этот результат оказался достаточно неожиданным, так как в верхней части массива преобладают крутые каменистые склоны.

Анализ распространения появившихся после 1956 г. редколесий показал, что они, как правило, приурочены к довольно многочисленным горным террасам, где происходит накопление мелкозема и формируются примитивные горно-тундровые почвы. Таким образом, современная верхняя граница мелколесий отличается от прежней тем, что между островками и массивами криволинейных редколесий встречается больше безлесных площадей, занятых каменистыми россыпями.

Результаты анализа данных, полученных в ходе полевых исследований, свидетельствуют об интенсивном расселении березы извилистой в горные тундры в течение исследуемого периода. Если в 1956 г. общая протяженность верхней границы редколесий с доминированием березы составляла

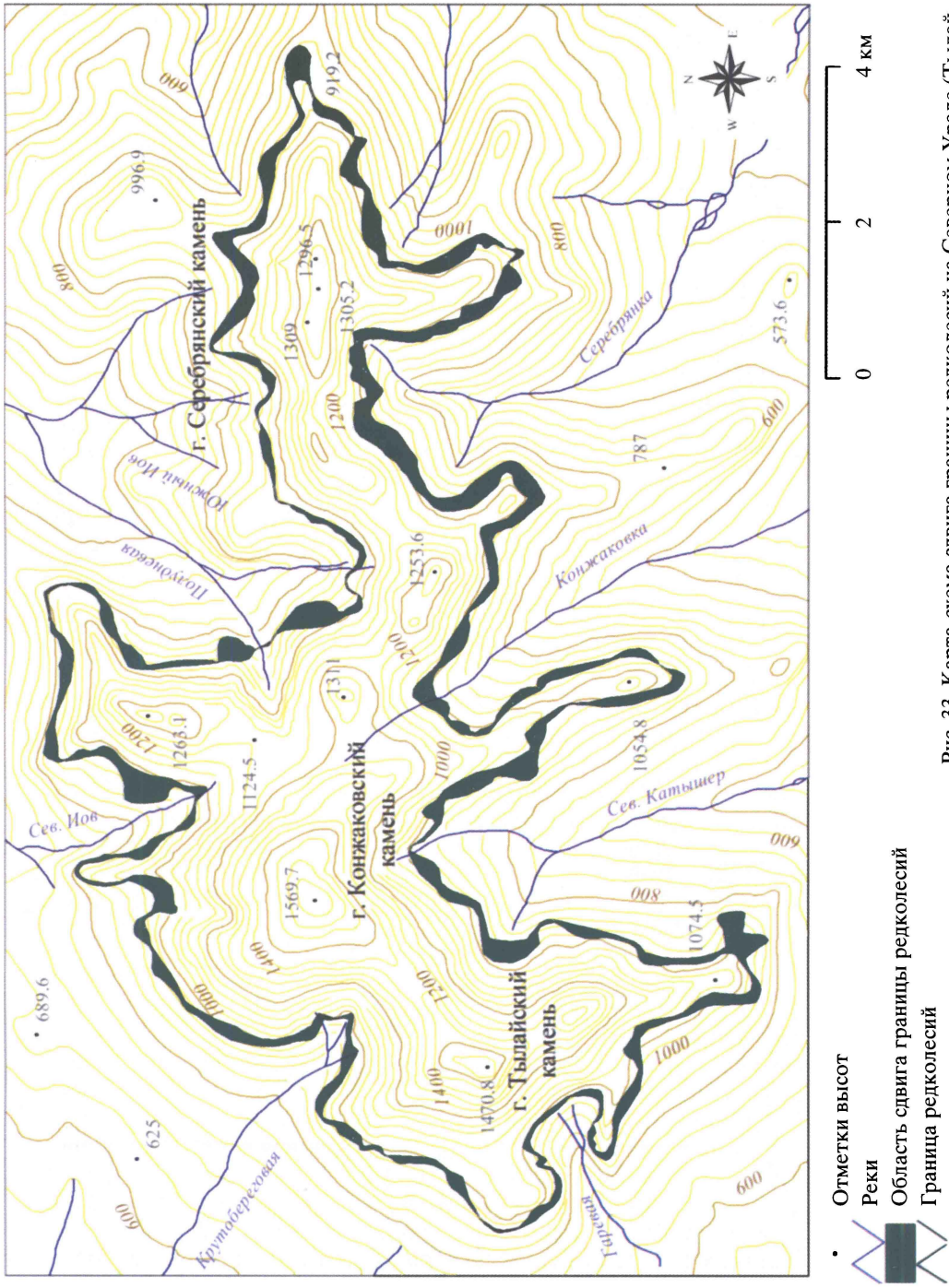
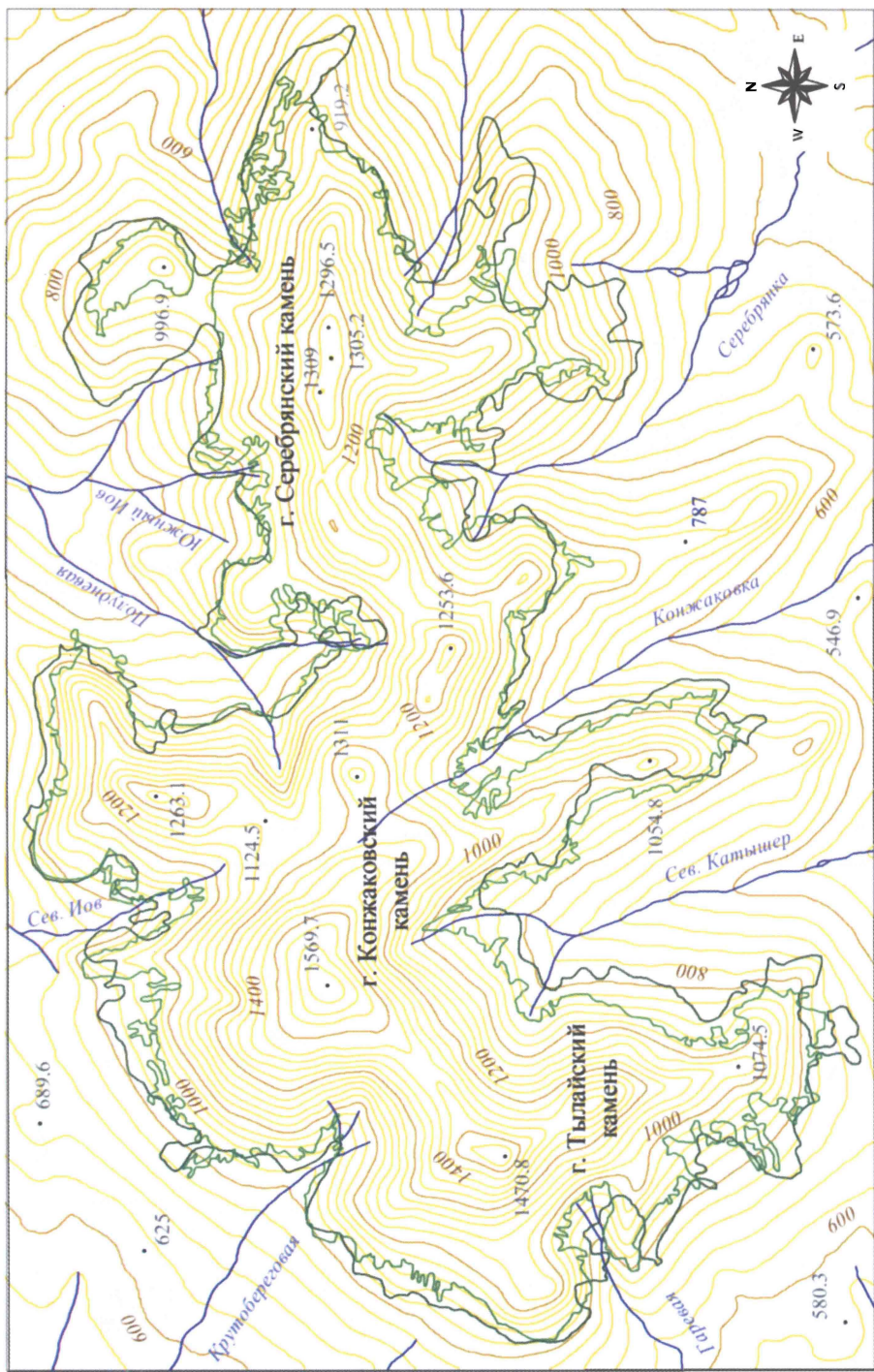


Рис. 33. Карта-схема свига границы редколесий на Северном Урале (Тылайско-Конжаковско-Сребрянский горный массив) за период с 1955–1956 по 2005 г.

- Отметки высот
- Реки
- Область свига границы редколесий
- Граница редколесий
- Изолинии проведены через 40 м



Отметки высот

Граница сомкнутого леса в 1998 г.

Граница сомкнутого леса в 1955 г.

Реки

Изолинии проведены через 40 м

Рис. 34. Карта-схема сдвига границы сомкнутых лесов на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве (Северный Урал) за период с 1955–1956 по 2005 г. При ее создании были использованы лесостроительные материалы 1955–1956 и 1998 гг.

38%, то в настоящее время – 54%. Наиболее активно береза расселялась на Серебрянском Камне. Если в 1956 г. в верхней полосе редколесий преобладали лиственничные древостои (57%), то в настоящее время протяженности выделов с доминированием лиственницы и березы сравнялись (43%). Увеличилась доля березы также в древостоях, образующих верхнюю границу редколесий на Тылайском и Конжаковском Камнях (на 12 и 9%).

В целом по массиву роль древостоев с доминированием ели на современной верхней границе редколесий снизилась на 11%, а на Тылайском и Конжаковском Камнях – на 19 и 15% соответственно. Доминирование кедра в целом по массиву увеличилось на 3%, при этом на Тылайском и Конжаковском Камнях протяженность верхней границы мелколесий с преобладанием кедра возросла на 7 и 13% соответственно, на Серебрянском Камне снизилась на 12%.

В табл. 11 и 12 приведены величины горизонтального и вертикального сдвигов верхней границы редколесий и сомкнутого леса на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве. Величина вертикального и горизонтального смещения верхней границы редколесий (по медиане) во второй половине XX в. в целом по массиву составила 43 и 120 м соответственно, а скорость вертикального и горизонтального продвижения – примерно 9 и 24 м за десятилетие. В наибольшей степени вверх по склонам продвинулись лесные сообщества с доминированием березы и лиственницы на Серебрянском Камне и с доминированием кедра – на Конжаковском Камне.

Максимальные смещения границы, наблюдаемые в верховье рек Сев. Иов (до 420 м), Полудневая (до 330 м) и Серебрянка (до 320 м), обусловлены малой крутизной отдельных участков склонов и наличием пологих выступов или террас. В таких местах процессы накопления мелкозема и образования примитивных горно-тундровых почв протекают с большей скоростью, чем на курумах. Кроме того, указанные участки достаточно хорошо защищены от действия преобладающих ветров, что также благоприятно отразилось на росте и развитии молодого поколения древесной растительности.

Вертикальный сдвиг по медиане составил для редколесий 43 м, для сомкнутых лесов – 50 м, а горизонтальный для редколесий – 120 м, для сомкнутых лесов – 285 м (см. табл. 6, 7). Таким образом, за исследуемый период скорость вертикального сдвига границ составила примерно 9 и 10 м, а горизонтального – примерно 25 и 58 м за десятилетие соответственно. Максимальное вертикальное смещение редколесий с 1956 по 2005 г. составило 38 м, для сомкнутых лесов – 51 м, максимальное горизонтальное смещение редколесий – 420 м, сомкнутых лесов – 990 м (см. табл. 11, 12).

При проведении полевых исследований было установлено, что на горном массиве не происходило снижения границы леса. Поэтому участки снижения границы, которые представлены на рис. 34, возникли в результате погрешностей при создании планов лесонасаждений. Особенно это касается плана 1955–1956 гг. Уровень технологии его создания значительно уступает современному. Тем не менее данные картографические источники можно использовать для анализа общих изменений положения границы леса.

Для оценки «чистого сдвига» из расчетов были исключены совпадающие значения положительного (вверх по склону) и отрицательного (вниз по

Таблица 11

Высота границы редколесий на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве (Северный Урал) в 1956 и 2005 гг. и величины ее горизонтального и вертикального сдвигов за этот период

Характеристика распределения	Высота границы, м		Сдвиг, м	
	1956 г.	2005 г.	вертикальный	горизонтальный
Минимум	759	785	26	–
1-й квартиль	901	943	42	60
Медиана	932	975	43	120
3-й квартиль	959	1003	44	150
Максимум	1051	1089	38	420
Среднее	927	969	42	118
Стандартное отклонение	49	53	–	65

Таблица 12

Высота границы сомкнутых лесов на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве (Северный Урал) в 1956 и 1998 гг. и величины ее горизонтального и вертикального сдвигов за этот период

Характеристика распределения	Высота границы, м		Сдвиг, м	
	1956 г.	1998 г.	вертикальный	горизонтальный
Минимум	561	627	66	–
1-й квартиль	750	813	63	180
Медиана	812	862	50	285
3-й квартиль	862	909	47	420
Максимум	1016	1067	51	990
Среднее	804	858	54	318
Стандартное отклонение	85	71	–	176

склону) сдвигов. В табл. 12 приведены данные «чистого сдвига». Разность значений медиан при оценке вертикального сдвига границы леса составляет величину 50 м. Значение чистого горизонтального сдвига по медиане составляет 285 м.

Представленные выше результаты свидетельствуют о том, что на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве во второй половине XX в. происходила интенсивная экспансия древесной растительности как в пределах подгольцового пояса, так и в нижней полосе пояса горных тундр. В результате этого значительно увеличились сомкнутость и высота ранее существовавших древостоев, а верхняя граница редколесий продвинулась выше в горы на большей части склонов. Улучшение условий для произрастания разных видов древесных растений в пределах всего массива и в различных условиях местообитания может быть объяснено лишь изменением климатических факторов.

На основе приведенных во второй главе климатических данных можно объяснить интенсивное расселение различных видов древесных растений, особенно березы извилистой. Известно, что береза на верхней и полярной

границах леса доминирует в приморских территориях, где выпадает много осадков. Увеличение количества летних и, особенно, зимних осадков в районе исследований, возможно, стало причиной наиболее интенсивного расселения и роста березы по сравнению с хвойными видами. Этому способствуют такие ее эколого-биологические свойства, как светолюбие, способность поселяться на крутых каменистых склонах, где между камнями скапливаются небольшие участки мелкозема, высокая семенная продуктивность и отсутствие проблем с распространением семян, способность произрастать на многоснежных местообитаниях с укороченным периодом вегетации.

На Серебрянском Камне сформировались наиболее благоприятные условия для расселения березы. Здесь под пологом редкостойных лиственничных древостоев появился второй густой ярус из березы, в результате снеговой покров на таких местообитаниях стал более мощным и прекратилось возобновление лиственницы.

Интенсивную экспансию березы извилистой в тундровые и луговые сообщества на многоснежных местообитаниях в 1970 г. наблюдал С.Г. Шиятов на Приполярном Урале в районе г. Неройки (неопубликованные данные). Изучением экспансии березы извилистой в горах Скандинавии много занимался Л. Кульман (Kullman, 1979, 2001–2003). Он привел многочисленные данные, свидетельствующие о разрастании ранее существовавших небольших куртин березы в крупные группы, а также о продвижении березовых криволесий в горные тундры. Таким образом, современные потепление и увлажнение климата способствуют расселению березы извилистой на верхнем пределе ее распространения.

Роль кедра сибирского в составе древостоев на прошлой и современной границе мелколесий за последние 50 лет изменилась незначительно. Это, скорее всего, связано с постоянным переносом его семян кедровкой в горные тундры. Кедр на малоснежных тундровых местообитаниях растет в виде сильно угнетенного стланика. Лишь через некоторое время в случае улучшения климатических условий или увеличения мощности снегового покрова у него формируются вертикальные стволы. В пределах подгольцового пояса кедр является одним из самых крупных деревьев высотой 15–17 м и диаметром 30–40 см.

Снижение доли ели сибирской в составе древостоев на современной верхней границе редколесий связано с экстремальными условиями для ее произрастания и слабым возобновлением. Дело в том, что на западном склоне Тылайского Камня она формирует климатически обусловленную границу редколесий, где еловые мелколесья и подрост имеют крайне угнетенный вид. В большинстве случаев продвижение и произрастание ели в наибольшей степени зависят от величины снегонакопления, что способствует ее защите от вымерзания в зимний период. Поэтому поднятие верхней границы мелколесий с преобладанием ели происходит крайне медленно, а на более крутых и каменистых склонах преобладает береза.

Лиственница сибирская, формирующая верхнюю границу мелколесий исключительно в восточной части массива, частично утратила свои прежние позиции в связи с интенсивным расселением березы. Однако на северных и южных склонах Серебрянского Камня она успешно возобновляется и продолжает преобладать на современной границе мелколесий наравне с

березой (43%). Достаточно хорошо она представлена в сухих, ветробойных и малоснежных местообитаниях, где конкуренция со стороны других видов слабая. Интересно, что в связи с улучшением температурных условий и увеличением мощности снегового покрова молодые лиственницы имеют в основном стволовую форму роста, в то время как старые лиственницы имеют угнетенный вид, а многие из них – полустланиковую и многоствольную формы роста.

Таким образом, приведенные выше материалы свидетельствуют об экспансии древесной растительности в высокогорьях Северного Урала, которая происходила в течение последних 50 лет в результате потепления и увлажнения климата. Это выразилось в смене доминирующих видов, увеличении сомкнутости крон и продуктивности древостоев, произрастающих в подгольцовом поясе, а также в существенном продвижении верхней границы мелколесий выше в горы. В ходе проведенных исследований выявлены различия в реакции различных видов деревьев на климатические изменения и показано, что наиболее активно расселялась береза извилистая.

6.3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

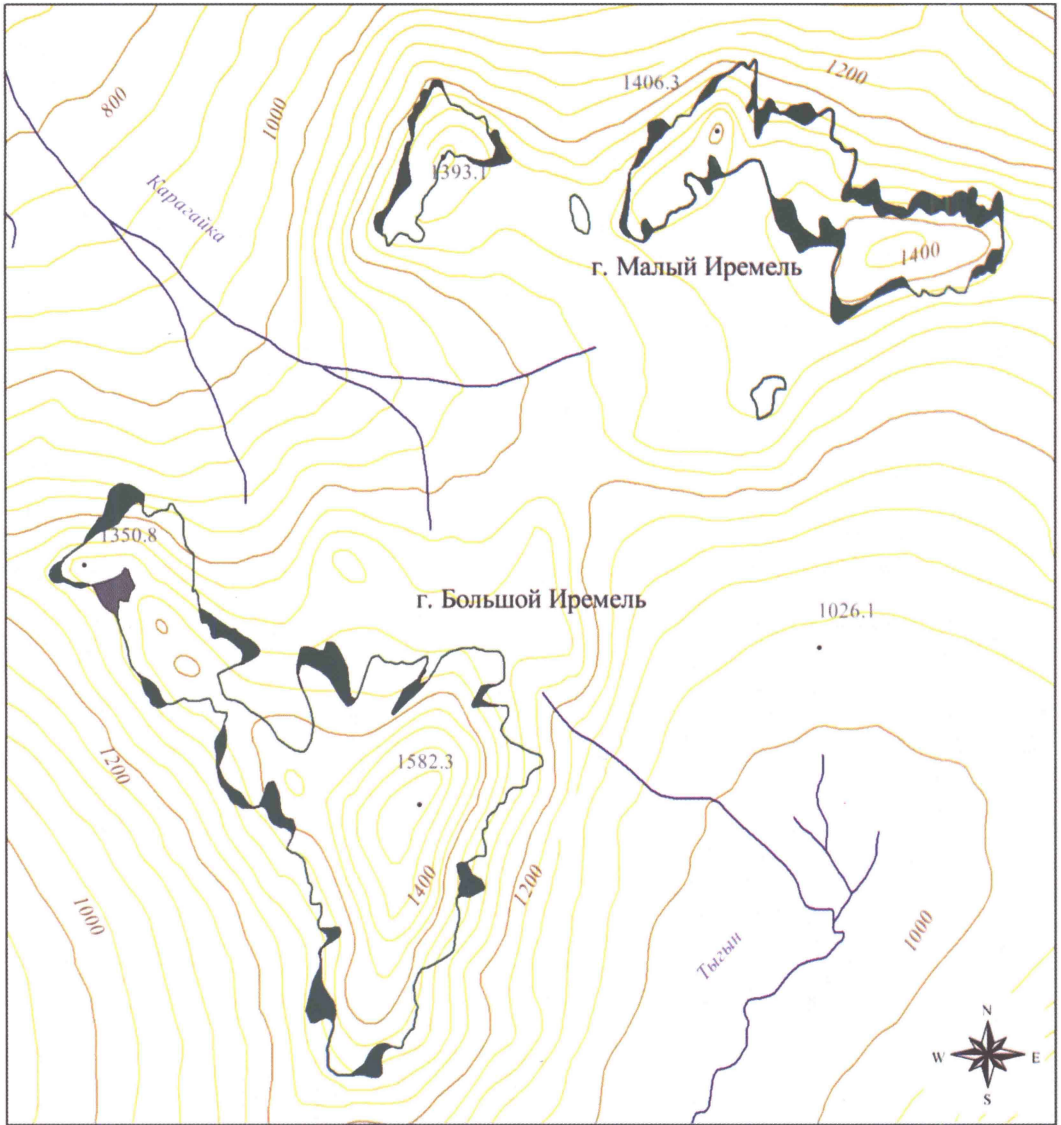
Проведенные в 2006 г. исследования состава, структуры и высотного распределения лесных сообществ, произрастающих на верхнем пределе своего распространения на горном массиве Ирмель, показали наличие в них существенных изменений по сравнению с данными С.Г. Шиятова за 1973 г.

За период с 1973 г. по 2006 г. верхняя граница редколесий сместилась выше в горы на большинстве склонов района исследований (рис. 35). При этом изменение высоты произрастания древесной растительности было отмечено не только на пологих, но и на крутых достаточно каменистых склонах.

Общая протяженность верхней границы леса сократилась на 755 м и составила примерно 31,9 км. Наряду с этим было отмечено уменьшение протяженности границы с преобладанием березы извилистой и увеличение участков с преобладанием ели сибирской на 5% в целом по массиву – с 12 до 7% и с 88 до 93% соответственно. При этом увеличение доли еловых древостоев лучше выражено на склонах Малого Ирмеля, что связано, по-видимому, с большей увлажненностью открытых ветрам западного и южного склонов данной вершины.

Аналогичные изменения видового состава древостоев были отмечены на границе 1973 г., о чем свидетельствуют повторная ландшафтная фотосъемка и актуализация материалов проведенных ранее исследований. Одновременно с изменением видового состава на данном рубеже произошло существенное увеличение сомкнутости крон деревьев – в среднем по массиву 16% (с 20 до 36%). Максимальное увеличение отмечено в березовых древостоях на склонах Большого Ирмеля – с 18 до 51% (33%). При этом сомкнутость еловой границы максимально увеличилась на Малом Ирмеле – с 22 до 40% (18%).

Установленные в ходе полевых исследований изменения обусловлены улучшением климатических условий, благоприятствующих появлению и



- Отметки высот
- Граница редколесий
- Области сдвига границы редколесий:
 - область подъема
 - область снижения
- Реки
- Изолинии проведены через 40 м

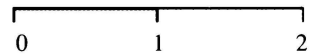


Рис. 35. Карта-схема сдвига границы редколесий на Южном Урале (горный массив Ирмель) за период с 1973 по 2006 г.

росту ели на верхнем пределе распространения древесной растительности. Данному процессу способствует наличие островков березовых мелколесий и елового стланика, предохраняющих молодое поколение ели от действия отрицательных температур и способствующих накоплению снежного покрова на ветрообдуваемых склонах горного массива. Это обеспечивает выживание ели на ранних этапах онтогенеза и выход ее в верхний ярус древостоев, на что указывает увеличение количества «чистых» ельников (с 49 до 64% в целом по массиву) на современном рубеже верхней границы редколесий.

Проведенные исследования показали, что зарастанию склонов и расселению древесной растительности на горном массиве Ирмель сопутствует наличие обширных участков с достаточно развитым почвенным субстратом. В целом по массиву протяженность участков с каменистыми россыпями на рубеже верхней границы 1973 и 2006 гг. составляет 37 и 40% соответственно. Это означает, что более половины всех участков, где на текущий момент произрастает древесная растительность, пригодны для дальнейшего ее расселения. Тем не менее на долю эдафически обусловленной границы в целом по массиву на момент исследований приходится примерно 67% ее протяженности, 15% занимает ветровой тип, 11% – термически-ветровой и 7% – остальные (курумно-ветровой, термический, снеговой).

На рис. 35 и 36 приведены карты-схемы, иллюстрирующие сдвиг границы редколесий и сомкнутого леса в районе исследований.

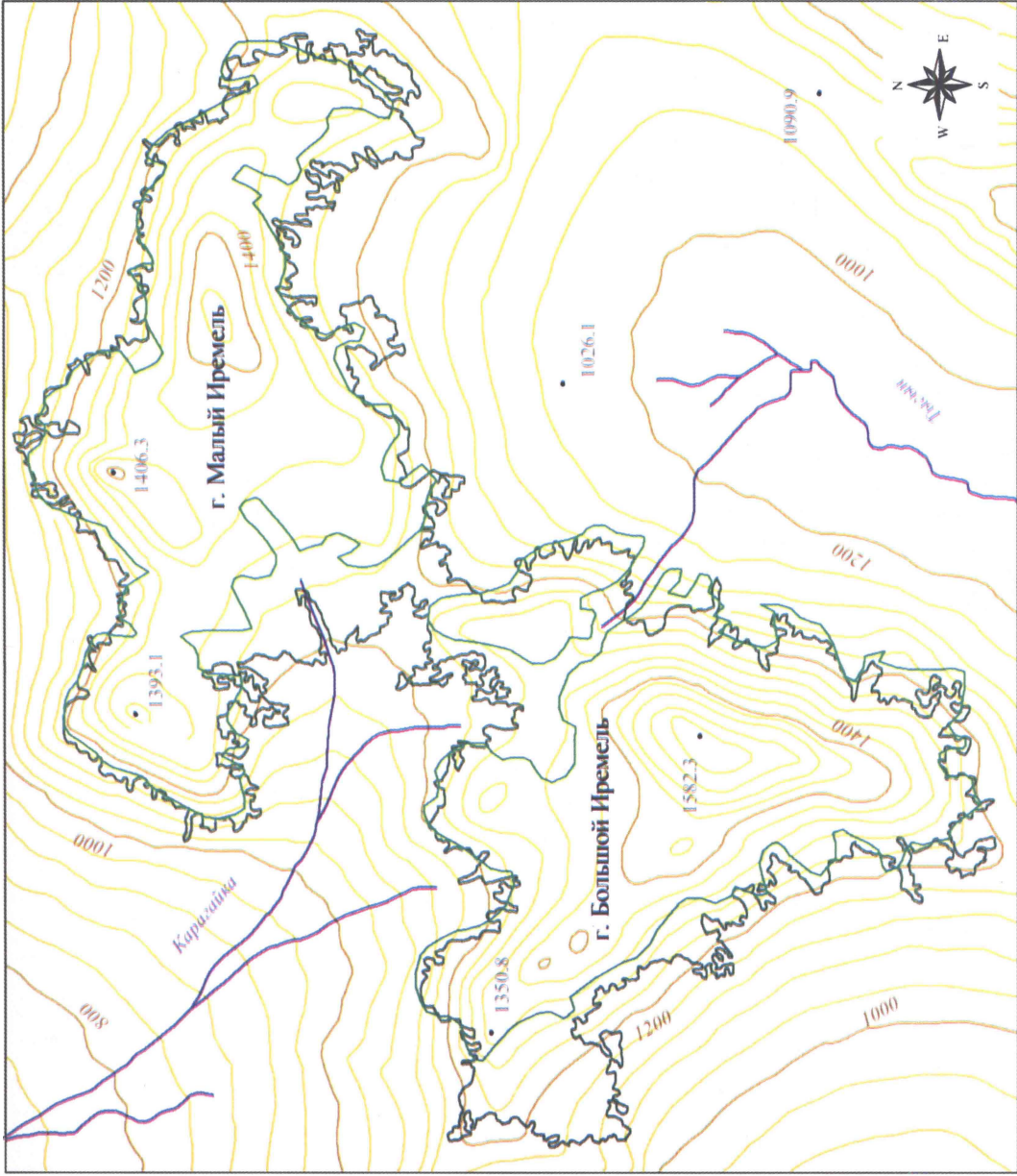
Величины вертикального и горизонтального сдвигов (по медиане) границы редколесий (табл. 13) составили 27 и 60 м соответственно. Это означает, что скорость смещения границы составляет 8 и 18 м за десятилетие в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Наибольшее смещение границы установлено на пологих склонах западной, северо-западной, северной и северо-восточной экспозиций. На крутых и каменистых склонах восточного, юго-восточного, южного и юго-западного направлений сдвиги были незначительны. Появление участка с обратным смещением (вниз по склону) границы (см. рис. 35) обусловлено полным уничтожением березово-лиственничного древостоя на данном участке лесным пожаром.

Анализ крупномасштабных топографических карт массива Ирмель (масштаб 1:50 000 и 1:100 000) за 1960 и 1990 гг. также показал наличие уча-

Таблица 13

Высота границы редколесий на горном массиве Ирмель (Южный Урал) в 1973 и 2006 гг. и величины ее вертикального и горизонтального сдвигов за этот период

Характеристика распределения	Высота границы, м		Сдвиг, м	
	1973 г.	2006 г.	вертикальный	горизонтальный
Минимум	1104	1145	41	–
1-й квартиль	1284	1304	20	30
Медиана	1319	1346	27	60
3-й квартиль	1350	1373	23	90
Максимум	1398	1427	29	300
Среднее	1310	1335	25	77
Стандартное отклонение	56	52	–	46



- Отметки высот
- Граница сомкнутого леса в 1990 г.
- Граница сомкнутого леса в 1960 г.
- Реки

Изолинии проведены через 40 м

Рис. 36. Карта-схема сдвига границы сомкнутых лесов на Южном Урале (горный массив Ирмель) за период с 1960 по 1990 г. При ее создании были использованы топографические карты масштаба 1:50 000 и 1:100 000 соответственно

Таблица 14

Высота границы редколесий на горном массиве Ирмель (Южный Урал) в 1973 и 2006 гг. и величины ее вертикального и горизонтального сдвигов за этот период

Характеристика распределения	Высота границы, м		Сдвиг, м	
	1960 г.	1990 г.	вертикальный	горизонтальный
Минимум	1013	1052	39	–
1-й квартиль	1180	1185	5	150
Медиана	1215	1240	25	270
3-й квартиль	1249	1284	35	420
Максимум	1313	1341	28	840
Среднее	1209	1228	19	295
Стандартное отклонение	52	68	–	170

стков смещения верхней границы леса (см. рис. 36). При проведении полевых исследований снижения границы леса на данных участках не обнаружено, а те участки, которые присутствуют на рис. 36, появились в результате погрешностей, возникших в процессе генерализации при создании топокарты 1990 г., а также, возможно, из-за искажений, которые возникли в процессе хранения бумажных карт.

Для оценки «чистого сдвига» из расчетов были исключены совпадающие значения положительного (вверх по склону) и отрицательного (вниз по склону) сдвигов. В табл. 14 приведены данные «чистого сдвига». Разность величин медиан при оценке вертикального сдвига составляет 25 м. Величина чистого горизонтального сдвига по медиане составляет 270 м. Величины вертикальных сдвигов редколесий и сомкнутых лесов примерно совпадают.

Таким образом, в результате проведенных исследований во второй половине XX в. в высокогорьях Южного Урала установлен факт вертикального подъема границы редколесий и сомкнутого леса на горном массиве Ирмель. Принимая во внимание потенциальную пригодность отдельных участков склона для произрастания древесной растительности в верхней части массива на границе лесных сообществ, можно утверждать, что вертикальное смещение границы сомкнутого леса и редколесий имеет климатогенную природу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение проблемы взаимодействия климата и аэропромышленных загрязнений, а также их отдельного и совместного действия на древесную растительность требует использования подхода, позволяющего решать взаимосвязанные многоаспектные задачи, относящиеся к разным научным дисциплинам.

Г. Бейтсоном предложена парадигма исследования сложных систем в виде последовательного описания дихотомий: форма–процесс, калибровка–обратная связь, низкий–высокий логический типы. При последовательном чередовании частей дихотомии в иерархической последовательности анализируемая сфера релевантных отношений расширяется, при этом изменяются временной и пространственный масштабы анализируемых явлений и процессов, происходящих в биологических системах. Использование данной парадигмы позволяет при описании феноменов выделять уровни структуры или порядки рекурсии сложных биологических систем и исследовать взаимоотношения между ними.

С использованием дихотомий форма–процесс и калибровка–обратная связь были предложены три иерархии уровней анализа для климатогенной и антропогенной пространственно-временной динамики древесной растительности, а также изменения климата и загрязнения атмосферы поллютантами соответственно.

Иерархия чередования формы и процесса для анализа антропогенной пространственно-временной динамики выглядит следующим образом: описание состояния дерева (уровень 1) → типология состояния (уровень 2) → взаимодействия, определяющие типологию или процессы, порождаемые формой различия (уровень 3) → типология процессов (уровень 4) → изучение взаимодействий между классифицированными процессами (уровень 5).

Иерархия уровней анализа с использованием формы и процесса для климатогенной пространственно-временной динамики имеет сходный вид: описание лесотундровой древесной растительности и условий ее местопроизрастания (уровень 1) → типология лесотундровой древесной растительности (уровень 2) → взаимодействия, определяющие типологию или процессы, порождаемые формой различия (уровень 3) → типология процессов (уровень 4) → изучение взаимодействий между классифицированными процессами (уровень 5).

Для выделения уровней анализа изменений климата и аэропромышленных загрязнений лучше подходит дихотомия калибровка–обратная связь. Полученная с ее использованием иерархия уровней имеет следующий вид: колебания значений климатического параметра/уровня загрязнений (уровень 1) → средний уровень значений климатического параметра/загрязнений (уровень 2) → характеристики мезоклимата (местного климата)/локальный (для района) уровень загрязнения атмосферы промышленными выбросами (уровень 3) → региональный уровень значений климатического

параметра/загрязнений (уровень 5) → характеристики макроклимата/глобальный уровень загрязнения атмосферы промышленными выбросами (уровень 5).

Предложенные иерархии позволяют сопоставить феномены, относящиеся к разным рассматриваемым явлениям, но находящиеся на одних иерархических уровнях форма–процесс или калибровка–обратная связь.

Самые нижние уровни иерархий соответствуют описанию состояния древесной растительности в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами, описанию лесотундровой древесной растительности и условий местопроизрастания, а также колебаниям значений уровня загрязнений и климатических параметров на конкретных участках.

Для получения объективных количественных данных об анализируемых объектах на определенных уровнях анализа был разработан комплекс количественных методов, включающий:

- экспресс-метод автоматизированной оценки состояния деревьев по цифровым фотографиям их крон, позволяющий повысить объективность и точность визуальной оценки степени угнетения деревьев в условиях негативного действия одного или нескольких экологических факторов;
- методологические основы оценки показателей точности методик выполнения измерений, основанных на автоматизированном анализе изображений, и метод оценки показателей точности, который является универсальным и может быть использован при исследовании методик выполнения измерений по изображениям объектов, полученным на макро- и микроуровнях;
- метод комплексной морфофизиологической оценки состояния отдельных деревьев и древостоев;
- метод экологического зонирования территории с использованием данных морфофизиологической оценки состояния и мультивариантных статистических и геостатистических моделей, адекватно описывающих пространственные закономерности изменения состояния деревьев и древостоев в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами и позволяющих проводить статистически обоснованное экологическое зонирование территории;
- универсальный метод оценки величины вертикального и горизонтального сдвигов растительных рубежей с использованием растрового моделирования в геоинформационной системе;
- метод создания климатических карт распределения значений температуры воздуха, позволяющий детализировать климатические карты конкретного региона с учетом рельефа местности.

В ходе проведенных исследований антропогенной и климатогенной пространственно-временной динамики древесной растительности, а также взаимодействия климата и аэропромышленных загрязнений с использованием перечисленных выше количественных методов были получены следующие результаты:

- Исследованы особенности реакции фотосинтетического аппарата (ФСА) хвои сосны на действие аэропромышленных загрязнений и затенения для выявления наиболее информативных характеристик состояния ФСА и оптимальных условий их измерения. Установлена неспецифичность некоторых реакций фотосинтетического аппарата на действие данных фак-

торов. Снижение эффективности преобразования световой энергии, вызванное действием загрязнений и затенения, обусловлено общим механизмом энергообмена в хлоропластах.

- Исследовано взаимное влияние мезоклимата и аэропромышленных выбросов медеплавильного производства. Установлено снижение амплитуды суточных колебаний температуры воздуха в зоне с высоким уровнем загрязнения, а выпадение осадков в данной зоне сопровождается увеличением концентрации взвешенных веществ в приземном слое воздуха.

- Под воздействием аэропромышленных загрязнений медеплавильного производства происходит нарушение динамики радиальных приростов деревьев сосны обыкновенной. При этом наибольшие отклонения хода индексов приростов деревьев, произрастающих в импактной зоне, по сравнению с контрольными деревьями, приходится на 70-е – начало 80-х годов XX в. – самый холодный период второй половины XX в. В этот же период на Среднем Урале наблюдалось сокращение количества осадков. Известно, что в экстремальных почвенно-климатических условиях растения очень чутко реагируют даже на незначительное изменение климата. Данный факт позволяет предполагать, что древесные растения, произрастающие в экстремальных условиях загрязнения атмосферы выбросами медеплавильного производства, становятся более чувствительными к изменению климатических условий.

- Пространственный анализ данных экологического зонирования территории по комплексу морфометрических характеристик состояния с использованием мультивариантных статистических и геостатистических моделей позволил установить закономерности изменения состояния деревьев и древостоев в пространстве в соответствии с крупными формами рельефа и местоположением основного источника эмиссии поллютантов.

- Установлены тренды увеличения среднегодовой температуры и годовой суммы осадков, а также тенденции увеличения значений аномалий средних годовых температур и суммарных годовых осадков высокогорных и равнинных областей Уральского региона в XX в. Анализ картографических моделей средней годовой температуры воздуха по двадцатилетиям для Уральского региона (1961–1980 гг. и 1981–2000 гг.) позволил установить, что в горных районах разность температур между последним и предпоследним двадцатилетиями XX в. была несколько ниже, чем на низкогорных и равнинных участках. Установлен северо-восточный градиент возрастания температур воздуха.

- Исследована пространственно-временная динамика верхней границы редколесий и сомкнутых лесов на горных массивах Полярного, Северного и Южного Урала во второй половине XX в. В данных районах произошел подъем верхней границы редколесий и сомкнутых лесов. Скорость вертикального и горизонтального сдвигов границ для описанных выше массивов во второй половине XX в. лежит в диапазоне 3–18 и 18–82 м за десятилетие соответственно. При этом древесная растительность на данных территориях, как правило, не достигла своих климатически обусловленных границ. Вертикальный сдвиг растительных рубежей происходил в условиях потепления и увлажнения климата Уральского региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
- Алексеев, А.С. Прогноз состояния древостоев, подверженных токсическому действию атмосферных загрязнителей / А.С. Алексеев, Н.И. Лайранд, Б.Г. Поповичев, А.А. Яценко-Хмелевский // Бот. журн. – 1986. – № 1. – С. 1567–1571.
- Алексеев, А.С. Колебание радиального прироста в древостоях при атмосферном загрязнении / А.С. Алексеев // Лесоведение. – 1990. – № 2. – С. 83–86.
- Алексеев, А.С. Закономерности пространственного размещения поврежденной растительности при региональном и локальном загрязнении атмосферы (на примере импактной зоны ГМК «Печенганикель») / А.С. Алексеев, Р.Р. Жеребцов // Экология. – 1995. – № 6. – С. 428–435.
- Алексеев, А.С. Радиальный прирост деревьев и древостоев в условиях атмосферного загрязнения / А.С. Алексеев // Лесоведение. – 1993. – № 4. – С. 66–70.
- Алисов, Б.П. Климатология / Б.П. Алисов, Б.В. Полтараус. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – С. 159–219.
- Алисов, Б.П. Климат СССР / Б.П. Алисов. – М.: Изд-во МГУ, 1956. – 128 с.
- Андреев, В.Н. Оленьи пастбища и растительный покров Полярного Приуралья / В.Н. Андреев, К.В. Игошина, А.И. Лесков // Сов. оленеводство. – 1935. – Вып. 5. – С. 171–406.
- Андреева, Е.Н. Влияние атмосферного загрязнения на моховой покров северотаежных лесов / Е.Н. Андреева // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л.: Наука, 1990. – С. 159–172.
- Аникеев, Д.М. Изменение морфоструктур репродуктивной системы сосны в условиях промышленного загрязнения на Среднем Урале: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – Екатеринбург, 1996. – С. 19–21.
- Анисимов, О.А. Применение геоинформационной системы для прогноза агроклиматических характеристик / О.А. Анисимов, М.А. Белолуцкая // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 9. – С. 89–98.
- Аринушкина, Е.В. Руководство по химическому анализу почв / Е.В. Аринушкина. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 492 с.
- Арманд, А.Д. Математическая модель воздействия загрязнений на лесной биогеоценоз / А.Д. Арманд, М.А. Ведюшкин, В.Ф. Крапивин [и др.] // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду: тез. докл. – Пушкино, 1984. – С. 13–14.
- Бабаков, Г. Конжак просит помощи / Г. Бабаков // Урал. следопыт. – 1966. – № 8. – С. 32–35.
- Бабушкина, Л.Г. Оценка состояния лесных экосистем в зонах промышленного загрязнения биоиндикационными методами / Л.Г. Бабушкина, Н.М. Шебалова, Т.Ф. Коковкина [и др.] // Стратегические направления экологических исследований на Урале и экологическая политика: тез. докл. – Екатеринбург, 1996. – С. 3.
- Баженов, А.В. Оценка степени поражения фотосинтеза сосны обыкновенной аэротехногенными выбросами / А.В. Баженов, Ю.А. Шевнин // Экология. – 1994. – № 4. – С. 89–91.
- Барабин, А.И. Влияние атмосферных выбросов Котласского ЦБК на соотношение сосны / А.И. Барабин // Лесн. журн. – 1995. – № 4. – С. 162–166.
- Барахтенова, А.А. Диагностика устойчивости сосновых лесов при техногенном загрязнении. Ч. II: Физиологический тест / А.А. Барахтенова // Сиб. биол. журн. – 1991. – № 6. – С. 46–55.
- Барахтенова, Л.А. Диагностика устойчивости сосновых лесов при техногенном загрязнении. Ч. I: Лесоводственный тест / Л.А. Барахтенова, Г.П. Кузьмина // Сиб. биол. журн. – 1991. – № 6. – С. 38–45.
- Барахтенова, Л.А. Влияние сернистого газа на фотосинтез растений / А.А. Барахтенова, В.С. Николаевский. – Новосибирск: Наука, 1988. – 84 с.
- Барткавичус, Э.Л. Изменение радиального прироста сосновых древостоев в условиях локального загрязнения окружающей среды / Э.Л. Барткавичус // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду: тез. докл. – Пушкино, 1984. – С. 19–21.

- Барткявичус, Э.Л. Воздействие антропогенных факторов на лесные экосистемы / Э.Л. Барткявичус // Мониторинг лесных экосистем: тез. докл. – Каунас, 1986. – С. 214–215.
- Барышева, В.Н. Реакция пигментной системы хвойных на действие токсических газов при фумигации атмосферы / В.Н. Барышева // Экология леса и охрана природы. – М.: ВНИИЛМ, 1993. – С. 69–77.
- Бейтсон, Г. Разум и природа: неизбежное единство / Г. Бейтсон. – М.: КомКнига, 2007. – 248 с.
- Бери, Д.А. Зависимость фотосинтеза от факторов окружающей среды / Д.А. Бери, У.Д.С. Даунтон // Фотосинтез. Т. 2; под ред. Говинджи. М.: Мир, 1987. – С. 273–364. (Photosynthesis. Vol. 1, 2. Ed. Govindjee. N.Y.: Acad. Press, 1982).
- Богданова, Д.А. Стволовые вредители в зоне промышленного загрязнения / Д.А. Богданова // Экология. – 1987. – № 1. – С. 87–90.
- Болтнева, Л.И. Воздействие пылегазовых выбросов промышленных предприятий на сосновые северотаежные леса / Л.И. Болтнева, А.А. Игнатъев, Р.Т. Карабань [и др.] // Экология. – 1982. – № 4. – С. 36–43.
- Большая советская энциклопедия; ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энцикл., 1972. – С. 430.
- Борзенкова, И.И. О природных индикаторах современного глобального потепления / И.И. Борзенкова // Метеорол. и гидрол. – 1999. – № 6. – С. 98–110.
- Борисенков, Е.П. Климат и деятельность человека / Е.П. Борисенков. – М.: Наука, 1982. – 134 с.
- Боронин, Ю.Б. Фитотоксическое действие сернистого ангидрида и аэрозоля серной кислоты на древесные породы / Ю.Б. Боронин, В.П. Ворон, В.В. Мальшев // Экология леса и охрана природы. – М.: ВНИИЛМ, 1993. – С. 63–68.
- Будыко, М.И. Климат в прошлом и будущем / М.И. Будыко. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 352 с.
- Будыко, М.И. Эмпирические оценки изменения климата к концу XX столетия / М.И. Будыко, Н.А. Ефимова, Л.А. Строкина // Метеорол. и гидрол. – 1999. – № 12. – С. 5–12.
- Бухов, Н.Г. Старение листа. Выявление участков, лимитирующих фотосинтез с помощью коэффициентов тушения флуоресценции хлорофилла и редокс-изменений P700 в листьях / Н.Г. Бухов // Физиология растений. – 1997. – Т. 44. – С. 352–360.
- Бязров, Л.Г. Некоторые аспекты лишеноиндикации загрязнения среды / Л.Г. Бязров // Биоиндикация и биомониторинг. – М.: Наука, 1991. – С. 54–57.
- Ваганов, Е.А. Дендроклиматические и дендроэкологические исследования в северной Евразии / Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов // Лесоведение. – 2005. – № 4. – С. 18–27.
- Ваганов, Е.А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа. – Новосибирск: Наука, 1996. – С. 9–15.
- Ваганов, Е.А. Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария за последние 1,5 тыс. лет: сравнительный анализ данных годовичных колец деревьев и ледовых кернов / Е.А. Ваганов [и др.] // Докл. РАН. – 1998. – Т. 358. – № 5. – С. 681–684.
- Вайчис, М.В. Контроль за повреждениями лесных биогеоценозов токсическими эмиссиями / М.В. Вайчис, К.Э. Армолайтис, В.М. Онюнас [и др.] // Лесоведение. – 1988. – № 4. – С. 3–10.
- Васфилов, С.П. Использование рН гомогената хвои для оценки воздействия диоксида серы на сосну / С.П. Васфилов // Экология. – 1995. – № 5. – С. 347–350.
- Величко, А.А. К оценке изменений растительного и почвенного покровов Восточно-Европейской равнины в XXI веке вследствие антропогенного изменения климата / А.А. Величко, О.К. Борисова, Э.М. Зеликсон [и др.] // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – Т. XVIII. – С. 208–219.
- Веселов, И.Н. Опыт использования методов цифровой микроскопии при проведении металлографических исследований / И.Н. Веселов, С.В. Пышминцев, И.Ю. Беликов // Вестник УГТУ-УПИ. – 2005. – № 10. – С. 41.
- Виллетт, Х.К. Характер связи солнечных и климатических явлений / Х.К. Виллетт // Солнечная активность и изменение климата. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – С. 23–43.
- Власенко, В.Э. Состояние и устойчивость хвойных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения на Среднем Урале / В.Э. Власенко, С.Л. Менщиков, А.К. Махнев // Экология. – 1995. – № 3. – С. 193–196.
- Влияние изменений климата на экосистемы бассейна реки Амур. – М.: WWF России, 2006. – 128 с.

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

Воробейчик, Е.Л. Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение: зависимость доза–эффект / Е.Л. Воробейчик, Е.В. Хантемирова // Экология. – 1994. – № 3. – С. 31–43.

Второва, В.Н. О влиянии промышленных выбросов на лесные экосистемы / В.Н. Второва, Н.И. Пьявченко // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду: тез. докл. – Пушкино, 1984. – С. 37–38.

Второва, В.Н. Влияние промышленных выбросов на растительный покров северных лесных экосистем / В.Н. Второва, Н.И. Пьявченко // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. – М.: Наука, 1987. – С. 143–147.

Выгодская, Н.Н. Использование космической информации для оценки загрязнения атмосферы / Н.Н. Выгодская, В.В. Новиков, Е.Е. Егорова, И.М. Мануковская // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду: тез. докл. – Пушкино, 1984. – С. 38.

Галазий, Г.И. Вертикальный предел древесной растительности в горах Восточной Сибири и его динамика / Г.И. Галазий // Тр. Бот. ин-та им. В.Л. Комарова АН СССР. – Сер. III (геоботаника). – 1954. – Вып. 9.

Гедеонов, А.Д. Изменения температуры воздуха на Северном полушарии за 90 лет / А.Д. Гедеонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 147 с.

Говорухин, В.С. Растительность бассейна р. Ыльча (Северный Урал) / В.С. Говорухин // Тр. О-ва изуч. Урала, Сибири и Дальнего Востока. – М.: Главнаука, 1929. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 1–106.

Говорухин, В.С. Динамика ландшафтов и климатические колебания на Крайнем Севере / В.С. Говорухин // Изв. ВГО. – Т. 79. – № 8. – С. 317–324.

Гоголина, Т.В. Влияние серных выбросов Череповецкой ГРЭС на ход роста молодых сосны / Т.В. Гоголина, А.Г. Мошкалева // Лесн. журн. – 1993. – № 1. – С. 118–119.

Голованова, И.В. Тепловое поле Южного Урала / И.В. Голованова. – М.: Наука, 2005. – 189 с.

Гончарова, Н.И. Динамика свойств почвенного покрова в экотоне луг–лес при рекреационной нагрузке и восстановлении / В.П. Самсонова, А.К. Белоухов // Экология. – 1986. – № 5. – С. 75–79.

Горчаковский, П.Л. Лесная растительность подгольцового пояса Урала / П.Л. Горчаковский // Сб. тр. по лесн. хоз-ву. – Свердловск, 1954. – Вып. 2. – С. 15–65.

Горчаковский, П.Л. Растительный мир высокогорного Урала / П.Л. Горчаковский. – М.: Наука, 1975. – 283 с.

Горчаковский, П.Л. Флора и растительность высокогорий Урала / П.Л. Горчаковский // Тр. Ин-та биологии УФАИ СССР. – 1966. – Вып. 48. – С. 3–269.

Горчаковский, П.Л. Физиономическая и экологическая дифференциация верхней границы леса на Северном Урале / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов // Зап. Сверд. отд. ВБО. – Свердловск, 1970. – Вып. 5. – С. 14–33.

Горчаковский, П.Л. Фитоиндикация климатических условий на верхнем пределе леса / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов // Экология. – 1973. – № 1. – С. 50–65.

Горчаковский, П.Л. Верхняя граница леса в горах бореальной зоны СССР и ее динамика / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов // Высокогорная экология. – М.: Ин-т геогр. СССР, 1976. – С. 52–55.

Горчаковский, П.Л. Верхняя граница леса в лесах бореальной зоны СССР и ее динамика / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов // Бот. журн. – 1977а. – Т. 62. – № 11. – С. 1560–1571.

Горчаковский, П.Л. Международный симпозиум по высокогорной экологии / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов // Экология. – 1977б. – № 2. – С. 107–112.

Горчаковский, П.Л. Фитоиндикация условий среды и природных процессов / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов. – М.: Наука, 1985. – 208 с.

Горшков, В.В. Влияние атмосферного загрязнения окислами серы на эпифитный лишайниковый покров северотаежных сосновых лесов / В.В. Горшков // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л.: Наука, 1990. – С. 144–159.

ГОСТ Р 8.563-96. ГСИ. Методики выполнения измерений. – Взамен ПР 50.2.001-94; введ. 1997-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2002.

ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1–6. – 2002-11-01. – М.: Изд-во стандартов, 2006.

Грешта, Я. Влияние промышленной загрязненности воздуха на сосновые и еловые древостои / Я. Грешта // Растительность и промышленные загрязнения. – Свердловск, 1970. – Вып. 7. – С. 20–25.

Гришина, Л.А. Влияние промышленного загрязнения на процессы трансформации органического вещества / Л.А. Гришина, Г.Н. Фомина // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду: тез. докл. – Пушино, 1984. – С. 51–53.

Гродзинский, А.М. Краткий справочник по физиологии растений / А.М. Гродзинский, Д.М. Гродзинский. – Киев: Наукова думка, 1973. – 592 с.

Гроховский, В.И. Возможности цифровой микроскопии в металлографии / В.И. Гроховский // Цифровая микроскопия: матер. школы-семинара. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2001. – С. 18.

Груза, Г.В. Обнаружение изменчивости климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова // Метеорол. и гидрол. – 2004. – № 4. – С. 50–67.

Демежко, Д.Ю. Почему меняется климат? / Д.Ю. Демежко // Наука Урала. – 2003. – № 25 (853). – С. 4–5.

Докунина, Е.А. Хвойные древостои как индикатор состояния лесных фитоценозов / Е.А. Докунина // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду: тез. докл. – Пушино, 1984. – С. 61–62.

Дроздов, О.А. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР / О.А. Дроздов, А.С. Григорьева. – Л.: Гидрометеосиздат, 1971. – 159 с.

Дялтувас, Р.П. Результаты регионального мониторинга лесов Литовской ССР / Р.П. Дялтувас, Л.П. Гульбинская // Лесное хозяйство. – 1989. – № 5. – С. 49–51.

Елпатьевский, П.В. К вопросу о методах оценки промышленного воздействия на состояние окружающей среды / П.В. Елпатьевский, В.С. Арманова // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду: тез. докл. – Пушино, 1984. – С. 68–70.

Ефимова, Н.А. О сопоставлении изменений климата в 1981–2000 гг. с палеоаналогами глобального потепления / Н.А. Ефимова [и др.] // Метеорол. и гидрол. – 2004. – № 8. – С. 18–23.

Жидков, А.Н. Эпифитные лишайники сосновых фитоценозов в условиях промышленного загрязнения / А.Н. Жидков // Лесное хозяйство. – 1996. – № 2. – С. 30–31.

Завьялова, Н.С. Влияние освещенности на морфологические и физиологические свойства молодых растений сосны обыкновенной / Н.С. Завьялова, В.И. Юшков // Экология. – 1979. – № 9. – С. 39.

Залиханов, М.Ч. Изменение климата и устойчивое развитие Российской Федерации / М.Ч. Залиханов // Метеорол. и гидрол. – 2004. – № 4. – С. 130–136.

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

Зуева, Г.В. Фертильность пыльцы сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения атмосферы / Г.В. Зуева, С.Г. Махнева // Леса Урала и хозяйство в них. – Екатеринбург, 1993. – Вып. 16. – С. 225–237.

Зырин, Н.Г. Тяжелые металлы в почвах и растениях в районе медеплавильного производства / Н.Г. Зырин, Н.З. Першина, С.И. Решетников // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду: тез. докл. – Пушино, 1984. – С. 81–83.

Игошина, К.Н. Высокогорная растительность Среднего Урала / К.Н. Игошина // Журн. Рус. бот. о-ва. – 1931. – Т. 16. – № 1. – С. 1–62.

Изменение климата: Обобщ. докл. Вклад рабочих групп I, II, III в подготовку Третьего доклада об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата; ред. Р.Т. Уотсон. – Женева: Швейцария: ВМО-ЮНЕП, 2003. – 220 с.

Изменение климата: Обзор состояния научных знаний об антропогенном изменении климата / А.О. Кокорин: РРЭЦ, GOF, WWF России, 2005. – 20 с.

Израэль, Ю.А. Эффективный путь сохранения климата на современном уровне – основная цель решения климатической проблемы / Ю.А. Израэль // Метеорол. и гидрол. – 2005. – № 10. – С. 5–9.

Израэль, Ю.А. Изменение глобального климата. Роль антропогенных воздействий / Ю.А. Израэль [и др.] // Метеорол. и гидрол. – 2001. – № 5. – С. 5–21.

Израэль, Ю.А. Четвертый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата: вклад Рабочей группы II / Ю.А. Израэль, С.М. Семенов, О.А. Анисимов [и др.] // Метеорол. и гидрол. – 2007. – № 9. – С. 5–13.

- Илькун, Г.М. Загрязнители атмосферы и растения / Г.М. Илькун. – Киев: Наукова думка, 1978. – 247 с.
- Ипполитов, В. Беды Конжаковского Камня / В. Ипполитов // На смену. – 1976. – 8 апр. – С. 2.
- Исаев, А.С. Аэрокосмический мониторинг лесных ресурсов / А.С. Исаев, В.И. Сухих // Лесоведение. – 1986. – № 6. – С. 11–20.
- Кайбияйнен, Л.К. Водный режим и фотосинтез сосны в условиях промышленного загрязнения среды / Л.К. Кайбияйнен [и др.] // Физиология растений. – 1995. – Т. 42. – № 3. – С. 451–456.
- Калинин, В.А. Состояние искусственных сосновых молодняков в условиях атмосферных промышленных загрязнений и рубки ухода в них: дис. ... канд. с.-х. наук. – Свердловск. 1989. – С. 54–59.
- Калинин, В.А. Модель оценки состояния пораженных древостоев / В.А. Калинин [и др.] // Экология. – 1991. – № 3. – С. 21–28.
- Капралов, Д.С. Изменения в составе, структуре и высотном положении мелколесий на верхнем пределе их произрастания в горах Северного Урала / Д.С. Капралов [и др.] // Экология. – 2006. – № 6. – С. 403–409.
- Карта экологической ситуации промышленных районов Свердловской области. – М., 1993.
- Каширо, Ю.П. Электрическое сопротивление тканей прикамбиального комплекса ствола у сосны обыкновенной и его диагностические возможности / Ю.П. Каширо, Н.Х. Хасанов, Е.М. Дорожкин // Леса Урала и хозяйство в них. – Свердловск, 1988. – Вып. 14. – С. 183–188.
- Кирпичникова, Т.В. Состояние фотосинтетического аппарата хвои сосны и ели в зонах промышленного загрязнения при различных микроклиматических условиях / Т.В. Кирпичникова, С.А. Шавнин, А.А. Кривошеева // Физиология растений. – 1995. – Т. 42. – № 1. – С. 107–113.
- Киселев, В.Н. Лихеноиндикация загрязнения воздушной среды зеленых зон промышленных центров Белоруссии / В.Н. Киселев, К.Д. Чубанов, А.В. Бойко // Экология. – 1986. – № 2. – С. 30–35.
- Китаев, Л.М. Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова на севере Евразии в условиях современных изменений климата / Л.М. Китаев, В.Ф. Радионов, Э. Форланд // Метеорол. и гидрол. – 2004. – № 11. – С. 65–72.
- Климат Свердловска. – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – С. 17–33.
- Климатический справочник СССР. Вып. 9а. Ч. 1. Температура воздуха. – Л.: Гидрометеоздат, 1954. – С. 63–66.
- Климатический справочник СССР. Вып. 9а. Ч. 4. Ветер. – Л.: Гидрометеоздат, 1958. – С. 78–91.
- Кобышева, Н.В. Климатология / Н.В. Кобышева, С.Н. Костин, Э.А. Струнников. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 344 с.
- Коваленко, Л.А. Состояние биологической активности лесных почв под сосновыми насаждениями при воздействии сильного и длительного промышленного загрязнения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – Екатеринбург, 1996. – С. 19–22.
- Кокорин, А.О. Парниковые газы – глобальный экологический ресурс: справ. по соб. / А.О. Кокорин [и др.]. – М.: WWF России, 2004а. – 136 с.
- Кокорин, А.О. Изменения климата и Киотский протокол – реалии и практические возможности / А.О. Кокорин, И.Г. Грицевич, Г.В. Сафонов. – М.: WWF России, 2004б. – 64 с.
- Колесников Б.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области / Б.П. Колесников, Р.С. Зубарева, Е.П. Смолоногов. – Свердловск, 1973. – 175 с.
- Колищук, В.Г. Верхняя граница леса в Украинских Карпатах, ее современное состояние и динамика: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Киев, 1960.
- Коновалов, Н.А. Деревья и кустарники для озеленения городов Урала / Н.А. Коновалов, Н.А. Луганский. – Свердловск, 1967. – С. 15.
- Корзухин, М.Д. О программе прогноза динамики лесов / М.Д. Корзухин, В.Н. Седых // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л., 1982. – Т. 5. – С. 91–102.
- Костенко, А.В. Ранняя диагностика нарушения жизнедеятельности древесных растений в условиях загрязнения атмосферы SO₂ / А.В. Костенко, Ю.Б. Боронин // Экология леса и охрана природы. – М.: ВНИИЛМ, 1993. – С. 52–55.
- Костин, С.И. Краткий курс метеорологии и климатологии для лесоводов / С.И. Костин. – Л., 1971. – С. 130–134.

- Костюкевич, Н.И. Лесная метеорология. – Минск.: Вышэйшая школа, 1975. – 288 с.
- Крамер, П.Д. Физиология древесных растений / П.Д. Крамер, Т.Т. Козловский. М.: Лесн. пром-сть, 1983. – 464 с. (Kramer P.J., Kozlowski T.T. Physiology of Woody Plants // New York, San Francisco, London. Acad. Press., 1979).
- Красинский, Н.П. Теоретические основы построения ассортиментов газоустойчивых растений / Н.П. Красинский // Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые сорта. – М.; – Горький, 1950. – С. 9–103.
- Кривошеева, А.А. Влияние промышленных загрязнений на сезонные изменения содержания хлорофилла в хвое сосны обыкновенной / А.А. Кривошеева [и др.] // Физиология растений. – 1991. – Т. 38. – С. 163–168.
- Крокер, В. Рост растений / В. Крокер. – М., 1950. – 360 с.
- Кропачева, И.В. Значения картографического метода в экологических исследованиях / И.В. Кропачева, В.В. Зернин // Безопасность биосферы: тез. докл. – Екатеринбург, 1997. – С. 175–176.
- Крючков, В.А. Химический анализ растительного сырья / В.А. Крючков, Г.Н. Новоселова, И.П. Степанова. – Свердловск, 1988. – С. 37–38.
- Крючков, В.В. Предельные антропогенные нагрузки и состояние экосистем Севера / В.В. Крючков // Экология. – 1991. – № 3. – С. 28–40.
- Крючков, В.В. Лишайники как биоиндикаторы качества окружающей среды в северной тайге / В.В. Крючков, Н.А. Сыроид // Экология. – 1990. – № 6. – С. 63–66.
- Крэнг, Р.Ф.Е. Воздействие двуокиси серы на ультраструктуру листа / Р.Ф.Е. Крэнг // Взаимодействие лесных экосистем и атмосферных загрязнителей. – Таллин, 1982. – Ч. 1. – С. 161–174.
- Куваев, В.Б. Высотное распределение растительного покрова Ляпинского Урала: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 1952. – 15 с.
- Кузнецов Н.А. Фундаментальное значение информатики в научной картине мира / Н.А. Кузнецов [и др.] // Информационные процессы. – 2006. – Т. 6. – № 2. – С. 81–109.
- Кузьмичев, В.В. Оценка антропогенного воздействия на лесные экосистемы / В.В. Кузьмичев // Лесоведение. – 1985. – № 6. – С. 3–11.
- Кулагин, Ю.З. Водный режим и газоустойчивость древесных растений / Ю.З. Кулагин // Растительность и промышленные загрязнения. – Свердловск, 1966. – С. 49–51.
- Кулагин, Ю.З. Древесные растения и промышленная среда / Ю.З. Кулагин. – М.: Наука, 1974. – С. 39–100.
- Кунина, И.М. Действие сернистого ангидрида на метаболизм растительной клетки / И.М. Кунина, И.Д. Инсарова, С.Б. Трушин // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л: Гидрометеоиздат, 1979. – Т. 2. – С. 105.
- Кусков, А.И. Структура и динамика приземного температурного поля на азиатской территории России / А.И. Кусков, С.Г. Катаев. – Томск: Изд-во Томск. гос. пед. ун-та, 2006. – 176 с.
- Лебеденко, Л.А. Динамика размножения камбиальных клеток у сосны и ели / Л.А. Лебеденко // Восстановление леса на северо-западе РСФСР: сб. тр. Лен. НИИЛХ. – Л., 1978. – С. 101–111.
- Левон, Ф.М. Выделение воска разновозрастной хвоей в условиях загрязнения воздуха сернистым газом / Ф.М. Левон, Р.П. Федорищак, Г.К. Туренко // Растения и промышленная среда. – Кисв: Наукова думка, 1976. – С. 95–96.
- Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. – Свердловск, 1973. – С. 12–25.
- Лица, И.Я. Единый метод таксации реакции древостоя на антропогенное воздействие / И.Я. Лица // Лесоведение. – 1985. – № 6. – С. 12–18.
- Ловелиус, Н.В. Изменчивость прироста деревьев / Н.В. Ловелиус. – Л.: Наука, 1979. – 230 с.
- Лянгузова, И.В. Химический состав растений при атмосферном и почвенном загрязнении / И.В. Лянгузова, О.Г. Чертов // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л., 1990. – С. 75–86.
- Макаров, М.И. Изменение свойств лесных почв под воздействием кислых осадков в условиях эксперимента / М.И. Макаров, Н.П. Недбаев // Лесоведение. – 1994. – № 5. – С. 26–35.
- Малышева, Н.В. Всесоюзное совещание «аэрокосмический мониторинг лесных ресурсов зоны интенсивного ведения лесного хозяйства» / Н.В. Малышева // Лесоведение. – 1989. – № 5. – С. 76–77.

Мамаев, С.А. Индивидуальная изменчивость сосны обыкновенной по устойчивости к действию сернистого газа / С.А. Мамаев, Н.М. Макаров // Растения и промышленная среда. – Киев: Наукова думка, 1976. – С. 96–99.

Мамаев, С.А. Динамика некоторых биофизических характеристик однолетних побегов сосны обыкновенной при переходе в состояние покоя / С.А. Мамаев, С.А. Шавнин // Лесное хозяйство; под ред. Л.И. Вигорова. – Свердловск, 1976. – С. 156–159.

Мартин, Ю.Л. Лихеноиндикация состояния окружающей среды / Ю.Л. Мартин // Взаимодействия лесных экосистем и атмосферных загрязнителей. – Таллин, 1982. – С. 159–172.

Мартынюк, А.А. Влияние промышленных выбросов на рост и производительность сосновых древостоев / А.А. Мартынюк, Н.И. Данилов // Лесное хозяйство. – 1989. – № 4. – С. 17–19.

Маслов, Н.Н. Микроопределение серы в растительном материале / Н.Н. Маслов // Методы биохимического анализа растений; под ред. В.В. Полевого. – Л.: ЛГУ, 1978. – 192 с.

Массель, Г.И. Аминокислотный обмен у хвойных в условиях промышленного загрязнения и энтомавазии / Г.И. Массель, М.М. Швец, В.В. Кондрашов // Экология. – 1988. – № 4. – С. 71–74.

Мауринь, А. Темпоральность как интегральный показатель тренда состояния лесных экосистем / А. Мауринь // Мониторинг лесных экосистем: тез. докл. – Каунас, 1986. – С. 348–349.

Мелешко, В.П. Антропогенные изменения климата в XXI веке в Северной Евразии / В.П. Мелешко [и др.] // Метеорол. и гидрол. – 2004. – № 7. – С. 5–26.

Метеорологический ежегодник. Свердловск: Госкомитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Уральское упр. гидрометеослужбой, вып. 1961–2000.

Методы биохимического анализа растений; под ред. В.В. Полевого. – Л.: ЛГУ, 1978. – 192 с.
Мигачев, Б.С. Аттестация методик выполнения измерений – важнейшее условие совершенствования системы контроля качества продукции / Б.С. Мигачев // Законодательная и прикладная метрология. – 1997. – № 2. – С. 11.

Михайлова, И.Н. Эпифитные лишениосинузии Среднего Урала в условиях аэротехногенного загрязнения: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Екатеринбург, 1996. – 24 с.

Михайлова, Т.А. Анатомические изменения тканей хвои при воздействии фтористого водорода / Т.А. Михайлова, Е.Д. Бережных // Лесоведение. – 1995. – № 1. – С. 84–88.

Михайлова, Т.А. Оценка сезонного повреждения хвойных пород поллютантами / Т.А. Михайлова, В.И. Воронин // Лесоведение. – 1988. – № 1. – С. 67–69.

Моисеев, П.А. Влияние изменения климата на формирование поколений ели сибирской в подольцовых древостоях Южного Урала / П.А. Моисеев, М. Ван Дер Месер, А. Риглинг, И.Г. Шевченко // Экология. – 2004. – № 3. – С. 135–143.

Монин, А.С. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы / А.С. Монин, Д.М. Сончкин. – М.: Наука, 2005. – 191 с.

Морозов, А.Е. Основы лесной метеорологии: учеб. пособ. / А.Е. Морозов; УГЛТУ. – Екатеринбург, 2005. – С. 150–157.

Морозов, Г.Ф. Учение о лесе / Г.Ф. Морозов. – М.: Госиздат, 1930. – 440 с.

Мюррей Митчелл Дж. мл. Современные вековые колебания температуры земного шара / Дж. Мюррей Митчелл мл. // Солнечная активность и изменения климата. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – С. 87–105.

Негруцкая, Г.М. Действие сернистого ангидрида на активность окислительных ферментов хвои сосны обыкновенной / Г.М. Негруцкая, Ю.Г. Приседский // Растения и промышленная среда. – Киев: Наукова думка, 1976. – С. 112–114.

Николаевский, В.С. Биологические основы газоустойчивости растений / В.С. Николаевский. – Новосибирск: Наука, 1979. – 278 с.

Николаевский, В.С. Влияние сернистого ангидрида на древесные растения в условиях Свердловской области / В.С. Николаевский // Охрана природы на Урале. Растительность и промышленные загрязнения. – Свердловск, 1964. – Вып. 4. – С. 123–132.

Николаевский, В.С. Влияние сернистого ангидрида на ферментативную активность листьев древесных растений / В.С. Николаевский // Растительность и промышленные загрязнения. – Свердловск, 1966. – Вып. 5. – С. 19–25.

Огиевский, В.В. Обследование и исследование лесных культур / В.В. Огиевский, А.А. Хиров. – М.: Лесн. пром-сть, 1974. – 24 с.

Окрестности Екатеринбурга. Топографическая карта. Масштаб 1:100 000. Военно-картографическая фабрика УрВО, 2000. – 34 с.

- Опасные последствия глобального изменения климата / Г.В. Сафонов: РРЭЦ, GOF, WWW России, 2006. – 20 с.
- Основы лесной биогеоценологии; под ред. В.Н. Сукачева и Н.В. Дылиса. – М.: Наука, 1964. – 574 с.
- ОСТ-56-69-83. Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки. – М., 1984. – 60 с.
- Оцхели, О.В. Особенности жизненного состояния семенного потомства голубой и обыкновенной ели из придорожных местообитаний / О.В. Оцхели, Л.Ф. Николаева, Н.Б. Фролова // Безопасность биосферы: тез. докл. – Екатеринбург, 1997. – С. 235–236.
- Пастернак, П.С. Изменение некоторых структурных особенностей лесного биогеоценоза в условиях аэротехногенного загрязнения окружающей среды / П.С. Пастернак, В.П. Ворон, В.Г. Мазепа, Г.К. Приступа // Экология. – 1990. – № 3. – С. 7–13.
- Пастернак, П.С. Воздействие загрязнения атмосферы на сосновые леса Донбасса / П.С. Пастернак, В.П. Ворон, Т.С. Стельмахова // Лесоведение. – 1993. – № 2. – С. 28–38.
- Пауков, А.Г. Лихноиндикационное картирование г. Екатеринбурга // Безопасность биосферы: тез. докл. – Екатеринбург, 1997. – С. 180–181.
- Педь, Д.А. О показателе засухи и избыточного увлажнения / Д.А. Педь // Труды Гидрометцентра СССР. – 1975. – № 156. – С. 19–38.
- Пласс, Г.Н. Влияние молекул газов, поглощающих инфракрасное излучение, на климат / Г.Н. Пласс // Солнечная активность и изменения климата. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – С. 10–22.
- Платова, Т.В. О климатических изменениях в зернопроизводящих районах России / Т.В. Платова // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – СПб.: Гидрометеоздат, 2002. Т. XVIII. – С. 221–233.
- Поддубный, В.А. Сравнение динамики выбросов, наблюдаемых уровней загрязнения и расчетных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере города Каменск-Уральского / В.А. Поддубный, Ю.И. Маркелов, О.А. Брюховских [и др.] // Стратегические направления экологических исследований и экологическая политика: тез. докл. – Екатеринбург, 1996. – С. 37–38.
- Полозова, Л.Г. Вековые колебания климата на основе анализа годичного прироста деревьев вдоль полярной границы леса / Л.Г. Полозова, С.Г. Шиятов // История биогеоценозов СССР в голоценс. – М.: Наука, 1976. – С. 14–23.
- Попов, А.С. Комплексная сравнительная оценка состояния основных древостоев в зоне влияния аэропромышленных выбросов Среднеуральского медеплавильного завода: автореф. ... канд. с.-х. наук. – Екатеринбург, 2006. – 20 с.
- Постановление Совета Министров – Правительства Российской Федерации от 5 февраля 1993 года, № 100, г. Москва. «О государственной программе мониторинга земель Российской Федерации на 1993–1995 годы» // Российская газета. – 1993. – Март. – № 36.
- Правила рубок главного пользования в лесах Урала. – М.: 1994. – 34 с.
- Приступа, Г.К. Анатомо-морфологические изменения хвои сосны в техногенных условиях / Г.К. Приступа, В.Г. Мазепа // Лесоведение. – 1987. – № 1. – С. 58–60.
- Рамочная конвенция ООН об изменении климата. Первые десять лет. РКИК ООН, 2004. – 99 с.
- Ранькова, Э.Я. Индикаторы изменений климата России / Э.Я. Ранькова, Г.В. Груза // Метеорол. и гидрол. – 1998. – № 1. – С. 5–18.
- Растительность Южного Урала на участке между Ильменским заповедником и горой Ирмель: путеводитель бот. экскурсии; под ред. П.Л. Горчаковского. – Свердловск: Ин-т экологии растений и животных УНЦ АН СССР, 1982. – С. 27–53.
- Розенберг, Г.С. Адекватность математического моделирования экологических систем / Г.С. Розенберг // Экология. – 1989. – № 6. – С. 8–14.
- Романовский, М.Г. Сохранность семян сосны обыкновенной в условиях интенсивного загрязнения автотранспортом / М.Г. Романовский // Лесоведение. – 1993. – № 1. – С. 86–88.
- Ромашкевич, В.Е. Влияние газопылевых выбросов промышленных предприятий на лесорастительные свойства почв / В.Е. Ромашкевич, А.И. Обухов // Деградация и восстановление лесных почв. – М.: Наука, 1991. – С. 185–194.
- Рубинштейн, Е.С. Современное изменение климата / Е.С. Рубинштейн, Л.Г. Полозова. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 268 с.
- Рудкова, А.А. Пути воздействия загрязнения атмосферы соединениями серы на наземные растения / А.А. Рудкова // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. – Л., 1981. – Т. 4. – С. 99–100.

- Рябинин, В.М. Влияние промышленных газов на рост деревьев и кустарников / В.М. Рябинин // Бот. журн. – 1962. – Т. 47. – № 3. – С. 412–416.
- Савельева, Е.А. Детерминистические методы пространственной интерполяции / Е.А. Савельева, В.В. Демьянов, С.Ю. Чернов // Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю.М. Арского. – М.: ВИНТИ, 1999. – С. 13–25.
- Садыков, О.Ф. Прикладные аспекты наследия С.С. Шварца / О.Ф. Садыков // Развитие идей академика С.С. Шварца в современной экологии. – М.: Наука, 1991. – С. 143–213.
- Санитарные нормы и правила в лесах СССР. – М.: Лесн. пром-ст, 1970. – С. 16.
- Санитарные нормы и правила в лесах СССР. – М.: ВНИИЦ лесресурс, 1998. – С. 25.
- Селиховкин, А.В. Лесознтомологический мониторинг в зонах интенсивных промышленных выбросов / А.В. Селиховкин // Лесн. журн. – 1992. – № 2. – С. 17–19.
- Семенов, Н.В. Опыт изучения хвои сосны для оценки состояния лесных экосистем / Н.В. Семенов, А.А. Рудакова // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л., 1988. – Т. 9. – С. 142–149.
- Ситникова, А.С. Об изучении физиологических показателей древесных и кустарниковых пород, связанных с газо- и дымоустойчивостью / А.С. Ситникова // Растительность и промышленные загрязнения. – Свердловск, 1966. – С. 39–44.
- Смирнов, И.А. Влияние сернистого газа на интенсивность водоотдачи у древесных растений / И.А. Смирнов // Экология. – 1986. – № 3. – С. 19–23.
- Смолоногов, Е.П. Комплексное районирование Урала / Е.П. Смолоногов // Леса Урала и хозяйство в них. – Свердловск, 1995. – Вып. 18. – С. 24–42.
- Соловьев, В.М. Использование морфологических показателей для оценки состояния древесных растений / В.М. Соловьев, Ф.Р. Соловьева, Е.А. Вагина // Леса Урала и хозяйство в них. – Екатеринбург, 1995. – Вып. 18. – С. 172–180.
- Сочава, В.Б. Пределы лесов в горах Ляпинского Урала / В.Б. Сочава // Тр. Бот. музея АН СССР. – Л.: Изд-во АН СССР, 1930. – Вып. 22. – С. 1–48.
- Станюкович, К.В. Растительность высокогорий СССР / К.В. Станюкович. – Душанбе: Изд-во АН ТаджССР, 1960. – Ч. 1. – 167 с.
- Старыгин, Л.А. Зависимость состояния лесов от уровня загрязнения атмосферы в зоне промышленных узлов Урала / Л.А. Старыгин, С.А. Шавнин, М.В. Винокуров // Безопасность биосферы: тез. докл. – Екатеринбург, 1997. – С. 242.
- Степанов, А.М. Биоиндикация на уровне экосистем / А.М. Степанов // Биоиндикация и биомониторинг. – М.: Наука, 1991. – С. 59–63.
- Степанов, А.М. Методология биоиндикации и фоновый мониторинг экосистем суши / А.М. Степанов // Экотоксикология и охрана природы. – М.: Наука, 1988. – С. 28–108.
- Степанов, Н.Д. Меняется ли климат Урала / Н.Д. Степанов. – Свердловск: Средне-Урал. кн. изд-во, 1964. – 84 с.
- Сукачев, В.Н. Избранные труды / В.Н. Сукачев. – Л.: Наука, 1972. – Т. 1. – 418 с.
- Сукачев, В.Н. Методические указания к изучению типов леса / В.Н. Сукачев, С.В. Зонн, Г.П. Мотовилов. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 115 с.
- Суховольский, В.Г. Биофизические методы в мониторинге лесных экосистем / В.Г. Суховольский // Мониторинг лесных экосистем: тез. докл. – Каунас, 1986. – С. 36–37.
- Сысуев, В.В. Выделение типов условий местопроизрастания для лесоустройства по участковому методу / В.В. Сысуев, П.А. Шарый // Лесоведение. 2000. – № 5. – С. 10–19.
- Сычев, Е.И. О последствиях применения неаттестованных МВИ в машиностроении / Е.И. Сычев // Законодательная и прикладная метрология. – 1997. – № 4. – С. 45.
- Тамплон, Е.Ф. Экологическое картирование территорий Уральского региона / Е.Ф. Тамплон, С.Ю. Елин // Стратегические направления экологических исследований и экологическая политика: тез. докл. – Екатеринбург, 1996. – С. 60–61.
- Таранков, В.И. Радиальный прирост древостоев сосны обыкновенной в зоне действия промышленного загрязнения / В.И. Таранков, С.М. Матвеев. // Лесн. журн. – 1994. – № 4. – С. 48–51.
- Тихомиров, Б.А. К вопросу о динамике полярного и вертикального предела лесов Евразии / Б.А. Тихомиров // Сов. бот. – 1941. – № 5/6. – С. 23–38.
- Тихомиров, Б.А. Некоторые итоги и основные проблемы изучения растительного покрова севера Сибири / Б.А. Тихомиров // Известия СО АН СССР. – 1959. – № 2.
- Томас, М.Д. Влияние загрязнения атмосферного воздуха на растения / М.Д. Томас // Загрязнение атмосферного воздуха. – Женева, 1962. – С. 252–306.
- Трасс, Х.Х. Трансплантационные методы биоиндикации / Х.Х. Трасс // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л., 1985. – Т. 8. – С. 140–144.

Туллус, Х.Х. Продолжительность жизни хвои сосны обыкновенной в Эстонии / Х.Х. Туллус // Лесоведение. – 1991. – № 4. – С. 89–92.

Тэррыце, К.В. Некоторые вопросы количественной оценки влияния тяжелых металлов на биологическую активность почв / К.В. Тэррыце, П. Валтер // Экология. – 1988. – № 2. – С. 12–18.

Тюлина, Л.Н. Материалы по высокогорной растительности Южного Урала / Л.Н. Тюлина // Изв. ВГО. – 1931. – Т. 63. – Вып. 5/6. – С. 453–499.

Удовенко, Г.В. Влияние поражающих факторов внешней среды на изменения в структуре хлорофилл-белкового комплекса культурных растений / Г.В. Удовенко, В.С. Сааков, Г.И. Рутман, Г.А. Бояршикова // Растения и промышленная среда. – Киев: Наукова думка, 1976. – С. 112–114.

Фамелис, Т.В. Методические основы отображения структуры и закономерностей распределения высокогорной растительности на крупномасштабных картах (на примере Северного Урала): дис. ... канд. биол. наук / Т.В. Фамелис. – Свердловск, 1977. – С. 44–63.

Фарафонов, М.Г. Биоиндикационные свойства хлорофилла в условиях воздействия неопределенного состава / М.Г. Фарафонов // Экология. – 1991. – № 5. – С. 76–79.

Федорков, А.Л. Половая репродукция сосны обыкновенной при аэротехногенном загрязнении в условиях субарктики / А.Л. Федорков // Лесн. журн. – 1992. – № 4. – С. 60–64.

Федорков, А.Л. Влияние аэротехногенных воздействий на сохранность семян и развитие зародыша сосны обыкновенной / А.Л. Федорков // Лесоведение. – 1994. – № 5. – С. 36–40.

Федорков, А.Л. Микроспорогенез сосны при загрязнении среды в Российской Лапландии / А.Л. Федорков // Лесн. журн. – 1995. – № 1. – С. 48–50.

Федотов, И.С. Оценка действия двуокиси серы на сосновые насаждения / И.С. Федотов [и др.] // Лесоведение. – 1993. – № 6. – С. 23–27.

ФЗ РФ «Об обеспечении единства измерений» от 27 апреля 1993 г. № 4871-1.

Фимушин, Б.С. Влияние промышленных выбросов на текущий прирост сосновых древостоев / Б.С. Фимушин // Леса Урала и хозяйство в них. – Свердловск, 1988. – Вып. 14. – С. 116–122.

Фимушин, Б.С. Закономерности роста сосновых древостоев и методика оценки ущерба, наносимого промышленными выбросами в условиях пригородной зоны Свердловска: дис. ... канд. с.-х. наук / Б.С. Фимушин. – Свердловск, 1976. – 169 с.

Фирсова, В.Н. Почвенный покров Билимбаевского лесхоза / В.Н. Фирсова [и др.] // Научные основы использования и воспроизводства таежных лесов Среднего Урала. – Свердловск, 1986. – С. 45–87.

Фогль, М. Физиологические и биохимические исследования поврежденных хвойных сернистым газом / М. Фогль, С. Бертиц, Г. Польстер // Растительность и промышленные загрязнения. – Свердловск, 1970. – Вып. 7. – С. 10–15.

Фомин, В.В. Морфофизиологическая оценка состояния сосновых молодняков в зоне действия атмосферных загрязнений Первоуральско-Ревдинского промышленного узла: автореф. ... дис. канд. с.-х. наук. – Екатеринбург, 1998. – 23 с.

Фомин, В.В. Экологическое зонирование состояния лесов в зонах действия атмосферных промышленных загрязнений / В.В. Фомин, С.А. Шавнин // Экология. – 2001. – № 2. – С. 103–107.

Фомин, В.В. Влияние горного рельефа и аэропромышленных загрязнений на биометрические характеристики сосновых древостоев / В.В. Фомин, С.А. Шавнин // Экология. – 2002. – № 3. – С. 170–174.

Фомин, В.В. Динамика верхней границы леса на Южном Урале во второй половине XX века / В.В. Фомин [и др.] // ARCREVIEW. Современные геоинформационные технологии. – 2006. – № 4 (39). – С. 8.

Фомин, В.В. Разработка и использование количественных методов и моделей для оценки климатогенной и антропогенной динамики древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания / В.В. Фомин. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. – 197 с.

Фрейд, Т.Э.-А. Экофизиологические аспекты усыхания лесов / Т.Э.-А. Фрейд // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. – М.: Наука, 1987. – С. 139–142.

Фуксман, И.Л. Оценка физиолого-биохимических показателей для диагностики поражения поллютантами сосны обыкновенной / И.Л. Фуксман, В.В. Габукова, И.Ю. Ивонис [и др.] // Лесоведение. – 1997. – № 1. – С. 57–63.

Хазимова, Л.А. Определение фтора в растительных материалах / Л.А. Хазимова, Т.Л. Радовская, М.В. Круглова [и др.] // Агрохимия. – 1983. – № 6. – С. 66–72.

- Хапаев, С. А. Колебания верхней границы леса на территории Тебердинского заповедника / С. А. Хапаев // Высокогорная экология. – М.: Ин-т геогр. СССР, 1976. – С. 55–57.
- Харук, В. И. Реакция экотона «лес–тундра» на изменения климата / В. И. Харук, С. Г. Шиятов, Е. Касишке [и др.] // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – Т. XVIII. – С. 234–259.
- Хогг, Р. В. Введение в помехоустойчивое оценивание / Р. В. Хогг // Устойчивые статистические методы оценки данных. – М.: Машиностроение, 1984. – С. 12–26.
- Цветаев, А. А. Горы Ирмель (Южный Урал). Физико-географический очерк / А. А. Цветаев. – Уфа, 1960. – 83 с.
- Черненкова, Т. В. Деградация северотаежных фитоценозов в зоне влияния металлургического комбината / Т. В. Черненкова // Экотоксикология и охрана природы. – М.: Наука, 1988. – С. 158–165.
- Черненкова, Т. В. Структурные реакции лесных фитоценозов южной и северной тайги на промышленные загрязнения / Т. В. Черненкова // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. – М.: Наука, 1987. – С. 147–157.
- Черненкова, Т. В. Фитоиндикация ранних стадий техногенного нарушения северотаежных биогеоценозов / Т. В. Черненкова // Биоиндикация и биомониторинг. – М.: Наука, 1991. – С. 114–120.
- Черненкова, Т. В. Рост сосны обыкновенной в окрестностях металлургического комбината «Североникель» / Т. В. Черненкова, А. В. Макаров // Лесоведение. – 1996. – № 5. – С. 72–76.
- Чертов, О. Г. Влияние кислотных осадков на лесные почвы / О. Г. Чертов // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л., 1990. – С. 56–61.
- Чертов, О. Г. Влияние на лесные почвы загрязнения серой в комплексе с тяжелыми металлами / О. Г. Чертов [и др.] // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л., 1990. – С. 65–72.
- Чилингаров, А. Н. Некоторые вопросы современного изучения изменений климата / А. Н. Чилингаров // Метсэрол. и гидрол. – 1999. – № 10. – С. 103–105.
- Чубанов, К. Д. Состояние сосновых лесов в зонах влияния крупных промышленных центров юго-востока Белоруссии / К. Д. Чубанов // Лесоведение. – 1989. – № 4. – С. 67–75.
- Чуваев, П. П. Вопросы индустриальной экологии и физиологии растений / П. П. Чуваев, Ю. З. Кулагин, Н. В. Гетко. – Минск, 1973. – С. 20–25.
- Чупин, Н. К. Географический статистический словарь Пермской губернии / Н. К. Чупин. – Пермь, 1877. – Т. 2. – С. 79–94.
- Шавнин, С. А. О взаимосвязи ионообменных свойств хвои и биометрических характеристик деревьев сосны, подверженных действию атмосферных промышленных загрязнений / С. А. Шавнин [и др.] // Экология. – 1988. – № 6. – С. 55–57.
- Шавнин, С. А. Комплексная сравнительная оценка состояния сосновых и еловых молодняков в зоне атмосферных загрязнений Ревдинско-Первоуральского промышленного узла / С. А. Шавнин, В. А. Свешников, Т. В. Кирпичникова // Дефектоскопия. – 1993. – № 9. – С. 79.
- Шавнин, С. А. Таксационно-физиологические исследования соснового древостоя в условиях промзагрязнения / С. А. Шавнин [и др.] // Мониторинг лесных экосистем: тез. докл. – Каунас, 1986. – С. 36–37.
- Шевякова, Н. И. Метаболизм серы в растениях / Н. И. Шевякова. – М.: Наука, 1979. – 160 с.
- Шейнгауз, А. С. Нарушенность лесного покрова: классификация и картографирование по показателям лесовосстановительного процесса / А. С. Шейнгауз // Лесоведение. – 1994. – № 1. – С. 7–12.
- Шиятов, С. Г. Верхняя граница леса на Полярном Урале и ее динамика в связи с изменениями климата / С. Г. Шиятов // Докл. первой науч. конф. молодых специалистов-биологов. – Свердловск: Ин-т биол. Урал. фил. АН СССР, 1962. – С. 37–48.
- Шиятов, С. Г. Динамика верхней границы леса на восточном склоне Полярного Урала (бассейн реки Соби): автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Свердловск, 1964. – 25 с.
- Шиятов, С. Г. Возрастная структура и формирование древостоев лиственничных редколесий на верхней границе леса в бассейне реки Соби (Полярный Урал) / С. Г. Шиятов // География и динамика растительного покрова: Тр. Ин-та биол. Урал. фил. АН СССР. – Свердловск, 1965. – Вып. 42. – С. 81–96.
- Шиятов, С. Г. Колебания климата и возрастная структура древостоев лиственничных редколесий в горах Полярного Урала / С. Г. Шиятов // Растительность лесотундры и пути ее освоения. – Л.: Наука, 1967а. – С. 271–278.

Шиятов, С.Г. О некоторых особенностях роста древесных растений на верхнем и полярном пределах лесов / С.Г. Шиятов // Вопросы древесного прироста в лесоустройстве. – Каунас, 1967б. – С. 107–111.

Шиятов, С.Г. О типах верхней границы леса и ее динамике на Полярном Урале / С.Г. Шиятов // Биологические основы использования природы Севера. – Сыктывкар, 1970. – С. 73–81.

Шиятов, С.Г. Датировка одной из последних фаз экспансии древесной растительности в горах Полярного Урала / С.Г. Шиятов // Биологические проблемы Севера: тез. докл. – Апатиты, 1979а. – С. 63–64.

Шиятов, С.Г. Реконструкция колебаний климата и динамики полярной границы леса на севере Западной Сибири за последние 900 лет на основе анализа радиального прироста деревьев / С.Г. Шиятов // Особенности естественно-географической среды и исторические процессы в Западной Сибири. – Томск: Томск. ун-т, 1979б. – С. 21–23.

Шиятов, С.Г. Анализ смен лесной растительности на массиве Ирмель (Южный Урал) при помощи использования старых фотоснимков / С.Г. Шиятов // Изучение и освоение флоры и растительности высокогорий. II. Растительность высокогорий (закономерности распределения, классификация, структура, продуктивность): тез. докл. – Свердловск, 1982. – С. 102.

Шиятов, С.Г. Опыт реконструкции динамики верхней границы леса на Полярном Урале за последнее тысячелетие / С.Г. Шиятов // Всесоюзная конференция «Растительный покров субарктических высокогорий и проблема арктоальпийских флористических связей»: тез. докл. – Апатиты, 1984. – С. 38–39.

Шиятов, С.Г. Понятие о верхней границе леса / С.Г. Шиятов // Растительный мир Урала и его антропогенные изменения. – Свердловск, 1985. – С. 32–58.

Шиятов, С.Г. Изменчивость хода летних температур за последние 1250 лет на Полярном Урале / С.Г. Шиятов // Проблемы охраны окружающей среды Уральского региона: тез. докл. науч.-практ. семинара на междунар. выставке «УРАЛЭКОЛОГИЯ-97». – Екатеринбург, 1997. – С. 126–127.

Шиятов, С.Г. Климатогенная динамика подгольцовых редколесий на Полярном Урале в XX столетии / С.Г. Шиятов // Реакция растений на глобальные и региональные изменения природной среды: тез. совещ. – Иркутск, 2000. – С. 109.

Шиятов, С.Г. Методы дендрохронологии. Ч. I: Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов. – Красноярск, 2000. – 79 с.

Шиятов, С.Г. Циклическая динамика лесной растительности на Урале / С.Г. Шиятов, Г.Е. Комин, В.С. Мазепа // Экологические основы рационального использования и воспроизводства лесов Урала: информ. матер. – Свердловск: Ин-т экологии растений и животных УНЦ АН СССР, 1986. – С. 19–21.

Шиятов, С.Г. Климатогенная динамика лесотундровых экосистем в горах Полярного Урала / С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа // Экологические проблемы горных территорий: матер. междунар. науч. конф. – Екатеринбург: Академкнига, 2002. – С. 41–45.

Шиятов, С.Г. Изменения климата и их влияние на горные экосистемы Национального парка «Таганай» за последние столетия / С.Г. Шиятов [и др.] // Влияние изменения климата на экосистемы. – М.: Рус. ун-т, 2001. – Разд. II. – С. 16–31.

Шиятов, С.Г. Изменение климата и динамика лесотундровых экосистем на Полярном Урале в XX столетии / С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа, О.Ю. Чехлов // Науч. вестник. – 2002. – Вып. 11. – С. 28–35.

Шиятов, С.Г. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале / С.Г. Шиятов, М.М. Терентьев, В.В. Фомин // Экология. – 2005. – № 2. – С. 69–75.

Шиятов, С.Г. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале / С.Г. Шиятов [и др.] // Экология. – 2007. – № 4. – С. 243–248.

Шугалей, Л.С. Влияние рекреационных нагрузок на биологическую активность почв сосняков / Л.С. Шугалей, В.К. Дмитриенко // Экология. – 1982. – № 4. – С. 32–43.

Шульц, Х. Биохимическая индикация хвои – способ раннего распознавания эффектов повреждения / Х. Шульц // Биоиндикация и биомониторинг. – М.: Наука, 1991. – С. 70–78.

Шяптяне, Я.А. Закономерности усыхания сосняков в зоне интенсивных промышленных выбросов / Я.А. Шяптяне // Лесное хозяйство. – 1988. – № 2. – С. 43–46.

Юкнис, Р.А. Рост и продуктивность древесного яруса лесных экосистем в условиях загрязнения природной среды / Р.А. Юкнис, М.И. Лекене // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л., 1987. – Т. 8. – С. 145–161.

Юкнис, Р.А. Выявление антропогенно обусловленных изменений продуктивности лесных насаждений на основе анализа временных рядов годичного прироста деревьев / Р.А. Юкнис, Д.А. Шипените, А.И. Жиливичус // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л., 1985. – Т. 8. – С. 145–157.

Юсупов, А.И. Состояние и устойчивость искусственных сосновых молодняков в условиях аэропромвыбросов на Среднем Урале: дис. ... канд. с.-х. наук / А.И. Юсупов. – Екатеринбург, 1996. – С. 138.

Юшков, В.И. Структура и функция ассимиляционного аппарата молодых растений кедр сибирского при разных световых режимах / В.И. Юшков, Н.С. Завьялова // Экология. – 1988. – № 4. – С. 18–24.

Acevedo, M.F. Landscape Scale Forest Dynamics: GIS, Gap and Transition Models / M.F. Acevedo, D.L. Urban, and N. Alban // GIS and Environmental Modeling Progress and Research Issues. – Fort Collins: GIS World Books, 1996. – P. 181–185.

Antonic, O. Estimating the direction of an unknown air pollution source using a digital elevation model and a sample of deposition / O. Antonic, T. Legovic // Ecological Modelling. – 1999. – Vol. 124. – P. 85–95.

ASTM E 1245-03. Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-phase Constituent Content of Metal by Automatic Image Analysis.

Bates, Z.X. Rapid determination of free proline for water stress studies / Z.X. Bates, R.P. Waldren, J.D. Tear // Plant and soil. – 1973. – Vol. 39. – No. 1. – P. 203.

Bernal-Salazar, S. Impact of air pollution on ring width and tracheid dimensions in *Abies religiosa* in the Mexico city basin / S. Bernal-Salazar, T. Terrazas, D. Alvarado // IAWA Journal. – 2004. – Vol. 25. – P. 205–215.

Briffa, K.R. Unusual twentieth-century summer warmth in a 1,000-year temperature record from Siberia / K.R. Briffa, P.D. Jones, F.H. Schweingruber [et al.] // Nature. – 1995. – Vol. 376. – P. 156–159.

BS 3406-4:1993. Method for Determination of Particle Size Distribution – Part 4: Guide to microscope and image analysis method.

Bytnerowicz, A. Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective / A. Bytnerowicz, K. Omasa, E. Paoletti. // Environmental Pollution. – 2007. – Vol. 147. – P. 438–445.

Chen, W. Image mining for investigate pathology using optimized feature extraction and data fusion / W. Chen, P. Meer, B. Georgescu [et al.] // Computer Methods ad Programs in Biomedicine. – 2005. – Vol. 79. – P. 59–72.

Cook, E.R. A time series analysis approach to tree-ring standartization. Unpublished Ph. D. Dissertation / Cook E.R. University of Arizona, Tucson. AZ, USA, 1985.

Dale, V.H. The relationship between land-use change and climate change / V.H. Dale // Ecological application. – 1997. – Vol. 7. – No. 3. – P. 753–769.

Dann, M.S. Decline of activity and quantity of rubilose biphosphate carboxylase/oxygenase and net photosynthesis in ozone-treated potato foliage / M.S. Dann, E.J. Pell // Plant. Physiol. – 1989. – Vol. 91. – P. 427–432.

Demmig-Adams, B. Light Responce of CO₂ Accimilation, Dissipation of Excess Exitation Energy, and Zeaxanthin Content of Sun and Shade Leaves / B. Demmig-Adams, K. Winter, A. Kruger, F.-C. Czygan // Plant. Physiol. – 1989. – Vol. 90. – P. 881–886.

Dixon, R.K. Simulations of forest system response and feedbacks to global change: experiences and results from the U.S. Country Studies Program / R.K. Dixon, J.B. Smith, S. Brown [et al.] // Ecological Modelling. – 1999. – Vol. 122. – P. 289–305.

Drăguț, L. Geomorphology / L. Drăguț, T. Blaschke // Geomorphology. – 2006. – Vol. 81. – P. 330–344.

French, D.P. Integrated Environmental Impact Model and GIS for Oil and Chemical Spills / D.P. French, M. Reed // GIS and Environmental Modeling Progress and Research Issues. – Fort Collins: GIS World Books, 1996. – P. 197–198.

Gilmanov, T.G. Testing the “CENTURY” ecosystem level model on data sets from eight grassland sites in the former USSR representing a wide climatic/soil gradient / T.G. Gilmanov, W.J. Parton, D.S. Ojima // Ecological Modelling. – 1997. – Vol. 96. – P. 191–210.

Goward, S.N. Ecological remote sensing at otter: satellite macroscale observation / S.N. Goward [et al.] // Ecological application. – 1994. – No. 4 (2). – P. 322–343.

Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. – Brussels, 2007. – 23 p.

- Hay, G.J. A scale-space primer for exploring and quantifying complex landscapes / G.J. Hay [et al.] // *Ecological modeling*. – 2002. – Vol. 153. – P. 27–49.
- Holtmeier, F.-K. Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics / F.-K. Holtmeier. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publishers, 2003. – 369 p.
- Hörsch, B. Modelling the spatial distribution of montane and subalpine forests in the central Alps using digital elevation models / B. Hörsch // *Ecological Modelling*. – 2003. – Vol. 168. – P. 267–282.
- Innes, J.L. Tree-ring analysis as an aid to evaluating the effects of pollution on tree growth / J.L. Innes, E.R. Cook // *Can. J. For. Res.* – 1989. – Vol. 19. – P. 1174–1189.
- Jakubauskas, M.E. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data / M.E. Jakubauskas, D.R. Legates, J.H. Kastens // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2002. – Vol. 37 – P. 127–139.
- Jaworski, A. Growth trends of the European main forest tree species and potential causes. Part I. Changes in growth trends / A. Jaworski // *Sylvan*. – 2003. – No. 6. – P. 99–106.
- Johnston, C.A. Modelling of Spatially Static and Dinamic Ecological Processes / C.A. Johnston, Y. Cohen, J. Pastor // *GIS and Environmental Modeling Progress and Research Issues*. – Fort Collins: GIS World Books, 1996. – P. 149–154.
- ISO 13322-1:2000 Static Image Analysis Methods.
- Kellomaki, S. Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions / S. Kellomaki, H. Vaisiinen // *Ecological Modelling*. – 1997. – Vol. 97. – P. 121–140.
- Koussoulakou, A. Spatial-temporal Analysis of Urban Air Pollution / A. Koussoulakou // *Visualization in Modern Cartography*. – Great Britain: Pergamon, 1994. – P. 243–267.
- Körner, C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanations / C. Körner // *Oecologia*. – 1998. – Vol. 115. – P. 445–459.
- Körner, Ch. *Alpine Plant Life* / Ch. Körner. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 1999. – 343 p.
- Körner, C. A world-wide study of high altitude treeline temperatures / C. Körner, J. Paulsen // *J. of Biogeography*. – 2004. – Vol. 31. – P. 713–732.
- Köstler, J.N. Waldgrenzen im Berchtesgadener Land / J.N. Köstler, H. Mayer // *Jb. Ver. Schutze Alpenpflanz. und Tiere*. – 1970. – Bd 35. – S. 121–153.
- Krajick, K. All downhill from here? / K. Krajick // *Science*. – 2004. – Vol. 303. – P. 1600–1602.
- Krause, G.H. Chlorophyll Fluorescence and Potosynthesis: the Basics / G.H. Krause, E. Weis // *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* – 1991. – Vol. 42. – P. 313–349.
- Kullman, L. Change and stability in the altitude of the birch tree-limit in the southern Swedish Scandes, 1915–1975 / L. Kullman // *Acta phytogeogr. suec.* – 1979. – No. 65. – P. 121.
- Kullman, L. 20th century climate warming and tree-limit rise in the Southern Scandes of Sweden / L. Kullman // *Ambio*. – 2001. – V. 30. – No. 2. – P. 72–80.
- Kullman, L. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes / L. Kullman // *J. of Ecology*. – 2002. – Vol. 90. – P. 68–77.
- Kullman, L. Recent reversal of Neoglacial climate cooling trend in the Swedish candes as evidenced by mountain birch tree-limit rise // *Global and Planetary Change*. – 2003. – V. 36. – P. 77–88.
- Kullman, L. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: implications for tree line theory and climate change ecology / L. Kullman // *J. of Ecology*. – 2007. – Vol. 95. – P. 41–52.
- Lambers, H. *Plant Physiological Ecology* / H. Lambers, F. Stuart Chapin III, T. L. Pons. – Springer, 1998. – 540 p.
- Landry, L.G. Modification of Rubisco and altered proteolic activity in O₃-stressed hybrid poplar (*Populus maximovizii trichocarpa*) / L.G. Landry, E.J. Pell // *Plant. Physiol.* – 1993. – Vol. 101. – P. 1355–1362.
- Lehmann, A. GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction / A. Lehmann, J.C. Overton, J.R. Leathwick // *Ecological modeling*. – 2003. – Vol. 160. – P. 165–183.
- Lichtenthaler, H.K. Chlorophyll Fluorescence Signatures as Vitaliy Indicator in Forest Decline Research / H.K. Lichtenthaler, U. Rinderle // *Application of Chlorophyll Fluorescence*; ed. H.K. Lichtenthaler. – Kluwer Acad. Publishers, 1988. – P. 143–149.
- Loehle, C. Model-based assessments of climate change effects on forests: a critical review / C. Loehle, D. LeBlanc // *Ecological Modelling*. – 1996. – Vol. 90. – P. 1–31.
- Lowell, K.E. Differences between Ecological Land Type Maps Prodused Using GIS or Manual Cartographic Methods / K.E. Lowell // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1990. – Vol. 2. – No. 2. – P. 169–173.

- Mangin, J.-F. Coordinate-based versus structural approaches to brain image analysis / J.-F. Mangin, D. Rivière, O. Coulon [et al.] // *Artificial Intelligence in Medicine*. – 2004. – Vol. 30. – P. 177–197.
- Masek, J.G. Stability of boreal forest stands during recent climate change: evidence from Landsat satellite imagery / J.G. Masek // *J. of Biogeography*. – 2001. – Vol. 28. – P. 967–976.
- McBratney, A.B. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates / A.B. McBratney // *J. of Soil Science*. – 1986. – No. 37. – P. 617–639.
- Moiseev, P.A. Vegetation Dynamics at treeline ecotone in the Ural Highlands, Russia / P.A. Moiseev, S.G. Shiyatov // *Ecological Studies*. – 2003. – Vol. 167. – P. 423–435.
- Morecroft, M.D. Monitoring of Air Pollution and Climate Change Impacts on Biodiversity / M.D. Morecroft, A.R.J. Sier, D.A. Elston // Final report to Department for Environment, Food and Rural Affairs. Countryside Council for Wales and English Nature (CR0322), 2006. – 78 p.
- Muller, E. Sunusilva. Tree Crown Photos Stierlin H.R. / E. Muller, H.R. Stierlin // Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, 1990. – 129 p.
- Neilson, R.P. A global perspective of regional and hydrologic sensitivities from climate change / R.P. Neilson, D. Marks // *J. of Vegetation Science*. – 1994. – Vol. 5. – P. 715–730.
- Nieminen, T.M. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to a long-term Cu and Ni exposure / T.M. Nieminen // Academic dissertation. Finnish forest research institute. – 2005. – 63 p.
- Oliver, M.A. Kriging : a method of interpolation for geographical information systems / M.A. Oliver, R. Webster // *Geographical information systems*. – 1990. – Vol. 4. – No. 3. – P. 313–332.
- Pfundel, E. Regulating and Possible Function of the Violaxanthin Cycle / E. Pfundel, F. Bilger // *Photosynth. Res.* – 1994. – Vol. 42. – P. 89–109.
- Portable fluorometer PAM-2000 and data acquisition softwear DA-2000. – Germany, 1993. – 53 p.
- Schmid-Haas, P. Monitoring the state of health as a tool for causal research in forest decline / P. Schmid-Haas // IUFRO and ICP – Forest Workshop on Monitoring Air Pollution Impact on Permanent Plots, Data Processing and Results Interpretation. Prachatic, CSFR, 1991. – P. 94–101.
- Scott, J. IKONOS imagery for resource management: Tree cover, impervious surfaces, and riparian buffer analyses in the mid-Atlantic region / J. Scott, S.J. Goetz, R.K. Wright [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 88. – P. 195–208.
- Schavnin, Sergej. Bewertung des Gesundheitszustandes von Föhren – Jungbeständen im immissionsbelasteten Gebiet des Mittel-Urals / Sergej Schavnin, Valeri Sweschnikow, Stanislaw Motchalov // *Schweizerische zeitschrift fur korstwesen: J. Forester Suisse*. – 1995. – No. 10. – S. 829–836.
- Shavnin, S.A. Application of the generalised state index determination to ecological monitoring of forest in polluted areas / S.A. Shavnin, V.V. Fomin, N.W. Marina // *Measurements and Modelling in Environmental Pollution*. – Southampton UK and Boston USA: Computational Mechanics Publications. 1997. – P. 399–407.
- Shavnin, S. The impact of ozone fumigation and fertilization on chlorophyll fluorescence of birch leaves (*Betula pendula*) / S. Shavnin, S. Maurer, R. Matyssek [et al.] // *Trees*. 1999. – Vol. 14. – P. 10–16.
- Schreiber, U. Progress in Chlorophyll Fluorescence Research: Major Developments During the Past Years in Retrospect / U. Schreiber, W. Bilger // *Progress in Botany*. – 1993. – Vol. 54. – P. 151–173.
- Schulze, E.-D. Understanding global change: Lessons learnt from European landscape / E.-D. Schulze // *J. of Vegetation Science*. – 2002. – Vol. 13. – P. 403–412.
- Shiyatov, S.G. The upper timberline dynamics during the last 1100 years in the Polar Ural Mountains / S.G. Shiyatov // *Oscillations of the alpine and polar tree limits in the Holocene*; (ed. by Burkhard Frenzel.). Stuttgart, Jena – New York, Gustav Fischer Verlag. – 1993. – P. 195–203.
- Shiyatov, S.G. Rates of change in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains / S.G. Shiyatov // *Pages News*. – 2003. – Vol. 11. – P. 8–10.
- Schmidt, W. Comparison of Effects of Air Pollutants (SO₂, O₃, NO₂) on Intact Leaves by Measurements of Chlorophyll Fluorescence and P700 Absorbance Changes / W. Schmidt, C. Neubauer, J. Kolbovski [et al.] // *Photosynthesis Research*. – 1990. – Vol. 25. – P. 241–248.
- Snell, J.F.H. Assessment of Stress in Plant by Analysis of Photosynthetic Performance / J.F.H. Snell, van Krooten O., van Hove L.W.A. // *Trends in Analytical Chemistry*. – 1991. – V. 10. – P. 26–30.
- Stein L.H. Automated image analysis as a tool to quantify the color and composition rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* W.) cutlers / L.H. Stein, F. Manne, K. Ruohonene [et al.] // *Acuaculture*. – 2006. – Vol. 261. – P. 695–705.

Shugart, H.H. Detection of vegetation change using reconnaissance imagery / H.H. Shugart, N.H.F. French, E.S. Kasiske // *Global Change Biology*. – 2001. – Vol. 7. – P. 247–252.

Svirezhev, Y.M. A minimal model of interaction between climate and vegetation: qualitative approach / Y.M. Svirezhev, von Bloh W. // *Ecological Modelling*. – 1996. – Vol. 92. – P. 89–99.

Tappeiner, U. Modelling vegetation patterns using natural and anthropogenic influence factors: preliminary experience with a GIS based model applied to an Alpine area / U. Tappeiner, E. Tasser, G. Tappeiner // *Ecological Modelling*. – 1998. – Vol. 113. – P. 225–237.

Yemshanov, D. A spatially explicit stochastic model to simulate boreal forest cover transitions: general structure and properties / D. Yemshanov, A.H. Perera // *Ecological Modelling*. – 2002. – Vol. 150. – P. 189–209.

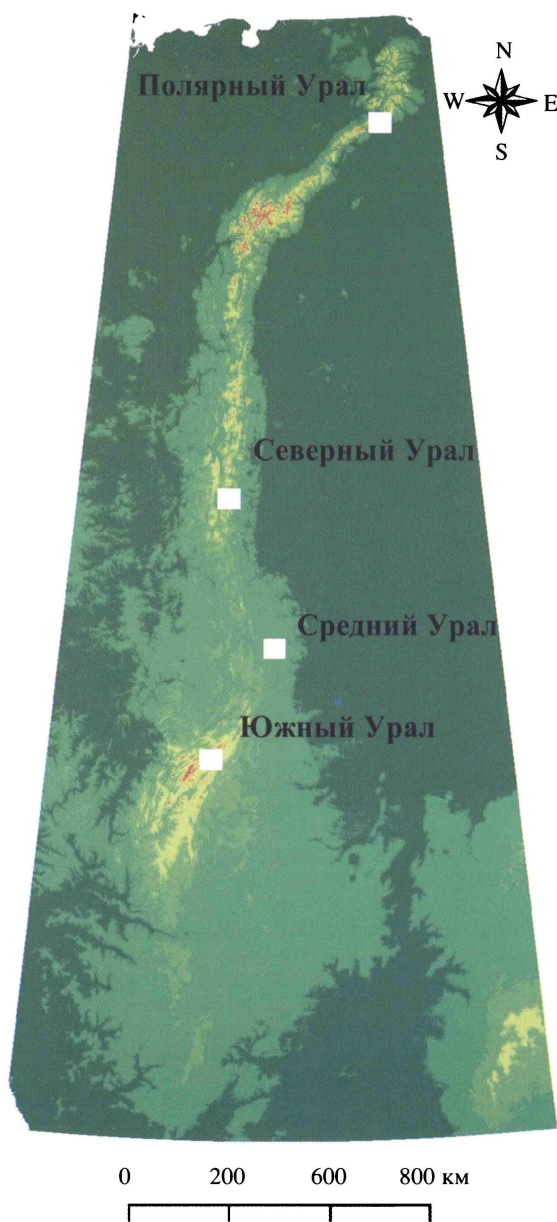
Walter, G.-R. Ecological responses to recent climate change / G.-R. Walter, E. Post, P. Convey // *Nature*. – 2002. – Vol. 416. – P. 389–395.

Walters, R.G. Theoretical assessment of alternative mechanism for non-photochemical quenching of PS2 fluorescence in bare leaves / R.G. Walters, P. Horton // *Photosynth. Res.* 1993. – Vol. 36. – P. 199–139.

Williams, C. Global dimming masks impact of air pollution / C. Williams // *News*. – 2005. May. – P. 7.

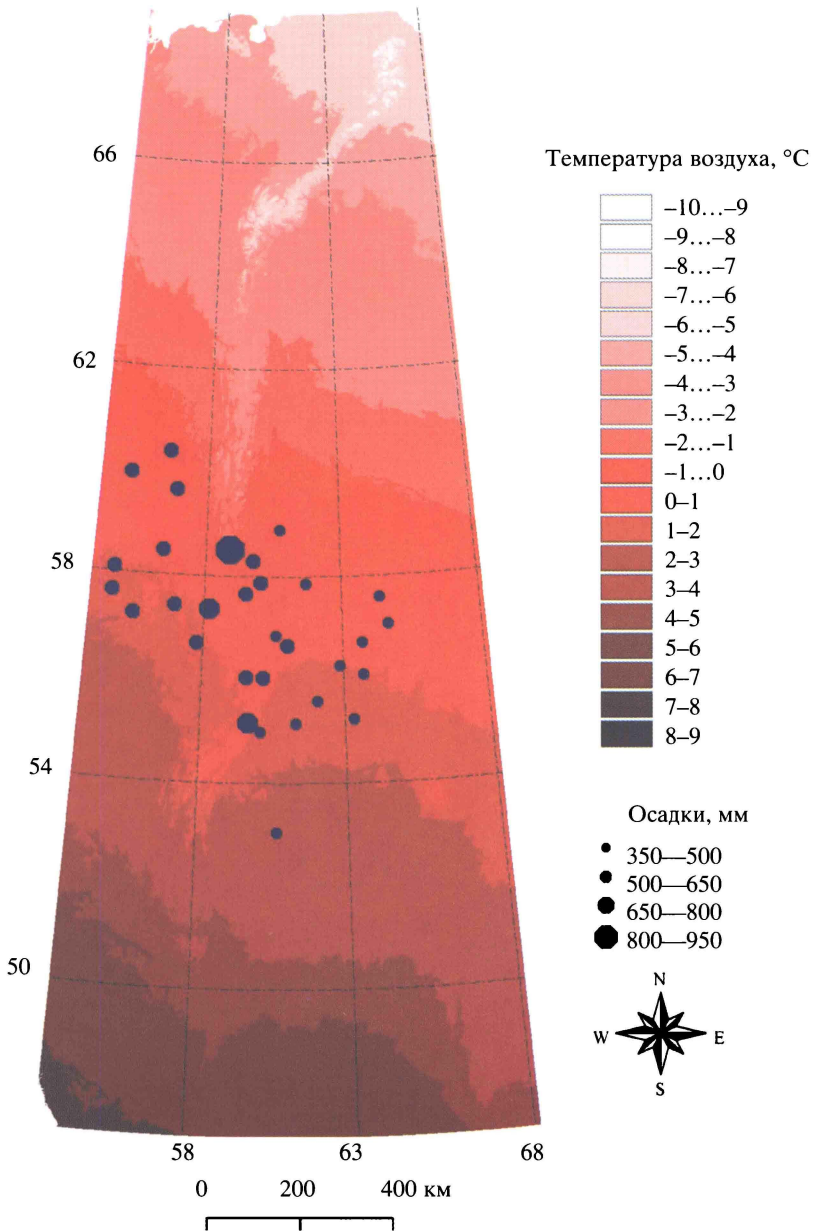
Wu, J. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications / J. Wu, J. David // *Ecological modeling*. – 2002. – Vol. 153. – P. 7–126.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



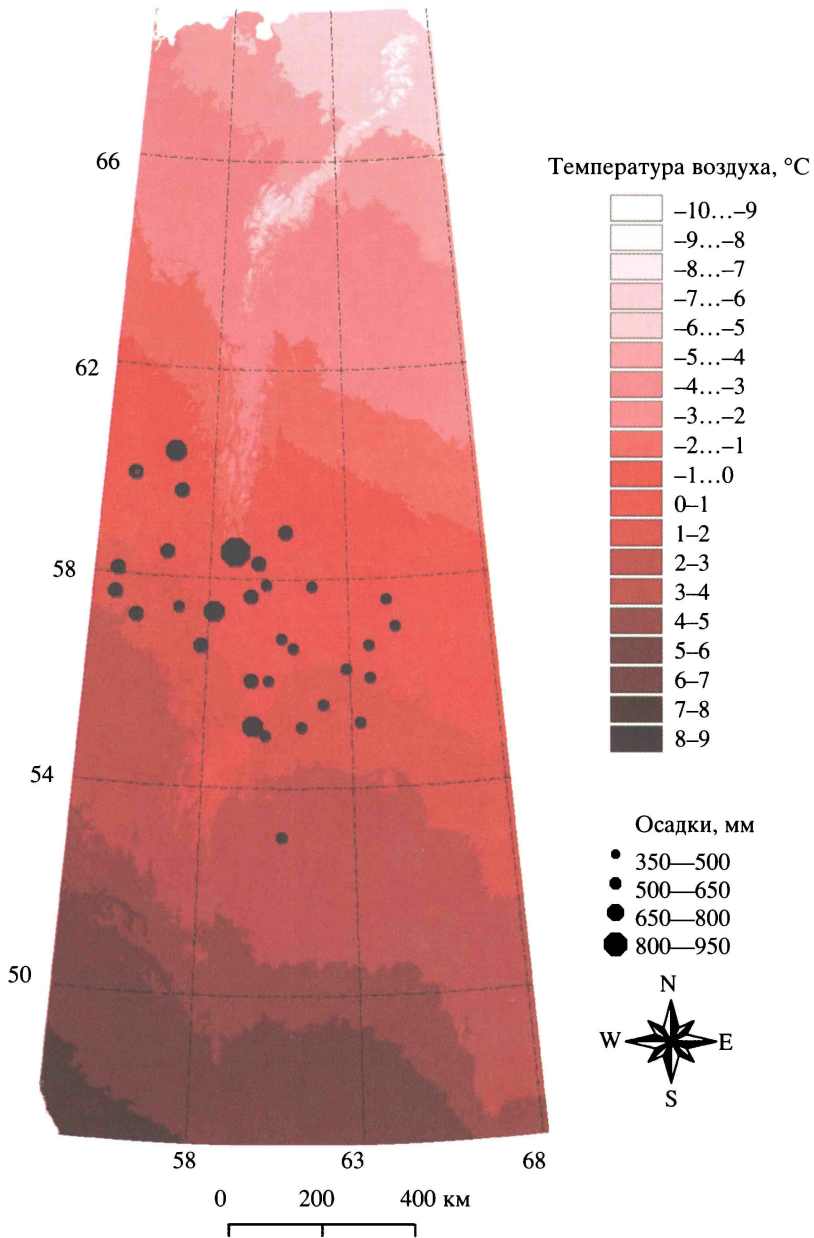
Карта-схема расположения районов исследований пространственно-временной динамики верхней границы леса на Полярном, Северном и Южном Урале и влияния антропогенных факторов на древостои на Среднем Урале

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



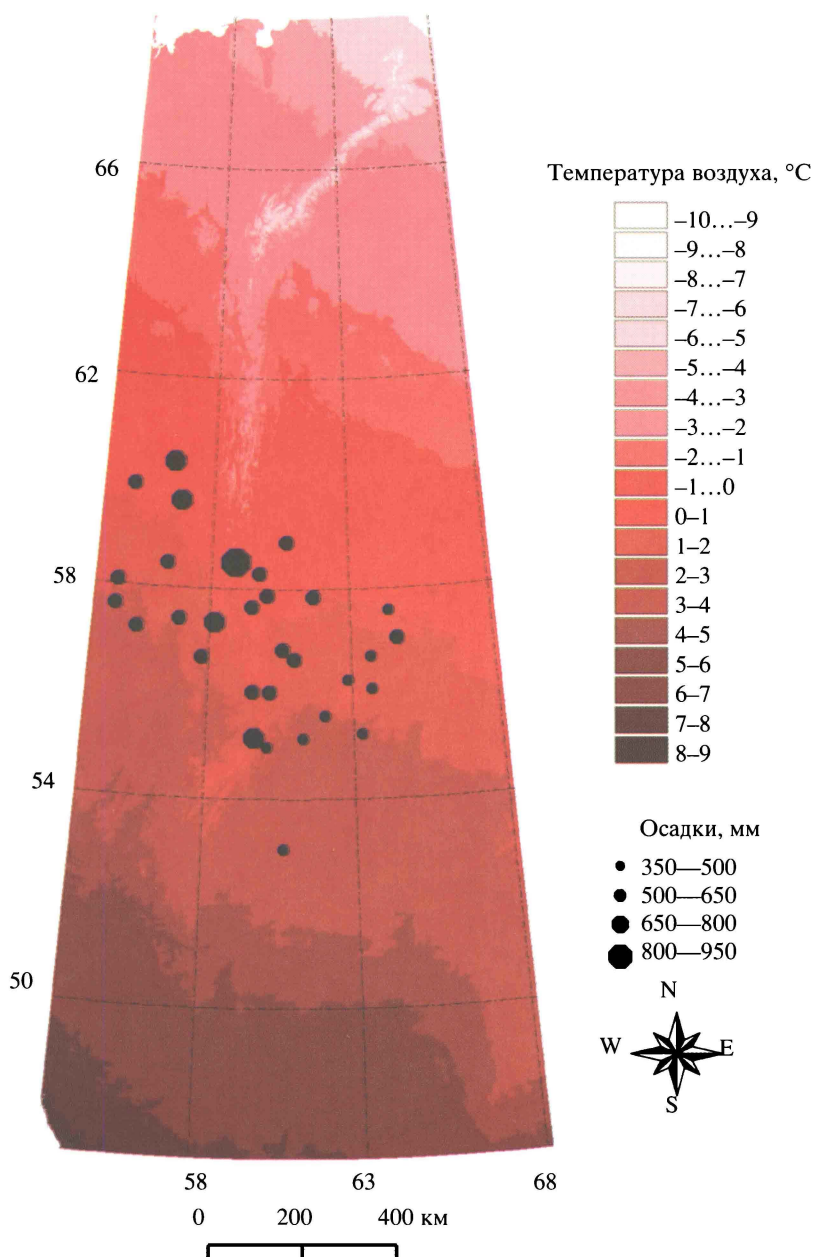
Карта-схема распределения значений среднегодовой температуры воздуха по территории Уральского региона и средних сумм осадков на Северном и Среднем Урале в 1961–1970 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



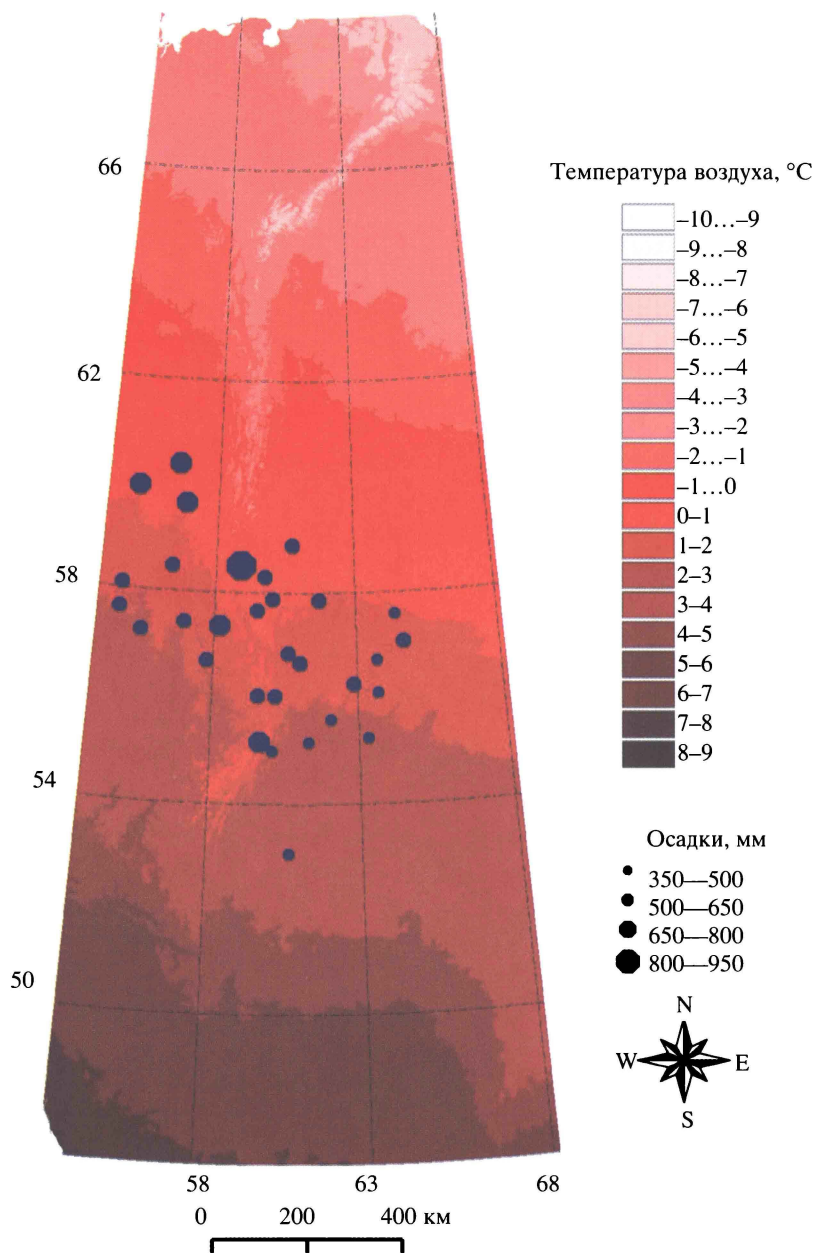
Карта-схема распределения значений среднегодовой температуры воздуха по территории Уральского региона и средних сумм осадков на Северном и Среднем Урале в 1971–1980 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



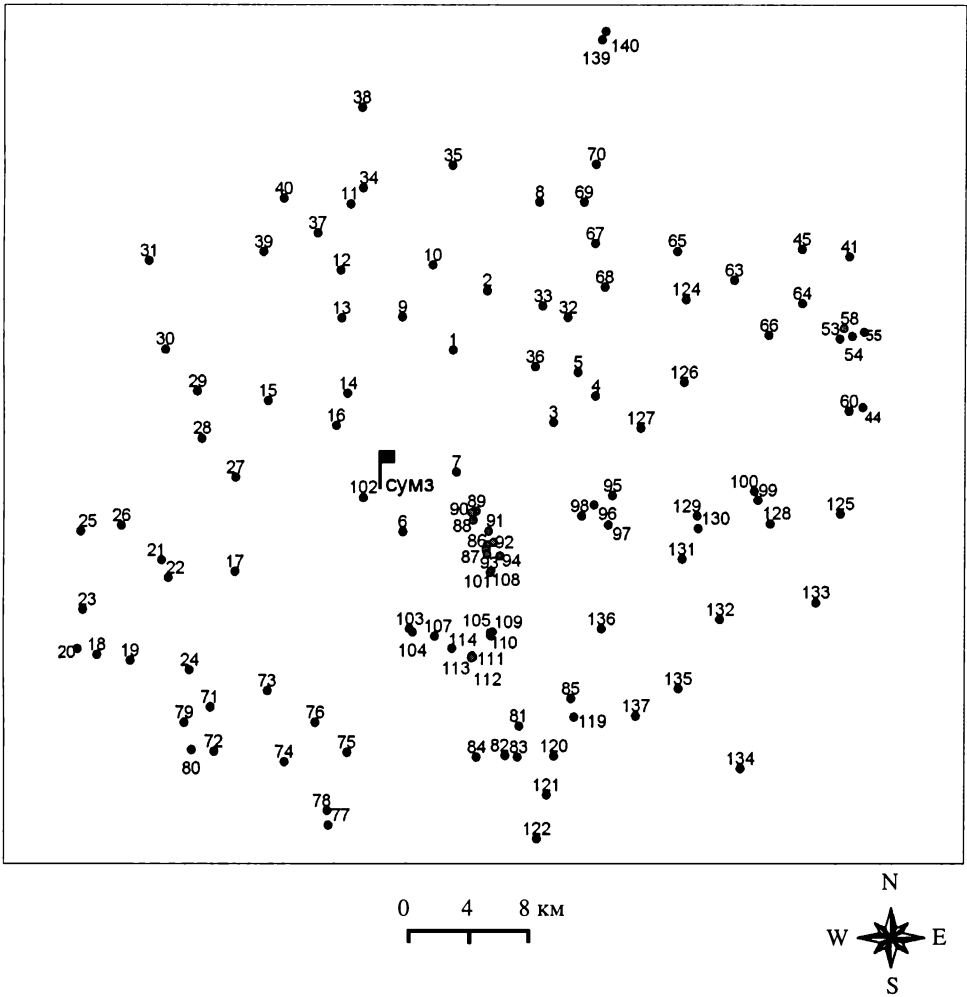
Карта-схема распределения значений среднегодовой температуры воздуха по территории Уральского региона и средних сумм осадков на Северном и Среднем Урале в 1981–1990 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д



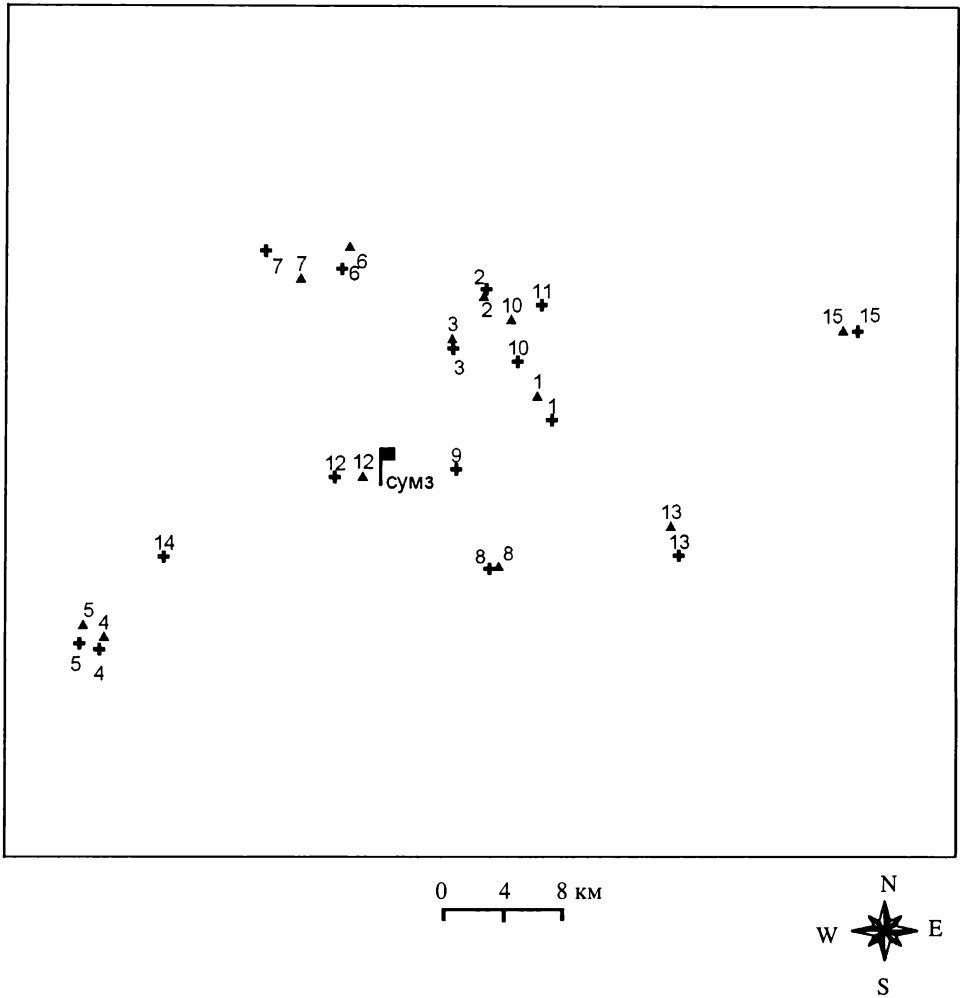
Карта-схема распределения значений среднегодовой температуры воздуха по территории Уральского региона и средних сумм осадков на Северном и Среднем Урале в 1991–2000 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е



Карта-схема расположения 119 временных пробных площадей в районе исследований на Среднем Урале, которые были использованы для проведения экологического зонирования состояния лесов вокруг Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда, Свердловская область)

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



Карта-схема расположения постоянных пробных площадей в районе исследований на Среднем Урале, которые используются для мониторинга состояния лесов вокруг Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда, Свердловская область). Пробные площади, возраст древостоев на которых составляет 20–40 лет, обозначены крестиками, 70–130 лет – треугольниками

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Лесоводственно-таксационные характеристики древостоев временных пробных площадей

Номер ВПП	Возраст, лет	Состав	Тип леса	Направление от СУМЗа, румб	Расстояние от СУМЗа, км	Экспозиция склона	Густота, шт/га	Полнота абсолютная, м ²	Полнота относительная, отн. ед.	Бонитет
1	21	9С1Б	Е р.зм.	СВ	8,5	СЗ	5676	26,01	1,2	I
2	25	9С1Б	Е р.зм.	СВ	12,4	Ю	3913	56,25	1,9	I
3	21	9С1Б	Е-С яг.	СВ	9,7	С	4473	15,87	0,7	II
4	25	7С3Б	Е-С яг.	СВ	12,5	ЮВ	4281	25,10	0,9	I
5	30	7С3Б	Е-С яг.	СВ	12,3	СЗ	3411	21,90	0,8	III
6	37	9С1Б	Е-С тр.	ЮВ	3,1	СЗ	2279	26,24	0,8	II
7	28	10С	Е р.зм.	СВ	4,1	СЗ	1346	3,99	1,8	IV
8	27	10С	Е-С яг.	СВ	18,0	З	2416	23,04	0,9	II
9	18	10С	Е-С яг.	С	9,1	В	3276	17,43	0,8	I
10	27	9С1Е	Е-С яг.	С	12,4	ЮЗ	2645	37,71	1,3	I
11	34	10С	Е р.зм.	СЗ	15,7	ЮВ	2073	31,33	0,9	Ia
12	31	10С	Е тр.	СЗ	12,1	Ю	2526	26,57	0,8	I
13	36	10С	Е-С тр.	СЗ	9,5	СЗ	1724	31,63	0,9	I
14	43	10С	Е-С тр.	СЗ	5,4	В	1928	50,27	1,3	Ia
15	44	10С	Е р.зм.	СЗ	7,8	ЮВ	1529	29,36	0,6	I
16	30	10С	Е-С тр.	СЗ	4,2	СЗ	4556	30,59	1,1	II
17	43	5С5Б	Е-С тр.лп	ЮЗ	10,2	В	1956	29,67	0,9	I
18	20	10С	Е тр.лп.	ЮЗ	18,8	З	2352	18,37	0,8	II
19	15	10С	Е тр.лп.	ЮЗ	17,3	З	1667	15,63	0,8	II
20	28	8С1Б1Ос	Е р.зм.	ЮЗ	18,9	Р	1215	19,81	0,6	Ia
21	24	6С4Е	Е р.зм.	ЮЗ	13,4	ЮЗ	2854	16,83	0,7	I
22	28	9С1Б	Е тр.лп.	ЮЗ	13,5	З	1020	16,28	0,5	Ia
23	31	10С	Е крп.	ЮЗ	18,0	В	1823	20,01	0,7	I
24	25	10С	Е кр.	ЮЗ	15,0	В	6091	30,46	1,1	I
25	26	7С2Б	Е тр.лп.	ЮЗ	17,5	В	2102	21,30	0,7	I
26	16	6С4Б	Е-С тр.	ЮЗ	14,2	Ю	8316	20,96	1,0	II
27	31	9С1Б	Е р.зм.	З	8,5	СЗ	4551	37,78	1,3	II
28	29	7С3Б	Е р.зм.	З	10,0	С	2927	29,71	1,1	II
29	31	9С1Б	Е прч.	СЗ	11,2	СЗ	2862	42,43	1,4	I
30	33	10С	Е-С тр.	СЗ	14,6	СЗ	3891	33,13	1,1	II
31	43	9С1Б	Е-С тр.	СЗ	18,5	СЗ	1729	37,75	1,0	I
32	31	10С	Е-С яг.	СВ	13,5	В	3207	41,22	1,4	I
33	22	10С	Е-С яг.	СВ	13,2	Ю	5727	30,38	1,2	II
34	31	10С	Е-С тр.	СЗ	16,0	СЗ	3252	47,47	1,5	I
35	26	10С	Е-С тр.	С	17,0	Ю	3395	36,84	1,3	I
36	38	10С	Е крп.	СВ	10,6	С	2719	41,85	1,2	I
37	21	10С	Е-С тр.	СЗ	14,5	СВ	4942	13,00	1,0	I
38	29	10С	Е-С тр.	СЗ	21,0	Р	1866	22,25	0,8	I
39	22	10С	Е-С тр.	СЗ	14,5	Р	4161	32,20	1,3	I

Продолжение приложения 3

Но- мер ВПП	Воз- раст, лет	Состав	Тип леса	Направ- ление от СУМЗа, румб	Расстоя- ние от СУМЗа, км	Экспози- ция склона	Густота, шт/га	Полнота абсолют- ная, м ²	Полнота относи- тельная, отн. ед.	Бонитет
40	31	10С	Е-С тр.	СЗ	16,7	В	1922	39,53	1,2	Ia
41	30	9С1Б	С яг.	СВ	29,4	Ю	8000	28,56	1,1	III
42	20	10С	С яг.	СВ	27,5	З	32 727	27,88	1,4	IV
43	21	10С	С орл.	СВ	26,1	СВ	15 955	32,98	1,5	II
44	38	10С	С яг.	СВ	28,0	ЮЗ	4575	34,19	1,1	II
45	17	10С	С ртр.	СВ	26,4	СВ	4533	9,85	0,5	II
46	16	10С	С орл.	СВ	38,0	Р	10 333	22,34	1,0	II
47	30	10С	С бр.	СВ	28,2	Ю	55 000	30,55	1,4	IV
48	16	9С1Б	С яг.	СВ	28,1	Р	16 486	18,66	0,9	III
49	27	9С1Б	С бр.	СВ	30,6	СВ	26 500	20,61	1,0	IV
50	19	9С1Лц	С ртр.	СВ	27,0	Р	24 500	25,86	1,3	III
51	53	9С1Б	С бр.	СВ	26,1	В	12 192	26,23	1,1	V
52	45	10С	С бр.	СВ	26,7	СВ	23 667	33,50	1,4	V
53	25	9С1Лц	С ртр.	СВ	26,6	Р	2120	17,18	0,8	III
54	28	8С2Лц	С тр.лп.	СВ	27,0	С	6150	23,80	1,0	II
55	21	8С2Лц	С тр.лп.	СВ	28,0	С	3118	16,64	0,8	I
56	49	10С	С бр.	СВ	28,1	ЮВ	20 772	37,94	1,6	V
57	53	10С	С яг.	СВ	28,0	ЮВ	16 050	39,30	1,6	IV
58	26	7С1Лц	С яг.лп.	СВ	26,9	СВ	1794	16,74	0,6	III
59	16	9С1Б	С яг.	СВ	27,2	Ю	12 179	9,35	0,5	IV
60	44	10С	С яг.	СВ	27,0	З	4400	30,60	1,0	III
61	32	10С	С кс.сф.	СВ	24,0	Р	12 083	6,51	0,4	Va
62	45	7С1Лц	С бр.	СВ	27,1	Ю	23 566	21,22	1,1	5a
63	25	6С3Е	С тр.лп.	СВ	22,5	С	5600	23,80	0,9	II
64	18	8С1Б1Лц	Е-С яг.	СВ	25,2	Ю	5357	4,59	0,3	IV
65	15	10С	С яг.	СВ	20,7	С	4000	11,62	0,6	II
66	19	9С1Лц	С орл.	СВ	22,6	Р	3885	15,35	0,6	I
67	13	9С1Б	Е-С яг.	СВ	17,6	ЮЗ	2420	3,48	0,6	III
68	16	9С1Б	Е-С яг.	СВ	16,1	ЮЗ	7500	16,92	0,8	II
69	20	9С1Лц	Е тр.лп.	СВ	18,8	Р	3733	17,41	0,7	I
70	16	9С1Б	Е-С яг.	СВ	20,8	ЮВ	3917	8,45	0,4	II
71	27	5С4Б1П	Е тр.лп.	ЮЗ	15,7	СВ	3800	29,21	1,0	Ia
72	26	7С3Б	Е тр.лп.	ЮЗ	17,7	В	3687	29,21	1,0	I
73	21	9С1Б	Е-С тр.	ЮЗ	13,4	Р	7786	40,39	1,6	I
74	26	5Б4С1Е	Е прч.	ЮЗ	16,5	В	2206	18,71	0,6	I
75	34	9С1Б	Е-С тр.	Ю	15,4	Р	3103	39,20	1,1	II
76	32	7С2Б1Лц	Е-С тр.	ЮЗ	13,5	Р	3065	24,93	1,0	II
77	25	4С4Б1Е1Лц	Е-С яг.	Ю	19,9	Р	5400	18,68	0,8	III
78	33	8С2Б	Е-С яг.	Ю	18,6	Р	2810	3618	1,2	I
79	20	5С4Б	Е тр.лп.	ЮЗ	17,5	З	4170	19,99	0,8	I
80	27	5С2Б2Е1П	Е тр.лп.	ЮЗ	18,5	В	1693	12,37	0,4	II
81	27	10С	Е р.зм.	ЮВ	14,5	В	5388	36,35	1,3	I
82	24	10С	Е тр.лп.	ЮВ	16,7	В	1632	19,67	0,7	Ia
83	25	10С	Е р.зм.	ЮВ	17,0	В	4667	38,45	1,4	I

Номер ВПП	Возраст, лет	Состав	Тип леса	Направление от СУМЗа, румб	Расстояние от СУМЗа, км	Экспозиция склона	Густота, шт/га	Полнота абсолютная, м ²	Полнота относительная, отн. ед.	Бонитет
84	24	10С	Е-С яг.	ЮВ	16,3	Р	2772	23,59	0,9	I
85	29	10С	Е-С яг.	ЮВ	16,0	С	3679	31,12	1,1	I
86	40	9С1Б	Е р.зм.	ЮВ	6,7	Ю	1358	19,50	0,6	I
87	35	9С1Б	Е-С тр.	ЮВ	7,1	Ю	3650	21,65	0,7	II
88	39	10С	Е-С тр.	ЮВ	5,6	Ю	1263	15,12	0,5	III
89	41	10С	Е хв.мш.	ЮВ	5,3	ЮВ	1101	17,55	0,6	II
90	37	10С	Е хв.мш.	ЮВ	5,2	Ю	1217	18,71	0,5	Ia
91	34	10С	Е-С яг.	ЮВ	6,5	Р	1005	14,00	0,5	II
92	40	10С	Е-С яг.	ЮВ	6,9	Ю	1041	14,50	0,5	II
93	34	10С	Е прч.	ЮВ	7,1	Р	1672	20,85	0,7	II
94	30	10С	Е прч.	ЮВ	7,8	Р	2575	27,70	0,9	I
95	44	10С	Е-С яг.	В	13,0	В	2675	16,91	0,6	II
96	31	10С	Е р.зм.	В	11,7	Р	2525	13,30	0,4	I
97	27	10С	Е-С тр.	В	12,6	Ю	2000	15,20	0,5	I
99	37	10С	С ртр.	В	20,9	Р	1250	14,67	0,4	I
100	39	10С	С ртр.	В	20,5	Р	1065	16,20	0,6	III
101	16	10С	Е-С тр.	ЮВ	7,3	З	3410	16,93	0,8	I
102	17	7С3Б	Е р.зм.	ЮЗ	1,7	Р	1849	3,40	0,2	III
103	36	9С1Е	Е-С яг.	Ю	8,8	З	3258	49,39	1,4	Ia
104	36	10С	Е-С яг.	Ю	9,0	Р	3632	53,87	1,6	Ia
105	18	10С	Е р.зм.	ЮВ	10,6	Р	3048	29,26	1,1	Ia
106	21	10С	С яг.	ЮВ	9,1	ЮВ	19 340	28,64	1,3	III
107	25	10С	С яг.	ЮВ	8,9	ЮВ	8500	35,59	1,4	II
108	17	6С2Ос2Б	Е-С яг.	ЮВ	7,3	В	6068	22,35	1,0	I
109	19	10С	Е р.зм.	ЮВ	10,7	Р	4268	36,62	1,4	Ia
110	17	10С	Е прч.	ЮВ	10,8	Р	4354	32,24	1,5	II
111	29	10С	Е-С яг.	ЮВ	10,7	Р	4003	43,71	1,3	Ia
112	29	10С	Е-С яг.	ЮВ	11,0	Р	4102	39,67	1,2	Ia
113	30	9С1Б	Е-С яг.	ЮВ	11,0	Р	4050	34,90	1,0	Ia
114	40	9С1Б	Е-С яг.	ЮВ	10,1	Р	1005	20,88	0,6	Ia
115	17	10С	С яг.	ЮВ	75,0	Ю	14 409	41,19	1,9	I
116	18	10С	С яг.	ЮВ	75,0	Ю	13 167	41,05	1,8	I
117	16	10С	С яг.	ЮВ	75,0	Ю	16 571	36,02	1,7	III
118	18	10С	Е-С яг.	ЮВ	8,0	ЮВ	11 600	34,76	1,5	II
119	29	8С2Лц	Е р.зм.	ЮВ	16,8	В	2400	25,84	0,8	II
120	28	9С1Б	Е тр.лп.	ЮВ	18,2	Р	3720	24,83	0,9	II
121	31	6С4Б	Е тр.лп.	ЮВ	19,9	Р	3956	36,13	1,2	I
122	23	9С1Б	Е-С ос.лп.	ЮВ	21,6	В	2433	18,28	0,8	II
123	29	10С	Е тр.лп.	ЮВ	21,7	В	12542	46,07	1,8	III
124	16	8С2Б	С яг.	СВ	19,7	СВ	7220	23,9	1,1	I
125	42	10С	Е-С тр.	В	25,7	Ю	3456	38,92	1,3	II
126	38	8С2Б	С ртр.	СВ	17,2	СВ	1650	25,92	0,7	Ia
127	35	9С1Б	С ртр.	СВ	14,5	Р	3122	28,63	1,0	II
128	43	9С1Б	С ртр.	В	21,3	ЮЗ	2650	24,91	0,8	II

Окончание приложения 3

Номер ВПП	Возраст, лет	Состав	Тип леса	Направление от СУМЗа, румб	Расстояние от СУМЗа, км	Экспозиция склона	Густота, шт/га	Полнота абсолютная, м ²	Полнота относительная, отн. ед.	Бонитет
129	38	10С	С ртр.	В	17,5	ЮВ	2400	26,48	0,8	I
130	40	9С1Б	С ртр.	В	17,7	Р	2090	37,36	1,1	I
131	25	8С2Б	С ртр.	ЮВ	17,2	Р	2400	20,68	0,7	I
132	33	7С2Б	С яг.	ЮВ	20,6	ЮЗ	1792	33,12	1,0	I
133	48	10С	С яг.	ЮВ	25,3	Р	5920	59,56	1,9	III
134	16	7С2Б	Е-С тр.	ЮВ	25,3	СЗ	6380	12,66	0,6	II
135	37	10С	Е-С ос.лп.	ЮВ	20,1	Р	2420	39,28	1,1	I
136	36	8С2Б	Е-С ос.лп.	ЮВ	15,2	З	3520	62,22	1,8	Ia
137	33	10С	Е-С яг.	ЮВ	19,4	Р	4211	56,94	1,9	I
138	30	8С2Е	Е-С тр.	ЮЗ	90,0	Р	3862	52,23	1,8	I
139	26	9С1Б	Е-С яг.	СВ	28,0	Р	3163	30,34	1,0	Ia
140	22	8С2Б	Е-С яг.	СВ	28,5	Р	3383	25,25	0,9	I

ПРИЛОЖЕНИЕ И

**Морфометрические и физиологические характеристики древостоев временных пробных площадей
(в числителе – средние значения, в знаменателе – стандартные отклонения)**

№ ВПП	Диаметр, см	Высота, м	Zd5, см	Zd10, см	Zh5, м	Zh10, м	Хл. а	Хл. б	Каротиноиды	КЭ, отн. ед.	№ кон.
							мг/г				
1	<u>8,0</u>	<u>8,48</u>	<u>0,87</u>	<u>2,00</u>	<u>2,11</u>	<u>4,46</u>	<u>2,140</u>	<u>0,664</u>	<u>0,809</u>	<u>0,734</u>	1
	0,6	0,60	0,48	0,67	0,15	0,36	0,409	0,127	0,541	0,019	
2	<u>13,0</u>	<u>11,43</u>	<u>0,40</u>	<u>1,07</u>	<u>2,17</u>	<u>4,83</u>	<u>2,946</u>	<u>0,974</u>	<u>0,893</u>	<u>0,723</u>	1
	0,7	0,19	0,17	0,35	0,56	0,31	0,329	0,130	0,101	0,026	
3	<u>7,0</u>	<u>7,49</u>	<u>0,64</u>	<u>1,67</u>	<u>2,20</u>	<u>3,79</u>	<u>2,056</u>	<u>0,650</u>	<u>0,681</u>	<u>0,727</u>	1
	0,3	0,63	0,17	0,34	0,11	0,22	0,259	0,099	0,080	0,017	
4	<u>7,9</u>	<u>10,09</u>	<u>0,37</u>	<u>0,90</u>	<u>1,67</u>	<u>3,71</u>	<u>2,505</u>	<u>0,862</u>	<u>0,951</u>	<u>0,717</u>	1
	0,6	0,90	0,16	0,27	0,24	0,37	0,369	0,134	0,229	0,018	
5	<u>10,0</u>	<u>11,47</u>	<u>0,49</u>	<u>1,15</u>	<u>1,59</u>	<u>2,82</u>	<u>2,627</u>	<u>0,887</u>	<u>0,863</u>	<u>0,682</u>	5
	0,7	0,52	0,19	0,35	0,25	0,85	0,250	0,084	0,076	0,022	
6	<u>12,8</u>	<u>16,31</u>	<u>0,43</u>	<u>0,85</u>	<u>1,45</u>	<u>2,57</u>	<u>2,084</u>	<u>0,689</u>	<u>0,646</u>	<u>0,669</u>	4
	0,8	0,48	0,3	0,52	0,07	0,26	0,428	0,156	0,114	0,027	
7	<u>6,0</u>	<u>5,93</u>	<u>0,41</u>	<u>0,90</u>	<u>1,29</u>	<u>2,35</u>	<u>1,205</u>	<u>0,383</u>	<u>0,433</u>	<u>0,705</u>	1
	0,6	0,62	0,14	0,30	0,19	0,38	0,240	0,079	0,069	0,042	
8	<u>11,2</u>	<u>9,51</u>	<u>0,83</u>	<u>1,88</u>	<u>2,39</u>	<u>4,94</u>	<u>2,330</u>	<u>0,758</u>	<u>0,729</u>	<u>0,721</u>	1
	0,4	0,51	0,22	0,38	0,35	0,30	0,440	0,570	0,127	0,024	
9	<u>8,2</u>	<u>7,40</u>	<u>0,59</u>	<u>1,73</u>	<u>2,64</u>	<u>5,38</u>	<u>2,640</u>	<u>0,887</u>	<u>0,851</u>	<u>0,707</u>	1
	0,4	0,74	0,21	0,45	0,48	0,49	0,367	0,157	0,125	0,025	
10	<u>13,8</u>	<u>11,41</u>	<u>1,00</u>	<u>2,19</u>	<u>2,67</u>	<u>5,49</u>	<u>2,416</u>	<u>0,816</u>	<u>0,773</u>	<u>0,717</u>	1
	0,6	1,08	0,20	0,35	0,33	0,64	0,277	0,124	0,085	0,020	
11	<u>13,3</u>	<u>15,51</u>	<u>0,37</u>	<u>0,79</u>	<u>2,02</u>	<u>4,23</u>	<u>2,622</u>	<u>0,909</u>	<u>0,841</u>	<u>0,655</u>	5
	0,6	1,05	0,18	0,31	0,27	0,69	0,137	0,031	0,040	0,018	
12	<u>11,4</u>	<u>13,67</u>	<u>0,53</u>	<u>1,08</u>	<u>2,03</u>	<u>4,69</u>	<u>2,684</u>	<u>0,942</u>	<u>0,858</u>	<u>0,669</u>	5
	0,7	0,14	0,27	0,42	0,09	0,06	0,343	0,142	0,116	0,029	
13	<u>15,2</u>	<u>15,76</u>	<u>0,42</u>	<u>0,96</u>	<u>2,47</u>	<u>4,86</u>	<u>2,814</u>	<u>0,963</u>	<u>0,957</u>	<u>0,707</u>	1
	0,3	0,68	0,18	0,33	0,52	2,21	0,303	0,121	0,111	0,024	
14	<u>18,1</u>	<u>18,52</u>	<u>0,65</u>	<u>1,36</u>	<u>1,63</u>	<u>3,81</u>	-	-	-	-	-
	0,5	0,91	0,34	0,46	0,18	0,14					
15	<u>13,8</u>	<u>17,78</u>	<u>0,24</u>	<u>0,54</u>	<u>1,48</u>	<u>3,12</u>	<u>2,358</u>	<u>0,761</u>	<u>0,809</u>	<u>0,666</u>	1
	0,5	1,12	0,10	0,17	0,27	0,56	0,190	0,088	0,066	0,084	
16	<u>8,7</u>	<u>10,07</u>	<u>0,41</u>	<u>0,99</u>	<u>1,45</u>	<u>3,57</u>	<u>2,320</u>	<u>0,778</u>	<u>0,776</u>	<u>0,683</u>	1
	0,4	0,37	0,13	0,22	0,43	1,05	0,255	1,103	0,070	0,036	
17	<u>19,1</u>	<u>15,62</u>	<u>0,84</u>	<u>1,68</u>	<u>1,95</u>	<u>4,08</u>	<u>2,293</u>	<u>0,787</u>	<u>0,797</u>	<u>0,711</u>	1
	4,9	0,86	0,34	0,65	0,12	0,36	0,327	0,130	0,110	0,031	
18	<u>9,9</u>	<u>7,59</u>	<u>1,69</u>	<u>3,57</u>	<u>3,11</u>	<u>5,81</u>	<u>2,095</u>	<u>0,671</u>	<u>0,675</u>	<u>0,726</u>	1
	1,6	1,09	0,41	0,67	0,35	0,59	0,360	0,149	0,112	0,027	
19	<u>8,5</u>	<u>5,24</u>	<u>2,03</u>	<u>3,61</u>	<u>2,77</u>	<u>4,44</u>	<u>2,188</u>	<u>0,722</u>	<u>0,712</u>	<u>0,707</u>	1
	0,4	0,27	0,30	0,32	0,27	0,29	0,334	0,119	0,114	0,062	
20	<u>16,2</u>	<u>12,97</u>	<u>0,87</u>	<u>2,09</u>	<u>2,55</u>	<u>5,44</u>	<u>2,332</u>	<u>0,768</u>	<u>0,806</u>	<u>0,722</u>	1
	0,8	0,36	0,29	0,53	0,20	0,46	0,352	0,116	0,091	0,033	
21	<u>11,5</u>	<u>9,24</u>	<u>1,21</u>	<u>2,54</u>	<u>2,64</u>	<u>5,20</u>	<u>2,345</u>	<u>0,772</u>	<u>0,781</u>	<u>0,729</u>	1
	1,0	0,93	0,30	0,56	0,33	0,63	0,302	0,109	0,078	0,021	

Продолжение приложения И

№ ВПП	Диаметр, см	Высота, м	Zd5, см	Zd10, см	Zh5, м	Zh10, м	Хл. а	Хл. б	Кароти- ноиды	КЭ, отн. ед.	№ кон.
							мг/г				
22	<u>13,0</u>	<u>13,11</u>	<u>0,34</u>	<u>0,90</u>	<u>2,37</u>	<u>5,09</u>	<u>2,923</u>	<u>1,000</u>	<u>0,930</u>	<u>0,678</u>	5
	1,2	0,84	0,19	0,37	0,08	0,18	0,400	0,150	0,115	0,029	
23	<u>10,7</u>	<u>12,05</u>	<u>0,34</u>	<u>1,07</u>	<u>2,06</u>	<u>4,39</u>	<u>2,709</u>	<u>0,936</u>	<u>0,871</u>	<u>0,675</u>	5
	0,8	0,82	0,16	0,37	0,29	0,39	0,902	0,320	0,281	0,028	
24	<u>8,0</u>	<u>9,83</u>	<u>0,52</u>	<u>1,17</u>	<u>2,22</u>	<u>4,38</u>	<u>1,945</u>	<u>0,630</u>	<u>0,774</u>	<u>0,715</u>	1
	0,5	0,44	0,15	0,28	0,07	0,14	0,293	0,117	0,419	0,015	
25	<u>13,9</u>	<u>11,52</u>	<u>0,95</u>	<u>2,15</u>	<u>2,65</u>	<u>5,43</u>	<u>2,545</u>	<u>0,873</u>	<u>0,796</u>	<u>0,721</u>	1
	1,1	0,29	0,29	0,48	0,15	0,21	0,329	0,145	0,104	0,030	
26	<u>6,1</u>	<u>5,44</u>	<u>1,11</u>	<u>2,30</u>	<u>2,78</u>	<u>4,65</u>	<u>2,225</u>	<u>0,731</u>	<u>0,735</u>	<u>0,72</u>	1
	0,4	0,40	0,22	0,24	0,28	0,41	0,310	0,106	0,110	0,025	
27	<u>11,1</u>	<u>11,63</u>	<u>0,49</u>	<u>0,98</u>	<u>1,94</u>	<u>3,66</u>	<u>2,164</u>	<u>0,692</u>	<u>0,866</u>	<u>0,720</u>	1
	0,5	0,34	0,15	0,38	0,22	0,23	0,493	0,176	0,094	0,021	
28	<u>13,8</u>	<u>10,43</u>	<u>0,71</u>	<u>1,69</u>	<u>2,46</u>	<u>4,97</u>	<u>2,465</u>	<u>0,820</u>	<u>0,888</u>	<u>0,729</u>	1
	0,7	0,59	0,25	0,41	0,08	0,28	0,311	0,111	0,115	0,036	
29	<u>13,4</u>	<u>12,73</u>	<u>0,45</u>	<u>1,13</u>	<u>2,21</u>	<u>4,74</u>	<u>2,379</u>	<u>0,823</u>	<u>0,813</u>	<u>0,690</u>	1
	0,5	0,57	0,20	0,35	1,49	2,18	0,269	0,120	0,092	0,049	
30	<u>10,2</u>	<u>12,16</u>	<u>0,57</u>	<u>1,25</u>	<u>1,76</u>	<u>3,46</u>	<u>2,229</u>	<u>0,777</u>	<u>0,784</u>	<u>0,708</u>	1
	0,6	0,58	0,20	0,35	0,07	0,35	0,376	0,149	0,126	0,022	
31	<u>16,6</u>	<u>18,14</u>	<u>0,34</u>	<u>0,73</u>	<u>1,71</u>	<u>3,84</u>	<u>2,184</u>	<u>0,676</u>	<u>0,711</u>	<u>0,710</u>	5
	0,5	1,05	0,16	0,27	0,24	0,44	0,238	0,088	0,070	0,013	
32	<u>12,7</u>	<u>11,79</u>	<u>0,39</u>	<u>1,01</u>	<u>2,19</u>	<u>4,92</u>	<u>2,612</u>	<u>0,924</u>	<u>0,906</u>	<u>0,695</u>	1
	0,4	0,41	0,16	0,34	0,25	0,66	0,168	0,079	0,191	0,037	
33	<u>8,3</u>	<u>8,05</u>	<u>0,56</u>	<u>1,73</u>	<u>2,20</u>	<u>5,08</u>	<u>1,907</u>	<u>0,596</u>	<u>0,626</u>	<u>0,738</u>	1
	0,2	0,86	0,24	0,50	0,13	0,41	0,459	0,140	0,152	0,016	
34	<u>13,8</u>	<u>13,72</u>	<u>0,47</u>	<u>1,06</u>	<u>1,99</u>	<u>4,67</u>	-	-	-	-	-
	0,7	0,51	0,19	0,33	0,26	0,39	-	-	-	-	
35	<u>12,0</u>	<u>10,85</u>	<u>0,57</u>	<u>1,34</u>	<u>2,22</u>	<u>4,76</u>	<u>1,991</u>	<u>0,726</u>	<u>0,770</u>	<u>0,679</u>	2
	0,5	0,07	0,16	0,30	0,16	0,25	0,264	0,109	0,099	0,038	
36	<u>14,0</u>	<u>16,11</u>	<u>0,33</u>	<u>0,76</u>	<u>1,82</u>	<u>3,88</u>	<u>2,782</u>	<u>0,999</u>	<u>0,919</u>	<u>0,702</u>	1
	0,4	1,18	0,16	0,23	0,13	0,12	0,287	0,125	0,104	0,034	
37	<u>9,3</u>	<u>8,67</u>	<u>0,60</u>	<u>1,68</u>	<u>2,44</u>	<u>5,16</u>	<u>2,040</u>	<u>0,858</u>	<u>0,737</u>	<u>0,671</u>	2
	0,5	0,42	0,27	0,65	0,17	0,42	0,308	0,156	0,116	0,031	
38	<u>12,6</u>	<u>11,35</u>	<u>0,56</u>	<u>1,45</u>	<u>2,07</u>	<u>4,46</u>	<u>2,099</u>	<u>0,756</u>	<u>0,817</u>	<u>0,685</u>	2
	0,5	1,25	0,21	0,45	0,43	0,68	0,257	0,106	0,089	0,027	
39	<u>10,0</u>	<u>8,13</u>	<u>1,03</u>	<u>1,39</u>	<u>2,32</u>	<u>4,92</u>	<u>2,356</u>	<u>0,834</u>	<u>0,885</u>	<u>0,718</u>	2
	0,2	0,41	0,32	0,25	0,13	0,09	0,259	0,101	0,080	0,027	
40	<u>16,3</u>	<u>15,55</u>	<u>0,57</u>	<u>1,20</u>	<u>2,24</u>	<u>4,79</u>	<u>2,279</u>	<u>0,825</u>	<u>0,795</u>	<u>0,689</u>	2
	0,7	0,67	0,20	0,36	0,05	0,33	0,265	0,104	0,081	0,025	
41	<u>6,5</u>	<u>9,12</u>	<u>0,36</u>	<u>0,86</u>	<u>1,93</u>	<u>4,25</u>	-	-	-	-	-
	0,5	1,19	0,11	0,21	0,12	0,27	-	-	-	-	
42	<u>3,2</u>	<u>4,24</u>	<u>0,32</u>	<u>0,85</u>	<u>1,73</u>	<u>3,64</u>	<u>1,856</u>	<u>0,715</u>	<u>0,769</u>	<u>0,663</u>	3
	0,2	1,74	0,09	0,16	0,10	0,14	0,290	0,136	0,105	0,039	
43	<u>5,4</u>	<u>6,60</u>	<u>0,45</u>	<u>1,37</u>	<u>1,75</u>	<u>4,19</u>	<u>1,843</u>	<u>0,720</u>	<u>0,770</u>	<u>0,661</u>	3
	0,5	0,55	0,12	0,26	0,43	0,23	0,277	0,142	0,099	0,039	
44	<u>9,7</u>	<u>12,38</u>	<u>0,39</u>	<u>0,81</u>	<u>1,31</u>	<u>3,03</u>	<u>1,746</u>	<u>0,629</u>	<u>0,717</u>	<u>0,668</u>	3
	0,4	1,49	0,12	0,20	0,26	0,45	0,197	0,099	0,057	0,028	

Продолжение приложения И

№ ВПП	Диаметр, см	Высота, м	Zd5, см	Zd10, см	Zh5, м	Zh10, м	Хл. а	Хл. б	Каротиноиды	КЭ, отн. ед.	№ кон.
							мг/г				
45	<u>5,6</u>	<u>4,94</u>	<u>1,21</u>	<u>2,09</u>	<u>2,35</u>	<u>4,25</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,6</u>	<u>0,41</u>	<u>0,52</u>	<u>0,33</u>	<u>0,18</u>	<u>0,30</u>	-	-	-	-	-
46	<u>5,0</u>	<u>5,77</u>	<u>0,63</u>	<u>1,70</u>	<u>2,37</u>	<u>4,69</u>	<u>1,770</u>	<u>0,667</u>	<u>0,715</u>	<u>0,629</u>	3
	<u>0,6</u>	<u>0,48</u>	<u>0,19</u>	<u>0,34</u>	<u>0,32</u>	<u>0,41</u>	<u>0,297</u>	<u>0,111</u>	<u>0,104</u>	<u>0,052</u>	
47	<u>2,6</u>	<u>5,62</u>	<u>0,15</u>	<u>0,39</u>	<u>1,24</u>	<u>2,71</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,2</u>	<u>0,26</u>	<u>0,06</u>	<u>0,11</u>	<u>0,14</u>	<u>0,44</u>	-	-	-	-	-
48	<u>4,0</u>	<u>4,57</u>	<u>0,70</u>	<u>1,37</u>	<u>1,98</u>	<u>3,71</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,2</u>	<u>0,24</u>	<u>0,17</u>	<u>0,24</u>	<u>0,17</u>	<u>0,25</u>	-	-	-	-	-
49	<u>3,2</u>	<u>5,30</u>	<u>0,13</u>	<u>0,31</u>	<u>1,06</u>	<u>2,34</u>	<u>1,543</u>	<u>0,536</u>	<u>0,671</u>	<u>0,666</u>	3
	<u>0,2</u>	<u>0,75</u>	<u>0,05</u>	<u>0,08</u>	<u>0,12</u>	<u>0,55</u>	<u>0,237</u>	<u>0,094</u>	<u>0,089</u>	<u>0,038</u>	
50	<u>3,9</u>	<u>4,72</u>	<u>0,71</u>	<u>1,45</u>	<u>2,27</u>	<u>3,84</u>	<u>1,726</u>	<u>0,631</u>	<u>0,717</u>	<u>0,685</u>	2
	<u>0,3</u>	<u>0,78</u>	<u>0,18</u>	<u>0,22</u>	<u>0,21</u>	<u>0,52</u>	<u>0,293</u>	<u>0,110</u>	<u>0,104</u>	<u>0,033</u>	
51	<u>4,9</u>	<u>7,42</u>	<u>0,34</u>	<u>0,61</u>	<u>1,31</u>	<u>2,60</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,3</u>	<u>0,26</u>	<u>0,21</u>	<u>0,16</u>	<u>0,20</u>	<u>0,23</u>	-	-	-	-	-
52	<u>4,3</u>	<u>6,25</u>	<u>0,19</u>	<u>0,48</u>	<u>1,24</u>	<u>2,72</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,3</u>	<u>1,92</u>	<u>0,07</u>	<u>0,16</u>	<u>0,22</u>	<u>0,51</u>	-	-	-	-	-
53	<u>10,7</u>	<u>6,72</u>	<u>1,07</u>	<u>2,26</u>	<u>2,23</u>	<u>3,79</u>	<u>1,470</u>	<u>0,525</u>	<u>0,611</u>	<u>0,707</u>	2
	<u>0,6</u>	<u>0,49</u>	<u>0,17</u>	<u>0,40</u>	<u>0,11</u>	<u>0,01</u>	<u>0,209</u>	<u>0,083</u>	<u>0,061</u>	<u>0,024</u>	
54	<u>6,8</u>	<u>8,87</u>	<u>0,22</u>	<u>0,57</u>	<u>1,59</u>	<u>3,75</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,9</u>	<u>1,46</u>	<u>0,11</u>	<u>0,20</u>	<u>0,20</u>	<u>0,34</u>	-	-	-	-	-
55	<u>9,6</u>	<u>8,74</u>	<u>1,08</u>	<u>2,41</u>	<u>2,36</u>	<u>5,02</u>	<u>1,945</u>	<u>0,715</u>	<u>0,760</u>	<u>0,686</u>	2
	<u>1,5</u>	<u>0,38</u>	<u>0,24</u>	<u>0,31</u>	<u>0,21</u>	<u>0,23</u>	<u>0,210</u>	<u>0,095</u>	<u>0,076</u>	<u>0,024</u>	
56	<u>5,0</u>	<u>7,34</u>	<u>0,22</u>	<u>0,51</u>	<u>1,41</u>	<u>2,78</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,3</u>	<u>0,61</u>	<u>0,09</u>	<u>0,13</u>	<u>0,12</u>	<u>0,14</u>	-	-	-	-	-
57	<u>5,6</u>	<u>8,61</u>	<u>0,24</u>	<u>0,55</u>	<u>1,91</u>	<u>3,59</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,4</u>	<u>0,47</u>	<u>0,08</u>	<u>0,16</u>	<u>0,05</u>	<u>0,14</u>	-	-	-	-	-
58	<u>11,6</u>	<u>9,81</u>	<u>0,93</u>	<u>1,90</u>	<u>2,27</u>	<u>4,79</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,7</u>	<u>0,77</u>	<u>0,25</u>	<u>0,40</u>	<u>0,17</u>	<u>0,34</u>	-	-	-	-	-
59	<u>3,0</u>	<u>3,20</u>	<u>0,61</u>	-	<u>1,42</u>	<u>2,43</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,3</u>	<u>0,31</u>	<u>0,19</u>	-	<u>0,54</u>	<u>0,68</u>	-	-	-	-	-
60	<u>9,5</u>	<u>12,90</u>	<u>0,30</u>	<u>0,71</u>	<u>1,69</u>	<u>3,21</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,4</u>	<u>0,11</u>	<u>0,11</u>	<u>0,19</u>	<u>0,04</u>	<u>0,32</u>	-	-	-	-	-
61	<u>2,8</u>	<u>2,73</u>	<u>0,49</u>	<u>0,90</u>	<u>0,64</u>	<u>1,17</u>	<u>1,196</u>	<u>0,356</u>	<u>0,712</u>	<u>0,640</u>	3
	<u>0,2</u>	<u>0,11</u>	<u>0,15</u>	<u>0,24</u>	<u>0,13</u>	<u>0,06</u>	<u>0,171</u>	<u>0,065</u>	<u>0,314</u>	<u>0,034</u>	
62	<u>3,2</u>	<u>4,31</u>	<u>0,30</u>	<u>0,71</u>	<u>1,22</u>	<u>2,71</u>	-	-	-	-	-
	<u>0,3</u>	<u>0,04</u>	<u>0,11</u>	<u>0,22</u>	<u>0,05</u>	<u>0,07</u>	-	-	-	-	-
63	<u>8,5</u>	<u>8,80</u>	<u>0,74</u>	<u>1,82</u>	<u>2,49</u>	<u>5,41</u>	-	-	-	-	-
	<u>1,0</u>	<u>0,46</u>	<u>0,20</u>	<u>0,35</u>	<u>0,09</u>	<u>0,31</u>	-	-	-	-	-
64	<u>3,4</u>	<u>3,21</u>	<u>1,14</u>	<u>1,79</u>	<u>2,09</u>	<u>2,93</u>	<u>0,995</u>	<u>0,273</u>	<u>0,676</u>	<u>0,471</u>	3
	<u>0,4</u>	<u>0,08</u>	<u>0,27</u>	<u>0,41</u>	<u>0,18</u>	<u>0,08</u>	<u>0,167</u>	<u>0,049</u>	<u>0,243</u>	<u>0,085</u>	
65	<u>6,5</u>	<u>4,80</u>	<u>1,75</u>	<u>2,80</u>	<u>2,81</u>	<u>4,42</u>	<u>1,299</u>	<u>0,457</u>	<u>0,555</u>	<u>0,572</u>	3
	<u>0,5</u>	<u>0,36</u>	<u>0,25</u>	<u>0,42</u>	<u>0,22</u>	<u>0,31</u>	<u>0,167</u>	<u>0,083</u>	<u>0,052</u>	<u>0,055</u>	
66	<u>9,0</u>	<u>7,50</u>	<u>1,03</u>	<u>2,51</u>	<u>2,34</u>	<u>5,29</u>	<u>1,403</u>	<u>0,480</u>	<u>0,687</u>	<u>0,586</u>	3
	<u>0,6</u>	<u>0,42</u>	<u>0,22</u>	<u>0,46</u>	<u>0,10</u>	<u>0,29</u>	<u>0,174</u>	<u>0,098</u>	<u>0,064</u>	<u>0,050</u>	
67	<u>5,2</u>	<u>3,31</u>	<u>1,53</u>	<u>2,50</u>	<u>1,94</u>	<u>3,04</u>	<u>1,078</u>	<u>0,461</u>	<u>0,485</u>	<u>0,526</u>	3
	<u>0,4</u>	<u>0,29</u>	<u>0,44</u>	<u>0,46</u>	<u>0,23</u>	<u>0,19</u>	<u>0,258</u>	<u>0,129</u>	<u>0,490</u>	<u>0,062</u>	

Продолжение приложения И

№ ВПП	Диаметр, см	Высота, м	Zd5, см	Zd10, см	Zh5, м	Zh10, м	Хл. а	Хл. б	Каротиноиды	КЭ, отн. ед.	№ кон.
							мг/г				
68	<u>7,6</u>	<u>5,63</u>	<u>1,05</u>	<u>2,66</u>	<u>2,38</u>	<u>4,59</u>	<u>1,305</u>	<u>0,587</u>	<u>0,561</u>	<u>0,578</u>	3
	<u>0,5</u>	<u>0,79</u>	<u>0,29</u>	<u>0,41</u>	<u>0,07</u>	<u>0,40</u>	<u>0,180</u>	<u>0,113</u>	<u>0,054</u>	<u>0,060</u>	
69	<u>9,4</u>	<u>8,04</u>	<u>1,25</u>	<u>2,55</u>	<u>2,47</u>	<u>5,34</u>	<u>1,432</u>	<u>0,677</u>	<u>0,586</u>	<u>0,607</u>	3
	<u>0,7</u>	<u>0,87</u>	<u>0,60</u>	<u>0,59</u>	<u>0,13</u>	<u>0,60</u>	<u>0,209</u>	<u>0,127</u>	<u>0,076</u>	<u>0,046</u>	
70	<u>6,3</u>	<u>5,13</u>	<u>1,86</u>	<u>4,03</u>	<u>0,90</u>	<u>2,07</u>	<u>1,152</u>	<u>0,483</u>	<u>0,515</u>	<u>0,540</u>	3
	<u>0,4</u>	<u>0,57</u>	<u>0,15</u>	<u>0,47</u>	<u>0,31</u>	<u>0,45</u>	<u>0,151</u>	<u>0,070</u>	<u>0,046</u>	<u>0,061</u>	
71	<u>11,3</u>	<u>12,44</u>	<u>0,34</u>	<u>1,10</u>	<u>1,35</u>	<u>3,42</u>	<u>3,190</u>	<u>1,001</u>	<u>0,963</u>	<u>0,665</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,33</u>	<u>0,08</u>	<u>0,24</u>	<u>0,21</u>	<u>0,37</u>	<u>0,198</u>	<u>0,098</u>	<u>0,066</u>	<u>0,030</u>	
72	<u>11,4</u>	<u>10,62</u>	<u>0,46</u>	<u>1,34</u>	<u>1,20</u>	<u>2,93</u>	<u>2,631</u>	<u>0,884</u>	<u>0,810</u>	<u>0,659</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>1,80</u>	<u>0,10</u>	<u>0,32</u>	<u>0,37</u>	<u>1,04</u>	<u>0,297</u>	<u>0,112</u>	<u>0,090</u>	<u>0,023</u>	
73	<u>8,2</u>	<u>9,27</u>	<u>0,68</u>	<u>1,65</u>	<u>2,28</u>	<u>4,98</u>	<u>2,690</u>	<u>0,878</u>	<u>0,783</u>	<u>0,670</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,53</u>	<u>0,09</u>	<u>0,17</u>	<u>0,09</u>	<u>0,31</u>	<u>0,347</u>	<u>0,255</u>	<u>0,098</u>	<u>0,034</u>	
74	<u>11,9</u>	<u>11,64</u>	<u>0,82</u>	<u>1,88</u>	<u>2,32</u>	<u>4,93</u>	<u>2,734</u>	<u>0,862</u>	<u>0,813</u>	<u>0,663</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,67</u>	<u>0,26</u>	<u>0,56</u>	<u>0,27</u>	<u>0,43</u>	<u>0,214</u>	<u>0,096</u>	<u>0,057</u>	<u>0,033</u>	
75	<u>12,0</u>	<u>15,77</u>	<u>0,61</u>	<u>1,29</u>	<u>1,96</u>	<u>4,23</u>	<u>2,231</u>	<u>0,705</u>	<u>0,708</u>	<u>0,691</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>3,55</u>	<u>0,14</u>	<u>0,24</u>	<u>0,01</u>	<u>0,20</u>	<u>0,226</u>	<u>0,089</u>	<u>0,067</u>	<u>0,024</u>	
76	<u>11,0</u>	<u>11,66</u>	<u>0,65</u>	<u>1,55</u>	<u>1,82</u>	<u>4,08</u>	<u>2,606</u>	<u>0,847</u>	<u>0,838</u>	<u>0,663</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,75</u>	<u>0,15</u>	<u>0,29</u>	<u>0,21</u>	<u>0,39</u>	<u>0,298</u>	<u>0,121</u>	<u>0,078</u>	<u>0,037</u>	
77	<u>6,5</u>	<u>7,34</u>	<u>0,49</u>	<u>1,22</u>	<u>0,87</u>	<u>2,61</u>	<u>2,289</u>	<u>0,761</u>	<u>0,745</u>	<u>0,652</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>1,35</u>	<u>0,16</u>	<u>0,31</u>	<u>0,32</u>	<u>0,38</u>	<u>0,250</u>	<u>0,137</u>	<u>0,074</u>	<u>0,029</u>	
78	<u>13,5</u>	<u>12,95</u>	<u>0,53</u>	<u>1,21</u>	<u>1,47</u>	<u>3,45</u>	<u>2,627</u>	<u>0,883</u>	<u>0,837</u>	<u>0,673</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>1,83</u>	<u>0,17</u>	<u>0,23</u>	<u>0,54</u>	<u>0,81</u>	<u>0,262</u>	<u>0,124</u>	<u>0,090</u>	<u>0,028</u>	
79	<u>10,5</u>	<u>8,51</u>	<u>0,77</u>	<u>1,74</u>	<u>2,38</u>	<u>4,60</u>	<u>2,506</u>	<u>0,835</u>	<u>0,762</u>	<u>0,663</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>1,04</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,12</u>	<u>0,34</u>	<u>0,360</u>	<u>0,170</u>	<u>0,110</u>	<u>0,021</u>	
80	<u>10,5</u>	<u>10,78</u>	<u>0,58</u>	<u>1,33</u>	<u>1,94</u>	<u>4,18</u>	<u>2,515</u>	<u>0,793</u>	<u>0,775</u>	<u>0,664</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,35</u>	<u>0,10</u>	<u>0,19</u>	<u>0,17</u>	<u>0,16</u>	<u>0,358</u>	<u>0,121</u>	<u>0,086</u>	<u>0,021</u>	
81	<u>9,4</u>	<u>10,58</u>	<u>0,67</u>	<u>1,62</u>	<u>1,99</u>	<u>4,63</u>	<u>2,546</u>	<u>0,868</u>	<u>0,790</u>	<u>0,680</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,83</u>	<u>0,10</u>	<u>0,21</u>	<u>0,18</u>	<u>0,61</u>	<u>0,194</u>	<u>0,030</u>	<u>0,034</u>	<u>0,0220</u>	
82	<u>12,3</u>	<u>10,72</u>	<u>0,49</u>	<u>1,25</u>	<u>2,70</u>	<u>5,38</u>	<u>3,077</u>	<u>1,073</u>	<u>0,936</u>	<u>0,655</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,33</u>	<u>0,16</u>	<u>0,37</u>	<u>0,11</u>	<u>0,30</u>	<u>0,333</u>	<u>0,155</u>	<u>0,098</u>	<u>0,028</u>	
83	<u>10,3</u>	<u>10,29</u>	<u>0,65</u>	<u>1,53</u>	<u>2,00</u>	<u>4,50</u>	<u>2,625</u>	<u>0,849</u>	<u>0,797</u>	<u>0,679</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,40</u>	<u>0,11</u>	<u>0,27</u>	<u>0,12</u>	<u>0,09</u>	<u>0,173</u>	<u>0,096</u>	<u>0,055</u>	<u>0,019</u>	
84	<u>10,5</u>	<u>9,63</u>	<u>0,66</u>	<u>1,56</u>	<u>2,07</u>	<u>4,51</u>	-	-	-	-	-
	<u>2,0</u>	<u>0,51</u>	<u>0,11</u>	<u>0,28</u>	<u>0,39</u>	<u>0,42</u>	-	-	-	-	
85	<u>10,5</u>	<u>11,63</u>	<u>0,48</u>	<u>1,11</u>	<u>1,60</u>	<u>3,71</u>	<u>2,758</u>	<u>0,937</u>	<u>0,840</u>	<u>0,665</u>	4
	<u>2,0</u>	<u>0,58</u>	<u>0,11</u>	<u>0,26</u>	<u>0,33</u>	<u>0,51</u>	<u>0,328</u>	<u>0,134</u>	<u>0,100</u>	<u>0,023</u>	
86	<u>13,5</u>	<u>15,21</u>	<u>0,43</u>	<u>0,82</u>	<u>1,11</u>	<u>2,31</u>	-	-	-	-	-
	<u>1,0</u>	<u>0,12</u>	<u>0,20</u>	<u>0,33</u>	<u>0,31</u>	<u>0,13</u>	-	-	-	-	
87	<u>8,5</u>	<u>11,60</u>	<u>0,65</u>	<u>1,28</u>	<u>2,11</u>	<u>4,31</u>	<u>1,572</u>	<u>0,575</u>	<u>0,693</u>	<u>0,612</u>	3
	<u>1,0</u>	<u>0,41</u>	<u>0,21</u>	<u>0,36</u>	<u>0,30</u>	<u>0,42</u>	<u>0,102</u>	<u>0,057</u>	<u>0,045</u>	<u>0,048</u>	
88	<u>9,6</u>	<u>12,27</u>	<u>0,34</u>	<u>0,67</u>	<u>1,12</u>	<u>2,32</u>	<u>1,830</u>	<u>0,647</u>	<u>0,762</u>	<u>0,631</u>	3
	<u>1,0</u>	<u>0,18</u>	<u>0,16</u>	<u>0,24</u>	<u>0,12</u>	<u>0,18</u>	<u>0,193</u>	<u>0,120</u>	<u>0,093</u>	<u>0,043</u>	
89	<u>13,8</u>	<u>11,43</u>	<u>0,41</u>	<u>0,82</u>	<u>1,66</u>	<u>3,18</u>	<u>1,734</u>	<u>0,660</u>	<u>0,757</u>	<u>0,647</u>	3
	<u>1,0</u>	<u>0,20</u>	<u>0,14</u>	<u>0,24</u>	<u>0,01</u>	<u>0,14</u>	<u>0,324</u>	<u>0,161</u>	<u>0,120</u>	<u>0,044</u>	
90	<u>14,0</u>	<u>16,71</u>	<u>0,42</u>	<u>0,83</u>	<u>1,93</u>	<u>4,19</u>	-	-	-	-	-
	<u>1,0</u>	<u>0,81</u>	<u>0,13</u>	<u>0,22</u>	<u>0,11</u>	<u>0,25</u>	-	-	-	-	

Продолжение приложения И

№ ВПП	Диаметр, см	Высота, м	Zd5, см	Zd10, см	Zh5, м	Zh10, м	Хл. а	Хл. б	Каротиноиды	КЭ, отн. ед.	№ кон.
							мг/г				
91	<u>11,2</u>	<u>11,14</u>	<u>0,33</u>	<u>0,69</u>	<u>0,92</u>	<u>1,85</u>	-	-	-	-	-
	1,0	0,28	0,14	0,28	0,06	0,02	-	-	-	-	-
92	<u>11,9</u>	<u>12,91</u>	<u>0,33</u>	<u>0,69</u>	<u>0,68</u>	<u>1,52</u>	<u>1,559</u>	<u>0,574</u>	<u>0,641</u>	<u>0,655</u>	3
	1,0	0,61	0,10	0,25	0,16	0,47	0,247	0,115	0,070	0,028	
93	<u>12,7</u>	<u>13,94</u>	<u>0,61</u>	<u>1,12</u>	<u>2,02</u>	<u>4,22</u>	-	-	-	-	-
	1,0	0,32	0,16	0,41	0,12	0,16	-	-	-	-	-
94	<u>11,4</u>	<u>11,69</u>	<u>0,59</u>	<u>1,42</u>	<u>1,62</u>	<u>4,06</u>	-	-	-	-	-
	1,0	0,25	0,23	0,38	0,16	0,25	-	-	-	-	-
95	<u>9,7</u>	<u>15,32</u>	<u>0,26</u>	<u>0,56</u>	<u>0,77</u>	<u>2,02</u>	<u>1,663</u>	<u>0,602</u>	<u>0,721</u>	<u>0,667</u>	3
	1,0	0,41	0,07	0,14	0,05	0,07	0,137	0,064	0,049	0,028	
96	<u>10,8</u>	<u>13,01</u>	<u>0,51</u>	<u>1,15</u>	<u>2,10</u>	<u>4,67</u>	<u>1,986</u>	<u>0,789</u>	<u>0,873</u>	<u>0,654</u>	3
	1,0	0,17	0,17	0,29	0,39	0,83	0,272	0,119	0,095	0,032	
97	<u>9,8</u>	<u>10,92</u>	<u>1,10</u>	<u>1,09</u>	<u>2,36</u>	<u>4,79</u>	<u>2,121</u>	<u>0,818</u>	<u>0,924</u>	<u>0,644</u>	3
	1,0	0,13	0,24	0,20	0,43	0,48	0,335	0,163	0,122	0,036	
98	<u>8,5</u>	<u>13,16</u>	<u>0,32</u>	<u>0,72</u>	<u>1,41</u>	<u>3,47</u>	<u>1,851</u>	<u>0,696</u>	<u>0,790</u>	<u>0,625</u>	3
	1,0	0,66	0,10	0,22	0,48	0,62	0,254	0,138	0,100	0,04	
99	<u>12,2</u>	<u>14,82</u>	<u>0,42</u>	<u>0,93</u>	<u>1,56</u>	<u>3,83</u>	<u>1,953</u>	<u>0,728</u>	<u>0,876</u>	<u>0,607</u>	3
	1,0	0,56	0,13	0,24	0,17	0,44	0,235	0,111	0,094	0,071	
100	<u>13,9</u>	<u>11,76</u>	<u>0,39</u>	<u>0,76</u>	<u>0,43</u>	<u>1,15</u>	<u>1,394</u>	<u>0,508</u>	<u>0,659</u>	<u>0,624</u>	3
	1,0	0,65	0,16	0,29	0,10	0,29	0,294	0,122	0,111	0,045	
101	<u>7,1</u>	<u>6,43</u>	<u>0,86</u>	<u>2,22</u>	<u>2,88</u>	<u>5,32</u>	<u>2,612</u>	<u>0,880</u>	<u>0,809</u>	<u>0,669</u>	4
	0,5	0,74	0,25	0,35	0,20	0,60	0,409	0,163	0,113	0,026	
102	<u>4,9</u>	<u>4,18</u>	<u>0,97</u>	<u>0,87</u>	<u>1,28</u>	<u>3,10</u>	<u>1,943</u>	<u>0,611</u>	<u>0,598</u>	<u>0,674</u>	4
	0,5	0,10	0,28	0,27	0,77	1,01	0,228	0,070	0,063	0,015	
103	<u>11,1</u>	<u>16,77</u>	<u>0,41</u>	<u>0,81</u>	<u>1,00</u>	<u>3,13</u>	<u>2,475</u>	<u>0,831</u>	<u>0,746</u>	<u>0,685</u>	4
	0,5	0,97	0,18	0,28	0,84	1,24	0,254	0,098	0,076	0,017	
104	<u>13,4</u>	<u>16,47</u>	<u>0,35</u>	<u>0,82</u>	<u>2,47</u>	<u>3,87</u>	<u>2,469</u>	<u>1,044</u>	<u>0,762</u>	<u>0,676</u>	4
	0,3	0,21	0,15	0,25	0,68	0,90	0,229	0,311	0,098	0,012	
105	<u>11,2</u>	<u>9,50</u>	<u>0,34</u>	<u>0,77</u>	<u>3,03</u>	<u>5,20</u>	<u>3,237</u>	<u>1,137</u>	<u>1,001</u>	<u>0,647</u>	4
	0,4	0,40	0,08	0,13	1,77	2,69	0,278	0,101	0,080	0,025	
106	<u>2,6</u>	<u>5,70</u>	<u>0,17</u>	<u>0,35</u>	<u>1,67</u>	<u>3,23</u>	<u>2,490</u>	<u>0,836</u>	<u>0,786</u>	<u>0,659</u>	4
	0,2	0,82	0,07	0,12	0,29	0,64	0,215	0,083	0,069	0,023	
107	<u>8,2</u>	<u>8,68</u>	<u>0,44</u>	<u>0,61</u>	<u>2,18</u>	<u>4,13</u>	<u>2,362</u>	<u>0,798</u>	<u>0,739</u>	<u>0,653</u>	4
	0,3	0,95	0,14	0,15	0,30	0,56	0,197	0,072	0,062	0,038	
108	<u>6,7</u>	<u>7,27</u>	<u>0,80</u>	<u>1,24</u>	<u>3,74</u>	<u>5,33</u>	<u>2,620</u>	<u>0,853</u>	<u>0,802</u>	<u>0,665</u>	4
	0,4	0,55	0,26	0,45	1,87	0,61	0,238	0,045	0,037	0,029	
109	<u>10,0</u>	<u>9,13</u>	<u>0,91</u>	<u>1,13</u>	<u>2,86</u>	<u>5,84</u>	<u>2,933</u>	<u>1,016</u>	<u>0,910</u>	<u>0,659</u>	4
	0,4	0,60	0,32	0,31	0,57	0,34	0,333	0,133	0,106	0,033	
110	<u>9,7</u>	<u>6,23</u>	<u>0,74</u>	<u>1,26</u>	<u>2,12</u>	<u>4,50</u>	<u>2,948</u>	<u>0,995</u>	<u>0,906</u>	<u>0,673</u>	4
	0,4	0,40	0,30	0,20	0,25	0,43	0,289	0,127	0,084	0,028	
111	<u>12,0</u>	<u>15,10</u>	<u>0,38</u>	<u>0,85</u>	<u>2,20</u>	<u>4,79</u>	<u>3,065</u>	<u>1,067</u>	<u>0,955</u>	<u>0,659</u>	4
	0,3	1,37	0,28	0,31	0,14	0,16	0,420	0,133	0,118	0,033	
112	<u>11,5</u>	<u>15,37</u>	<u>0,37</u>	<u>0,49</u>	<u>2,07</u>	<u>4,31</u>	<u>3,158</u>	<u>1,120</u>	<u>0,994</u>	<u>0,653</u>	4
	0,4	0,64	0,13	0,23	0,21	0,16	0,437	0,167	0,131	0,045	
113	<u>11,5</u>	<u>16,03</u>	<u>0,30</u>	<u>0,70</u>	<u>1,85</u>	<u>3,93</u>	<u>3,039</u>	<u>1,038</u>	<u>0,931</u>	<u>0,663</u>	4
	0,5	0,31	0,11	0,18	0,32	0,27	0,268	0,101	0,077	0,026	

Продолжение приложения И

№ ВПП	Диаметр, см	Высота, м	Zd5, см	Zd10, см	Zh5, м	Zh10, м	Хл. а	Хл. б	Каротиноиды	КЭ, отн. ед.	№ кон.
							мг/г				
114	<u>16,2</u>	<u>18,13</u>	<u>0,40</u>	<u>0,82</u>	<u>2,18</u>	<u>4,32</u>	<u>2,923</u>	<u>0,994</u>	<u>0,903</u>	<u>0,657</u>	4
	<u>0,5</u>	<u>0,90</u>	<u>0,19</u>	<u>0,30</u>	<u>0,14</u>	<u>0,24</u>	<u>0,162</u>	<u>0,081</u>	<u>0,052</u>	<u>0,016</u>	
115	<u>6,0</u>	<u>5,87</u>	<u>0,83</u>	<u>2,10</u>	<u>2,64</u>	<u>4,81</u>	<u>2,211</u>	<u>0,716</u>	<u>0,702</u>	<u>0,685</u>	5
	<u>0,5</u>	<u>0,10</u>	<u>0,18</u>	<u>0,33</u>	<u>0,14</u>	<u>0,07</u>	<u>0,257</u>	<u>0,106</u>	<u>0,076</u>	<u>0,039</u>	
116	<u>6,4</u>	<u>6,86</u>	<u>1,00</u>	<u>2,23</u>	<u>2,82</u>	<u>5,19</u>	<u>2,386</u>	<u>0,773</u>	<u>0,751</u>	<u>0,678</u>	5
	<u>0,3</u>	<u>1,09</u>	<u>0,24</u>	<u>0,28</u>	<u>0,19</u>	<u>0,46</u>	<u>0,204</u>	<u>0,100</u>	<u>0,059</u>	<u>0,042</u>	
117	<u>5,4</u>	<u>4,61</u>	<u>0,88</u>	<u>1,91</u>	<u>2,21</u>	<u>3,76</u>	<u>2,247</u>	<u>0,730</u>	<u>0,714</u>	<u>0,699</u>	5
	<u>0,3</u>	<u>0,03</u>	<u>0,23</u>	<u>0,29</u>	<u>0,13</u>	<u>0,14</u>	<u>0,182</u>	<u>0,072</u>	<u>0,049</u>	<u>0,023</u>	
118	<u>7,3</u>	<u>6,51</u>	<u>0,91</u>	<u>2,16</u>	<u>2,70</u>	<u>5,01</u>	<u>2,267</u>	<u>0,750</u>	<u>0,707</u>	<u>0,659</u>	4
	<u>0,4</u>	<u>0,35</u>	<u>0,21</u>	<u>0,26</u>	<u>0,27</u>	<u>0,49</u>	<u>0,286</u>	<u>0,111</u>	<u>0,090</u>	<u>0,049</u>	
119	<u>15,5</u>	<u>13,31</u>	<u>0,95</u>	<u>2,05</u>	<u>2,28</u>	<u>4,37</u>	<u>2,816</u>	<u>0,903</u>	<u>0,865</u>	<u>0,667</u>	4
	<u>1,3</u>	<u>0,43</u>	<u>0,12</u>	<u>0,18</u>	<u>0,12</u>	<u>0,23</u>	<u>0,264</u>	<u>0,105</u>	<u>0,077</u>	<u>0,036</u>	
120	<u>8,1</u>	<u>10,12</u>	<u>0,50</u>	<u>1,18</u>	<u>1,40</u>	<u>3,39</u>	<u>2,949</u>	<u>1,097</u>	<u>0,946</u>	<u>0,654</u>	4
	<u>1,0</u>	<u>0,85</u>	<u>0,09</u>	<u>0,21</u>	<u>0,36</u>	<u>0,47</u>	<u>0,498</u>	<u>0,157</u>	<u>0,073</u>	<u>0,017</u>	
121	<u>12,9</u>	<u>11,97</u>	<u>0,69</u>	<u>1,67</u>	<u>1,46</u>	<u>3,68</u>	<u>2,792</u>	<u>0,925</u>	<u>0,845</u>	<u>0,675</u>	4
	<u>1,3</u>	<u>1,09</u>	<u>0,15</u>	<u>0,26</u>	<u>0,19</u>	<u>0,26</u>	<u>0,244</u>	<u>0,096</u>	<u>0,067</u>	<u>0,022</u>	
122	<u>8,3</u>	<u>7,92</u>	<u>0,76</u>	<u>1,86</u>	<u>2,07</u>	<u>4,49</u>	<u>2,790</u>	<u>0,958</u>	<u>0,851</u>	<u>0,677</u>	4
	<u>1,9</u>	<u>0,37</u>	<u>0,13</u>	<u>0,25</u>	<u>0,29</u>	<u>0,13</u>	<u>0,228</u>	<u>0,087</u>	<u>0,075</u>	<u>0,023</u>	
123	<u>6,7</u>	<u>8,94</u>	<u>0,41</u>	<u>1,02</u>	<u>0,99</u>	<u>2,61</u>	<u>2,680</u>	<u>0,949</u>	<u>0,828</u>	<u>0,657</u>	4
	<u>0,7</u>	<u>1,23</u>	<u>0,10</u>	<u>0,24</u>	<u>0,47</u>	<u>0,93</u>	<u>0,311</u>	<u>0,147</u>	<u>0,095</u>	<u>0,036</u>	
124	<u>7,2</u>	<u>6,04</u>	<u>1,24</u>	<u>2,66</u>	<u>2,89</u>	<u>5,27</u>	<u>2,171</u>	<u>0,715</u>	<u>0,701</u>	<u>0,692</u>	5
	<u>0,4</u>	<u>0,35</u>	<u>0,22</u>	<u>0,32</u>	<u>0,08</u>	<u>0,15</u>	<u>0,191</u>	<u>0,075</u>	<u>0,067</u>	<u>0,024</u>	
125	<u>12,1</u>	<u>13,28</u>	<u>0,39</u>	<u>0,88</u>	<u>1,42</u>	<u>3,13</u>	<u>2,560</u>	<u>0,863</u>	<u>0,808</u>	<u>0,682</u>	4
	<u>0,7</u>	<u>1,02</u>	<u>0,13</u>	<u>0,23</u>	<u>0,24</u>	<u>0,49</u>	<u>0,287</u>	<u>0,127</u>	<u>0,086</u>	<u>0,025</u>	
126	<u>14,0</u>	<u>17,73</u>	<u>0,51</u>	<u>1,05</u>	<u>1,72</u>	<u>3,96</u>	<u>2,641</u>	<u>0,926</u>	<u>0,858</u>	<u>0,646</u>	5
	<u>0,9</u>	<u>2,00</u>	<u>0,17</u>	<u>0,37</u>	<u>0,11</u>	<u>0,24</u>	<u>0,207</u>	<u>0,061</u>	<u>0,063</u>	<u>0,025</u>	
127	<u>11,1</u>	<u>11,52</u>	<u>0,36</u>	<u>0,89</u>	<u>0,98</u>	<u>2,43</u>	<u>2,518</u>	<u>0,889</u>	<u>0,824</u>	<u>0,684</u>	5
	<u>0,6</u>	<u>2,93</u>	<u>0,13</u>	<u>0,25</u>	<u>0,30</u>	<u>1,34</u>	<u>0,242</u>	<u>0,098</u>	<u>0,087</u>	<u>0,020</u>	
128	<u>10,4</u>	<u>14,70</u>	<u>0,34</u>	<u>0,73</u>	<u>0,68</u>	<u>1,86</u>	<u>2,671</u>	<u>0,919</u>	<u>0,859</u>	<u>0,662</u>	4
	<u>0,5</u>	<u>0,63</u>	<u>0,11</u>	<u>0,26</u>	<u>0,07</u>	<u>0,12</u>	<u>0,186</u>	<u>0,110</u>	<u>0,069</u>	<u>0,027</u>	
129	<u>11,7</u>	<u>15,27</u>	<u>0,44</u>	<u>0,98</u>	<u>1,26</u>	<u>3,05</u>	<u>2,742</u>	<u>0,955</u>	<u>0,863</u>	<u>0,655</u>	4
	<u>0,7</u>	<u>0,34</u>	<u>0,13</u>	<u>0,24</u>	<u>0,05</u>	<u>0,21</u>	<u>0,221</u>	<u>0,082</u>	<u>0,070</u>	<u>0,029</u>	
130	<u>13,8</u>	<u>15,81</u>	<u>0,52</u>	<u>1,08</u>	<u>1,78</u>	<u>4,04</u>	<u>2,789</u>	<u>0,963</u>	<u>0,881</u>	<u>0,664</u>	4
	<u>0,8</u>	<u>0,40</u>	<u>0,29</u>	<u>0,37</u>	<u>0,36</u>	<u>0,54</u>	<u>0,198</u>	<u>0,091</u>	<u>0,062</u>	<u>0,030</u>	
131	<u>11,1</u>	<u>10,79</u>	<u>0,83</u>	<u>1,69</u>	<u>2,94</u>	<u>5,36</u>	<u>2,460</u>	<u>0,814</u>	<u>0,774</u>	<u>0,669</u>	4
	<u>0,8</u>	<u>0,16</u>	<u>0,26</u>	<u>0,58</u>	<u>0,33</u>	<u>0,46</u>	<u>0,183</u>	<u>0,082</u>	<u>0,057</u>	<u>0,053</u>	
132	<u>15,1</u>	<u>13,59</u>	<u>0,61</u>	<u>1,44</u>	<u>2,24</u>	<u>4,99</u>	<u>2,759</u>	<u>0,979</u>	<u>0,875</u>	<u>0,668</u>	5
	<u>0,8</u>	<u>0,12</u>	<u>0,24</u>	<u>0,45</u>	<u>0,14</u>	<u>0,22</u>	<u>0,253</u>	<u>0,098</u>	<u>0,079</u>	<u>0,030</u>	
133	<u>10,9</u>	<u>13,59</u>	<u>0,27</u>	<u>0,64</u>	<u>1,13</u>	<u>3,02</u>	<u>2,575</u>	<u>0,885</u>	<u>0,823</u>	<u>0,66</u>	5
	<u>0,8</u>	<u>0,77</u>	<u>0,12</u>	<u>0,21</u>	<u>0,20</u>	<u>0,46</u>	<u>0,238</u>	<u>0,100</u>	<u>0,068</u>	<u>0,049</u>	
134	<u>5,3</u>	<u>4,86</u>	<u>0,71</u>	<u>1,36</u>	<u>2,04</u>	<u>3,52</u>	<u>2,361</u>	<u>0,774</u>	<u>0,781</u>	<u>0,670</u>	5
	<u>0,7</u>	<u>0,87</u>	<u>0,13</u>	<u>0,24</u>	<u>0,34</u>	<u>0,66</u>	<u>0,21</u>	<u>0,074</u>	<u>0,055</u>	<u>0,029</u>	
135	<u>14,9</u>	<u>17,39</u>	<u>0,61</u>	<u>1,49</u>	<u>1,71</u>	<u>3,69</u>	<u>2,527</u>	<u>0,907</u>	<u>0,826</u>	<u>0,612</u>	5
	<u>1,0</u>	<u>0,28</u>	<u>0,09</u>	<u>0,21</u>	<u>0,12</u>	<u>0,18</u>	<u>0,263</u>	<u>0,122</u>	<u>0,076</u>	<u>0,032</u>	
136	<u>15,1</u>	<u>16,29</u>	<u>0,44</u>	<u>1,00</u>	<u>1,87</u>	<u>4,27</u>	<u>2,242</u>	<u>0,711</u>	<u>0,720</u>	<u>0,678</u>	5
	<u>0,8</u>	<u>1,50</u>	<u>0,15</u>	<u>0,31</u>	<u>0,20</u>	<u>0,50</u>	<u>0,272</u>	<u>0,119</u>	<u>0,094</u>	<u>0,017</u>	

Продолжение приложения И

№ ВПП	Диаметр, см	Высота, м	Zd5, см	Zd10, см	Zh5, м	Zh10, м	Хл. а	Хл. б	Каротиноиды	КЭ, отн. ед.	№ кон.
							мг/г				
137	<u>13,5</u>	<u>12,23</u>	<u>0,67</u>	<u>1,75</u>	<u>2,31</u>	<u>5,36</u>	<u>2,441</u>	<u>0,808</u>	<u>0,822</u>	<u>0,635</u>	5
	<u>1,3</u>	<u>0,21</u>	<u>0,28</u>	<u>0,40</u>	<u>0,17</u>	<u>0,59</u>	<u>0,211</u>	<u>0,077</u>	<u>0,081</u>	<u>0,042</u>	
138	<u>12,4</u>	<u>12,40</u>	<u>0,47</u>	<u>1,11</u>	<u>1,67</u>	<u>3,97</u>	<u>2,139</u>	<u>0,626</u>	<u>0,724</u>	<u>0,657</u>	5
	<u>1,2</u>	<u>0,53</u>	<u>0,21</u>	<u>0,34</u>	<u>0,11</u>	<u>0,19</u>	<u>0,156</u>	<u>0,065</u>	<u>0,058</u>	<u>0,036</u>	
139	<u>11,7</u>	<u>12,08</u>	<u>0,53</u>	<u>1,71</u>	<u>2,53</u>	<u>5,65</u>	<u>2,571</u>	<u>0,906</u>	<u>0,846</u>	<u>0,651</u>	5
	<u>0,7</u>	<u>0,35</u>	<u>0,14</u>	<u>0,33</u>	<u>0,16</u>	<u>0,20</u>	<u>0,226</u>	<u>0,092</u>	<u>0,076</u>	<u>0,04</u>	
140	<u>10,2</u>	<u>10,19</u>	<u>0,66</u>	<u>2,07</u>	<u>2,80</u>	<u>6,06</u>	<u>2,849</u>	<u>0,970</u>	<u>0,930</u>	<u>0,660</u>	5
	<u>0,7</u>	<u>0,27</u>	<u>0,15</u>	<u>0,32</u>	<u>0,02</u>	<u>0,10</u>	<u>0,190</u>	<u>0,129</u>	<u>0,057</u>	<u>0,032</u>	

Примечание. Zd5, Zd10, Zh5, Zh10 – приросты по диаметру и высоте ствола за последние 5 и 10 лет; хл. а, хл. б – содержание хлорофиллов а и б в хвос; каротиноиды – содержание каротиноидов в хвос; КЭ – квантовая эффективность нециклического электронного транспорта; № кон. – кодированное значение периода времени, в течение которого проводились измерения физиологических параметров на пробной площади.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Значения показателей состояния (в баллах) древостоев 119 временных пробных площадей, которые были использованы для экологического зонирования состояния лесов в районе исследований на Среднем Урале

№ ВПП	Показатель состояния						Обобщенный показатель состояния		
	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>Zd5</i>	<i>Zh5</i>	<i>Хл.а</i>	<i>КЭ</i>	морфометрический	физиологический	общий
1	18	49	62	50	52	73	41	62	47
2	12	35	17	52	84	63	25	73	35
3	13	37	40	53	48	67	32	56	38
4	12	51	14	36	70	57	24	63	33
5	20	42	25	34	72	53	29	62	37
6	33	66	19	29	11	55	33	25	30
7	5	6	17	24	5	44	10	15	12
8	30	37	59	58	62	61	44	62	49
9	56	71	10	58	75	46	39	59	45
10	46	55	72	65	66	57	59	62	60
11	41	62	14	47	72	31	36	47	39
12	27	57	29	48	78	42	38	57	44
13	47	54	18	60	81	46	41	61	47
14	67	66	100	58	–	–	71	–	–
15	36	65	5	49	64	5	27	18	24
16	14	30	17	29	62	18	21	33	25
17	72	22	100	74	60	51	59	55	58
18	60	48	50	71	50	66	57	57	57
19	63	62	62	62	62	62	62	62	62
20	62	62	62	62	62	62	62	62	62
21	38	32	84	65	63	69	51	66	55
22	38	63	12	57	92	50	36	67	44
23	23	44	12	48	80	47	28	61	36
24	13	47	28	53	41	55	31	48	36
25	48	60	69	65	72	61	60	66	62
26	34	56	27	63	57	60	43	59	47
27	26	40	25	45	54	60	33	57	39
28	43	35	47	60	68	69	46	69	52
29	39	51	21	53	65	26	39	41	39
30	20	39	33	39	57	47	31	52	37
31	62	62	62	62	9	71	62	25	46
32	41	43	16	52	74	32	35	48	39
33	18	48	32	53	39	76	35	54	40
34	42	57	23	46	–	–	40	–	–
35	35	52	33	53	54	19	42	32	38
36	40	55	11	41	80	40	32	57	38
37	24	57	36	59	59	5	42	17	31
38	36	45	32	49	64	34	40	47	42

№ ВПП	Показатель состояния						Обобщенный показатель состояния		
	<i>D</i>	<i>И</i>	<i>Zd5</i>	<i>Zh5</i>	<i>Хл.а</i>	<i>КЭ</i>	морфометрический	физиологический	общий
39	30	45	74	56	81	91	49	86	59
40	56	70	33	54	77	45	51	59	54
41	6	22	13	44	–	–	16	–	–
44	16	29	16	25	49	61	20	55	28
45	25	48	31	49	–	–	37	–	–
53	30	21	77	54	5	81	40	20	32
54	7	25	5	34	–	–	13	–	–
55	30	57	77	57	49	37	53	43	49
58	33	14	67	55	–	–	36	–	–
60	5	56	37	61	–	–	28	–	–
63	16	41	50	61	–	–	38	–	–
64	5	5	29	40	5	5	13	5	9
65	41	55	53	63	19	30	52	24	40
66	60	68	24	49	26	35	47	30	40
67	33	40	44	34	8	16	38	11	25
68	51	75	25	50	19	32	47	25	38
69	59	68	33	53	28	42	51	34	45
70	34	57	57	5	11	20	27	15	22
71	29	57	12	26	84	45	27	62	35
72	30	43	22	22	53	29	28	39	31
73	18	5	44	55	58	58	22	58	30
74	35	59	58	56	61	40	51	49	50
75	29	64	37	45	21	89	42	43	42
76	24	37	41	41	51	40	35	45	38
77	7	15	25	13	25	13	14	18	15
78	39	53	29	30	53	64	36	59	43
79	73	75	15	50	43	40	45	42	44
80	24	46	34	45	44	43	36	43	38
81	19	45	43	46	47	77	36	60	43
82	38	62	25	66	80	19	44	39	42
83	26	49	41	47	53	75	39	63	46
84	28	50	42	49	–	–	41	–	–
85	23	46	24	34	62	45	31	53	37
86	41	70	19	19	–	–	32	–	–
87	10	25	41	50	37	44	27	40	31
88	15	31	12	19	55	50	18	52	26
89	35	5	88	60	49	55	31	52	37
90	40	61	18	44	–	–	37	–	–
91	25	33	11	14	–	–	19	–	–
92	29	41	11	9	36	57	19	46	25
93	33	49	37	47	–	–	41	–	–
94	28	44	35	34	–	–	35	–	–

Окончание приложения К

№ ВПП	Показатель состояния						Обобщенный показатель состояния		
	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>Zd5</i>	<i>Zh5</i>	<i>Хл.а</i>	<i>КЭ</i>	морфометрический	физиологический	общий
95	6	76	13	8	44	61	14	52	22
96	24	52	27	50	64	57	36	61	43
97	14	50	78	57	71	54	42	62	48
98	12	48	10	28	56	48	20	52	28
99	29	46	18	33	62	42	30	51	36
100	39	36	16	5	25	48	18	34	22
101	46	72	18	65	52	55	44	54	47
102	19	32	22	13	5	67	20	18	19
103	23	68	17	16	41	83	26	58	34
104	37	63	13	60	40	70	36	53	41
105	81	89	5	69	85	5	40	21	32
107	13	37	20	52	31	15	27	21	25
108	41	79	16	83	53	45	46	49	47
109	70	83	20	65	73	29	52	46	50
110	70	65	14	41	74	64	40	69	48
111	32	72	15	53	79	29	37	48	40
112	29	71	14	49	83	15	35	35	35
113	29	76	9	42	78	40	30	56	37
114	53	61	17	52	72	24	41	42	41
119	53	73	69	55	66	50	62	58	61
120	12	35	26	28	74	17	23	35	27
121	36	44	45	29	65	69	38	67	46
122	17	36	52	49	65	72	35	68	44
124	47	66	33	66	7	60	51	21	38
125	16	18	83	45	48	80	32	62	40
126	39	67	27	38	74	24	40	42	41
127	29	34	13	16	58	54	21	56	29
128	5	52	62	5	56	37	17	46	24
129	25	54	20	23	61	19	28	34	30
130	36	45	28	40	65	43	36	52	41
131	31	61	59	71	40	55	53	47	51
132	48	49	37	54	84	42	46	59	50
133	7	6	18	26	66	35	12	48	19
134	26	48	13	38	33	43	28	38	31
135	43	68	37	37	60	5	45	17	33
136	47	63	20	42	15	50	40	27	35
137	38	37	43	56	47	16	43	28	37
139	30	63	29	62	66	28	43	43	43
140	27	67	42	68	89	35	48	56	51

Примечание. *D* – диаметр, *H* – высота, *Zd5* – радиальный прирост за последние 5 лет, *Zh5* – прирост по высоте за последние 5 лет.

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Повторные измерения физиологических характеристик на контрольных временных пробных площадях
(в числителе – среднее значение, в знаменателе – среднеквадратическое отклонение)

№ ВПП	Хл. а	Хл. б	Каротиноиды	КЭ, отн. ед.	Дата измерений	№ кон.																																																																																																
	мг/г																																																																																																					
19	<u>2,19</u>	<u>0,72</u>	<u>0,71</u>	<u>0,71</u>	14.09.1995	1																																																																																																
	0,33	0,12	0,11	0,06			20	<u>2,33</u>	<u>0,77</u>	<u>0,81</u>	<u>0,72</u>	14.09.1995	1	0,35	0,12	0,09	0,03	19	<u>1,8</u>	<u>0,63</u>	<u>0,67</u>	<u>0,7</u>	02.10.1995	2	0,26	0,1	0,06	0,02	20	<u>2,08</u>	<u>0,76</u>	<u>0,77</u>	<u>0,7</u>	02.10.1995	2	0,26	0,1	0,08	0,03	19	<u>1,83</u>	<u>0,65</u>	<u>0,78</u>	<u>0,65</u>	15.10.1995	3	0,29	0,14	0,11	0,03	20	<u>1,95</u>	<u>0,63</u>	<u>0,77</u>	<u>0,67</u>	15.10.1995	3	0,38	0,16	0,14	0,03	19	<u>2,78</u>	<u>1</u>	<u>0,87</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,26	0,1	0,14	0,02	20	<u>2,76</u>	<u>0,93</u>	<u>0,84</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,25	0,1	0,07	0,03	19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5	0,34	0,12	0,1	0,03	20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24
20	<u>2,33</u>	<u>0,77</u>	<u>0,81</u>	<u>0,72</u>	14.09.1995	1																																																																																																
	0,35	0,12	0,09	0,03			19	<u>1,8</u>	<u>0,63</u>	<u>0,67</u>	<u>0,7</u>	02.10.1995	2	0,26	0,1	0,06	0,02	20	<u>2,08</u>	<u>0,76</u>	<u>0,77</u>	<u>0,7</u>	02.10.1995	2	0,26	0,1	0,08	0,03	19	<u>1,83</u>	<u>0,65</u>	<u>0,78</u>	<u>0,65</u>	15.10.1995	3	0,29	0,14	0,11	0,03	20	<u>1,95</u>	<u>0,63</u>	<u>0,77</u>	<u>0,67</u>	15.10.1995	3	0,38	0,16	0,14	0,03	19	<u>2,78</u>	<u>1</u>	<u>0,87</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,26	0,1	0,14	0,02	20	<u>2,76</u>	<u>0,93</u>	<u>0,84</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,25	0,1	0,07	0,03	19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5	0,34	0,12	0,1	0,03	20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24	0,11	0,07	0,02								
19	<u>1,8</u>	<u>0,63</u>	<u>0,67</u>	<u>0,7</u>	02.10.1995	2																																																																																																
	0,26	0,1	0,06	0,02			20	<u>2,08</u>	<u>0,76</u>	<u>0,77</u>	<u>0,7</u>	02.10.1995	2	0,26	0,1	0,08	0,03	19	<u>1,83</u>	<u>0,65</u>	<u>0,78</u>	<u>0,65</u>	15.10.1995	3	0,29	0,14	0,11	0,03	20	<u>1,95</u>	<u>0,63</u>	<u>0,77</u>	<u>0,67</u>	15.10.1995	3	0,38	0,16	0,14	0,03	19	<u>2,78</u>	<u>1</u>	<u>0,87</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,26	0,1	0,14	0,02	20	<u>2,76</u>	<u>0,93</u>	<u>0,84</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,25	0,1	0,07	0,03	19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5	0,34	0,12	0,1	0,03	20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24	0,11	0,07	0,02																			
20	<u>2,08</u>	<u>0,76</u>	<u>0,77</u>	<u>0,7</u>	02.10.1995	2																																																																																																
	0,26	0,1	0,08	0,03			19	<u>1,83</u>	<u>0,65</u>	<u>0,78</u>	<u>0,65</u>	15.10.1995	3	0,29	0,14	0,11	0,03	20	<u>1,95</u>	<u>0,63</u>	<u>0,77</u>	<u>0,67</u>	15.10.1995	3	0,38	0,16	0,14	0,03	19	<u>2,78</u>	<u>1</u>	<u>0,87</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,26	0,1	0,14	0,02	20	<u>2,76</u>	<u>0,93</u>	<u>0,84</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,25	0,1	0,07	0,03	19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5	0,34	0,12	0,1	0,03	20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24	0,11	0,07	0,02																														
19	<u>1,83</u>	<u>0,65</u>	<u>0,78</u>	<u>0,65</u>	15.10.1995	3																																																																																																
	0,29	0,14	0,11	0,03			20	<u>1,95</u>	<u>0,63</u>	<u>0,77</u>	<u>0,67</u>	15.10.1995	3	0,38	0,16	0,14	0,03	19	<u>2,78</u>	<u>1</u>	<u>0,87</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,26	0,1	0,14	0,02	20	<u>2,76</u>	<u>0,93</u>	<u>0,84</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,25	0,1	0,07	0,03	19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5	0,34	0,12	0,1	0,03	20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24	0,11	0,07	0,02																																									
20	<u>1,95</u>	<u>0,63</u>	<u>0,77</u>	<u>0,67</u>	15.10.1995	3																																																																																																
	0,38	0,16	0,14	0,03			19	<u>2,78</u>	<u>1</u>	<u>0,87</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,26	0,1	0,14	0,02	20	<u>2,76</u>	<u>0,93</u>	<u>0,84</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,25	0,1	0,07	0,03	19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5	0,34	0,12	0,1	0,03	20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24	0,11	0,07	0,02																																																				
19	<u>2,78</u>	<u>1</u>	<u>0,87</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4																																																																																																
	0,26	0,1	0,14	0,02			20	<u>2,76</u>	<u>0,93</u>	<u>0,84</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4	0,25	0,1	0,07	0,03	19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5	0,34	0,12	0,1	0,03	20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24	0,11	0,07	0,02																																																															
20	<u>2,76</u>	<u>0,93</u>	<u>0,84</u>	<u>0,67</u>	25.08.1996	4																																																																																																
	0,25	0,1	0,07	0,03			19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5	0,34	0,12	0,1	0,03	20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24	0,11	0,07	0,02																																																																										
19	<u>2,4</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,69</u>	06.09.1996	5																																																																																																
	0,34	0,12	0,1	0,03			20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5	0,24	0,11	0,07	0,02																																																																																					
20	<u>2,55</u>	<u>0,85</u>	<u>0,82</u>	<u>0,7</u>	06.09.1996	5																																																																																																
	0,24	0,11	0,07	0,02																																																																																																		

Примечание. № кон. – кодированное значение периода времени, в течение которого проводились измерения физиологических параметров на пробных площадях.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. КЛИМАТОГЕННАЯ И АНТРОПОГЕННАЯ ДИНАМИКА ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЕЕ ПРОИЗРАСТАНИЯ	7
1.1. Исследование биологических систем: переход от низкого к высокому логическому типу	7
1.2. Проблема оценки глобального и регионального изменений климата	11
1.3. Проблема оценки реакции растительных сообществ на изменение климата	16
1.4. Проблема оценки состояния древостоев в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами	19
Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ	26
2.1. Объекты и районы исследований	26
2.1.1. Климат Уральского региона во второй половине XX в. – начале XXI в.	26
2.1.2. Верхняя граница леса на горных массивах Полярного, Северного Южного Урала	26
2.1.3. Древесная растительность, антропогенные воздействия и мезоклимат в районе исследований на Среднем Урале	27
2.2. Методические аспекты анализа и моделирования климата	28
2.2.1. Методика анализа изменений значений температуры воздуха и осадков	28
2.2.2. Методика исследования пространственно-временной динамики климата с учетом рельефа местности	29
2.3. Методические аспекты анализа пространственно-временной динамики верхней границы леса	30
2.3.1. Методика сбора и обработки данных по древесной растительности на верхнем пределе ее распространения	30
2.3.2. Методика количественной оценки вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы леса	32
2.4. Метод автоматизированной оценки состояния деревьев по цифровым фотографиям их крон	34
2.5. Метрологические аспекты анализа изображений	38
2.6. Методические аспекты комплексной морфофизиологической оценки состояния деревьев и древостоев	42
2.6.1. Методики исследования реакции фотосинтетического аппарата хвои (<i>Pinus sylvestris</i> L.) на действие естественных и антропогенных факторов	42
2.6.2. Методики изучения взаимного влияния аэропромышленных загрязнений и мезоклимата и их действие на ростовые процессы деревьев сосны обыкновенной	43
2.6.3. Методика количественной оценки степени влияния естественных и антропогенных факторов на биометрические характеристики сосновых древостоев, произрастающих в условиях горного рельефа местности ..	45
2.6.4. Методы комплексной оценки состояния древостоев и экологического зонирования территорий	47
2.6.5. Методики комплексной морфофизиологической оценки состояния деревьев и экспресс-оценки их состояния с использованием цифровых фотографий крон	49
2.7. Характеристика экспериментальных объектов и объем выполненных работ	51
Глава 3. РЕАКЦИЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ДЕЙСТВИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ	54

3.1. Влияние аэропромышленных загрязнений и световых условий на фотосинтетический аппарат хвои сосны обыкновенной	54
3.2. Сравнительный анализ морфофизиологической оценки состояния деревьев и экспресс-оценки их состояния с использованием автоматизированной системы анализа изображений	59
3.3. Взаимное влияние аэропромышленных загрязнений и мезоклимата. Временная динамика ростовых процессов деревьев сосны обыкновенной	63
Глава 4. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ В ЗОНАХ ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ	71
4.1. Комплексная оценка состояния древостоев	71
4.2. Влияние аэропромышленных загрязнений на древостои в условиях сложно-расчлененного рельефа местности	76
Глава 5. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.	81
5.1. Анализ изменений климата в XX в. по данным инструментальных наблюдений на метеостанциях на Полярном, Северном и Южном Урале	81
5.2. Пространственно-временная динамика температуры и осадков на Урале во второй половине XX в.	85
Глава 6. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.	91
6.1. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Полярном Урале	91
6.2. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Северном Урале	95
6.3. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Южном Урале	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	110
ПРИЛОЖЕНИЯ	126

Научное издание

Валерий Владимирович Фомин

**КЛИМАТОГЕННАЯ И АНТРОПОГЕННАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВО
ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА**

Рекомендовано к изданию Ученым советом
Института экологии растений и животных и НИСО УрО РАН

Редактор **К.И. Ушакова**
Компьютерная верстка **Е.В. Илюшкиной, И.И. Глазыриной**

Дизайн обложки **Д.С. Капралова**

ISBN 978-5-7691-2113-5



9 785769 121135

НИСО УрО РАН № 92(09)—8. Сдано в набор 18.11.09.
Подписано в печать 23.12.2009. Формат 70×100 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 15. Тираж 300 экз. Заказ 292.

Оригинал-макет изготовлен в РИО УрО РАН.
620219, Екатеринбург, ГСП-169, ул. Первомайская, 91.

Типография «Уральский центр академического обслуживания».
620219, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91.