

76

*На правах рукописи*

Фомин Валерий Владимирович



**Климатогенная и антропогенная динамика древесной  
растительности в экстремальных условиях ее произрастания  
(на примере Урала)**

Специальности: 06.03.02 - лесоведение, лесоводство,  
лесоустройство и лесная таксация;  
03.02.08 – экология (биологические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора биологических наук

Екатеринбург- 2011

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научные консультанты: доктор биологических наук, профессор  
Шиятов Степан Григорьевич  
доктор сельскохозяйственных наук, профессор  
Залесов Сергей Вениаминович

Официальные оппоненты: доктор сельскохозяйственных наук, профессор  
Усольцев Владимир Андреевич  
доктор биологических наук, профессор  
Кулагин Алексей Юрьевич  
доктор биологических наук, профессор  
Харук Вячеслав Иванович

Ведущая организация: Институт биологии Коми научного центра УрО РАН

Защита состоится 29 сентября 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 при Уральском государственном лесотехническом университете по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 36, УЛК-26, ауд. 320.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат сельскохозяйственных наук



А. В. Бачурина

**Актуальность темы.** Глобальное и региональные изменения климата и усиливающееся агропромышленное загрязнение, обуславливает актуальность исследований климатогенной и антропогенной динамики древесной растительности (ДР) и объясняет большое количество работ, посвященных этому направлению научных исследований (Dale et. al., 2000; Hanson, Weltzin, 2000; Шиятов и др., 2002; Изменение климата: обобщ. докл..., 2003; Percya, Ferretti, 2004; Smidt, Herman, 2004; Изменение климата: обзор состояния..., 2005; Израэль, 2005; Монин, Сонечкин, 2005; Beringer et. al., 2005; Kang et. al., 2006; Израэль и др., 2007; Kullman, 2007; Soja et. al., 2007; Дюкарев, Пологова, 2008; Оценочный доклад..., 2008; Bytnerowicz et. al., 2008; Jacob, Vinner, 2009; Paoletti et. al., 2010; Изменение климата. Ежемесячный..., 2011). Дальнейший рост народонаселения, развитие промышленности, интенсификация сельского хозяйства и экстенсивное лесопользование будут приводить к усилению антропогенного воздействия на окружающую среду, включая изменения климата. Поэтому исследование климатогенной динамики высокогорной древесной растительности в районах с низким уровнем антропогенной нагрузки и экстремальными климатическими условиями, а также ДР, произрастающей в условиях среднегорий и низкогорий в районах с высоким уровнем антропогенной нагрузки, включая загрязнения атмосферы промышленными выбросами, являются актуальными.

Несмотря на достаточно большое количество обобщающих публикаций и работ по математическому моделированию климата, диффузии и переносу агропромышленных загрязнений, а также анализу пространственно-временной динамики растительности, до сих пор отсутствует единый методологический подход, позволяющий рассматривать взаимное влияние агропромышленных загрязнений, климата и древесной растительности на разных временных и пространственных масштабах. Проведение такого рода исследований еще более усложняется из-за трудоемкости получения достаточного объема количественных данных, математической формализации описаний сложных биологических систем и процессов, протекающих в них. Следует также отметить, что очень часто проблема усугубляется сложностью получения необходимого объема достоверных данных о загрязнении окружающей среды и метеоданных суточного разрешения для больших территорий и на длительных временных интервалах. Это может быть обусловлено организационно-бюрократическими причинами, высокой стоимостью данных, чрезвычайной трудоемкостью или невозможностью их самостоятельного сбора на больших территориях в течение длительных временных интервалов. Одной из важнейших задач при изучении воздействия на древесную растительность

естественных и антропогенных факторов является разработка подходов и методов объективной количественной оценки состояния древесной растительности и анализа изменения значений параметров ее местоположения в пространстве. Такая постановка задачи требует изучения ДР как на уровне организма, так и на надорганизменных уровнях организации.

Проведение фундаментального исследования динамики древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания на разных временных и пространственных масштабах, интегрирующего в рамках единого подхода методы широкого спектра научных дисциплин, является актуальным. В настоящей работе приведены результаты такого исследования.

#### **Цель и задачи исследований**

Цель работы – исследование динамики древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания во второй половине XX века (на примере Урала) на разных временных и пространственных масштабах. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать методологический подход и комплекс количественных методов анализа динамики древесной растительности, произрастающей в условиях изменения климата и антропогенных воздействий.

2. Исследовать влияние особенностей мезоклимата на микроклимат лесных биогеоценозов, находящихся в зонах с разными уровнями атмосферного загрязнения медеплавильного производства, а также изучить особенности ростовых и физиологических процессов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в этих условиях.

3. Изучить пространственные закономерности изменения состояния древостоев, произрастающих в условиях горного рельефа под воздействием атмосферных загрязнений медеплавильного производства.

4. Исследовать пространственно-временную динамику климата Уральского региона и древесной растительности в высокогорьях Урала во второй половине XX в.

#### **Научная новизна и теоретическая значимость работы**

Разработан методологический подход к анализу динамики древесной растительности на разных пространственных и временных масштабах на основе парадигмы исследования сложных биологических систем (Бейтсон, 2007). Работа продолжает и развивает достижения в области изучения влияния на древесную растительность естественных и антропогенных факторов (Шавнин и др., 1988, 1993; Шиятов, 2002; Shyatov, 1993; Shavnin et. al., 1997; Shavnin, 1999). В рамках данного подхода разработан комплекс методов количественной оценки состояния древостоев, смещения границ растительных рубежей и экологического зонирования территорий.

Ниже приведены новые и впервые проведенные исследования.

1. Изучены особенности преобразования световой энергии фотосинтетического аппарата хвои сосны обыкновенной, сформировавшейся в условиях с разными уровнями атмосферного загрязнения и освещенности.

2. Проведены сравнительные исследования сезонной динамики физиологических характеристик хвои сосны обыкновенной в зонах с разными уровнями аэропромышленного загрязнения в конце XX и начале XXI вв.

3. Исследованы отдельные аспекты взаимодействия климата и аэропромышленных загрязнений, а также изучена взаимосвязь значений характеристик мезоклимата исследуемой территории и микроклимата лесных насаждений.

4. Созданы картографические модели высокого пространственного разрешения, характеризующие изменение значений характеристик климата в пространстве и времени, для высокогорий Уральского региона (с учетом рельефа) во второй половине XX в.

5. Созданы серии разновременных тематических карт с границами редколесий и сомкнутых лесов на горных массивах Полярного, Северного и Южного Урала.

6. Проведен количественный анализ вертикального и горизонтального сдвигов границ редколесий и сомкнутых лесов в экотоне верхней границы древесной растительности в высокогорьях Урала во второй половине XX в. и произведена оценка скорости сдвигов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Реакции фотосинтетического аппарата хвои сосны на действие аэропромышленных загрязнений и затенения, выражающиеся в снижении квантовой эффективности преобразования световой энергии и скорости нециклического электронного транспорта, а также увеличении диссипации световой энергии при высоких уровнях освещенности, являются неспецифическими. Снижение эффективности преобразования световой энергии, вызванное действием загрязнений и затенения, определяется общим механизмом энергообмена в хлоропластах.

2. В условиях атмосферного загрязнения наблюдается снижение амплитуды суточных колебаний температуры, а выпадение осадков способствует увеличению концентрации взвешенных веществ в приземном слое воздуха. Высокий уровень загрязнений атмосферы промышленными выбросами, приводящий к снижению густоты древостоев и сомкнутости крон деревьев, сопровождается существенным изменением микроклиматических условий, которые приводят к задержке начала возрастания ассимиляционной активности деревьев в весенний период по сравнению с деревьями, произрастающими в зоне с фоновым уровнем загрязнения. Особенности

мезоклимата, влияющие на микроклимат лесного биогеоценоза, могут способствовать усилению негативного воздействия аэропромышленных загрязнений на рост деревьев и структуру древостоев.

3. Геостатистические модели адекватно описывают пространственные закономерности изменения интегральных параметров состояния древостоев в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами крупного медеплавильного производства. Градиент изменения значений интегральных параметров, расположение, размер, и конфигурация зон с различным состоянием древостоев в значительной степени определяются особенностями взаимного расположения основного источника аэропромвыбросов и элементов макрорельефа района исследований.

4. Экспресс-метод автоматизированной оценки состояния деревьев по цифровым изображениям их крон позволяет повысить объективность и точность визуальной оценки степени угнетения деревьев в условиях негативного действия одного или нескольких экологических факторов. Разработанный метод выявления уязвимых сторон и недостатков методик измерений (МИ), основанных на использовании систем автоматизированного анализа изображений является универсальным и может быть использован при исследовании МИ по изображениям объектов, полученным на макро- и микро-уровнях.

5. Картографические модели пространственного распределения значений температуры воздуха, полученные с использованием мультивариантных методов и растрового моделирования в ГИС, позволяют адекватно оценивать распределение значений данного климатического показателя в пространстве. Метод количественной оценки значений вертикального и горизонтального сдвигов границ позволяет проводить анализ пространственно-временной динамики древесной растительности и оценивать скорость смещения растительных рубежей.

6. Во второй половине XX века произошел подъем границы редколесий и сомкнутых лесов в экотоне верхней границы древесной растительности (ЭВГДР) на горных массивах Полярного, Северного и Южного Урала. Он происходил в условиях потепления и увлажнения климата Уральского региона. Значения скорости вертикального сдвига редколесий и сомкнутых лесов на Полярном, Северном и Южном Урале во второй половине XX в. находятся в диапазонах 5-9 и 3-10 м за десятилетие соответственно. Скорость сдвига границ в значительной степени определялась не величиной потепления, а сочетанием комплекса экологических факторов, биологическими особенностями видов древесных растений, произрастающих в ЭВГДР, а также обеспеченностью семенами горно-тундровых участков, расположенных в верхней части экотона.

### Практическая значимость работы

Создана система экологического мониторинга лесов на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу. Карты-схемы состояния сосновых древостоев в данном районе, созданные с помощью специально разработанных методов комплексной оценки и экологического зонирования, были использованы Свердловской лесоустроительной экспедицией при проведении лесоустроительных работ Уральского учебно-опытного лесхоза.

Разработанные карты-схемы имеют практическое значение для оценки состояния лесов в районе исследования с целью дифференциации ведения в них лесного хозяйства. Разработанная технология сбора, обработки данных и экологического зонирования территории может быть использована при диагностике состояния деревьев и экологическом мониторинге лесных насаждений в других регионах РФ. Метод оценки состояния деревьев по цифровым фотографиям их крон может быть использован при проведении экспресс-оценки санитарного состояния лесов и создании системы экологического фотомониторинга древостоев, находящихся в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами. Метод выявления уязвимых сторон и недостатков методик измерений (МИ), основанный на использовании систем автоматизированного анализа изображений, является универсальным и может быть использован при исследовании биологических объектов по изображениям, полученным с использованием макро- и микро-съемки. Созданные в ходе работы геоинформационные базы данных, содержащие информацию о местоположении и структуре растительных сообществ высокогорий Урала являются важным элементом системы экологического мониторинга состояния высокогорной растительности Уральского региона.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения работы были представлены на 23 научных конференциях, совещаниях и семинарах, включая следующие: международная конференция «Measurement and Modeling in Environmental Pollution» (Мадрид, 1997); седьмой международный конгресс по экологии (Florence, Italy, 1998); первый международный симпозиум по загрязнению окружающей среды «Issues in environmental pollution 98» (Denver, Colorado, USA, 1998); международная конференция «Экология таежных лесов» (Сыктывкар, 1998); международная научно-техническая конференция «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2001); французско-российский научный семинар (Екатеринбург, 2001, 2003); международная конференция «Физиология растений – основа фитобиотехнологии» (Пенза, 2003); международная конференция «Climate Changes and Their Impact on the Boreal and Temperate Forest» (Екатеринбург,

2006); Всероссийская научная конференция с международным участием «Новые методы в дендрэкологии» (Иркутск, 2007).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка цитируемой литературы и 11 приложений, изложена на 310 страницах машинописного текста, включает 14 таблиц, и 46 рисунков. Список литературы содержит 430 наименований, в том числе 108 иностранных.

**Личный вклад автора.** Все выносимые на защиту результаты и положения получены лично автором или при его непосредственном участии.

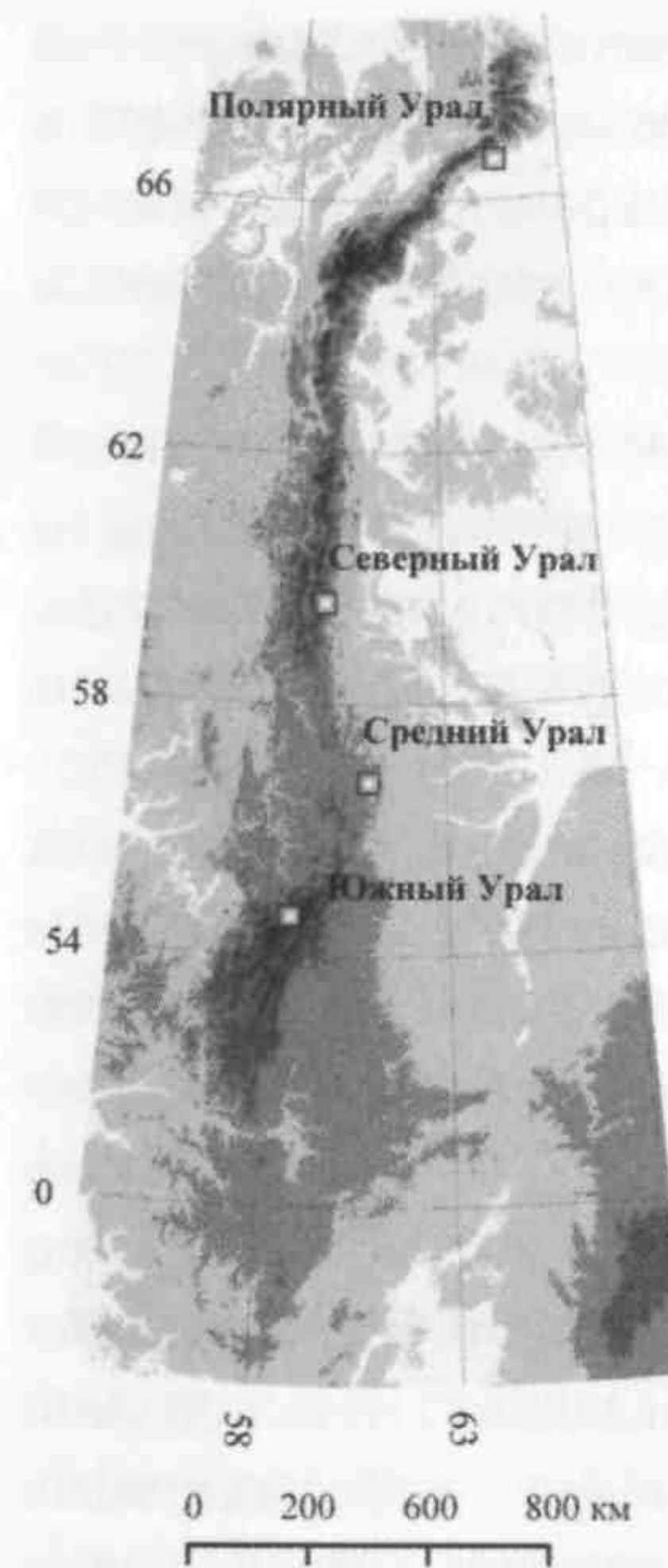
## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ КЛИМАТОГЕННОЙ И АНТРОПОГЕННОЙ ДИНАМИКИ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В данной главе приведено описание современного состояния проблемы загрязнения окружающей среды аэропромышленными выбросами и различные аспекты их воздействия на древесную растительность (Кулагин, 1966; 1974; Илькун, 1978; Крэнг, 1982; Барахтенова, Николаевский, 1988; Ромашкевич, Обухов, 1991; Алексеев, 1993; Черненкова, Макаров, 1996; Javorski, 2003; Mogerstroft et. al., 2006). Также описаны результаты исследований глобального и региональных изменений климата (Будыко, 1980; Briffa at. al., 1995; Борзенкова, 1999; Израэль, 2001; Монин, Сонечкин, 2005), включая реконструкции и результаты моделирования климата Уральского региона, а также реакции древесной растительности на глобальное и региональные изменения климата в различных регионах земного шара (Израэль и др., 2001; Изменения климата..., 2003; Израэль и др., 2007), в том числе на Урале (Шиятов и др. 2002; 2005; 2007).

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

Исследование изменений климата, загрязнения окружающей среды, антропогенной и климатогенной трансформации наемных экосистем требуют использования подходов, позволяющих связывать воедино и объяснять феномены, относящиеся к разным уровням организации, различным временным и пространственным масштабам. Для изучения влияния аэропромышленных загрязнений и климата на древесную растительность был выбран район исследований, расположенный на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, Средний Урал, г. Ревда, Россия). Для оценки климатогенной пространственно-временной динамики верхней границы леса были выбраны три модельных территории — горные массивы на Полярном, Северном и Южном Урале: Рай-Из, Тылайско-Конжаковско-Серебрянский и Иремель (рис. 1).

При исследовании динамики древесной растительности, произрастающей в условиях атмосферного загрязнения медеплавильного производства, были отобраны наиболее информативные параметры, характеризующие состояние деревьев. На следующем этапе исследований производилось обобщение данных, классификация состояния древостоев на основе комплекса морфометрических характеристик, построение поверхностей состояния, с их последующим анализом. На его основе на следующем этапе были проведены исследования взаимодействий аэропромышленных загрязнений, климата и древесной растительности, которые позволили получить новые данные о процессах, происходящих в лесных сообществах, находящихся в зонах атмосферного загрязнения. Этапы проведенных исследований очень похожи на



уровни анализа сложных биологических и социальных систем, разработанных Г. Бейтсоном на основе теории логических типов Б. Рассела и А. Уайтхеда (Бейтсон, 2007). Теория логических типов была создана для решения ряда математических проблем. Позже ее достижения были использованы в теории коммуникации и при описании социальных и биологических процессов (Кузнецов, Баксанский, Гречишкина, 2006). Переход от низкого логического типа к более высокому является шагом от информации о событии к информации о классе событий. Абстрактному переходу от класса к классу классов в биологических системах можно сопоставить переход от одного уровня структуры к другому или переходу между уровнями (порядками) рекурсии. Из общего закона, сформулированного Б. Расселом, который определяет взаимоотношения между классами информации разных логических уровней, следует, что изменения происходящие на более высоком логическом уровне почти всегда вызывает комплекс изменений на низших уровнях. Данное утверждение было учтено при планировании исследований. Таким образом, предложенная Бейтсоном парадигма, позволяет выделять уровни анализа, соответствующих уровням структуры сложных систем и исследовать взаимоотношения между ними.

Изучение древесной растительности в экотоне верхней границы леса на Полярном, Северном и Южном Урале было проведено на разных уровнях анализа, отражающих уровни структуры исследуемых систем: описание древесной растительности в экотоне верхней границы леса → создание картографических моделей, характеризующих видовой состав и местоположение древесной растительности во второй половине XX века → изучение взаимодействий, определяющих различия, выявленные на предыдущем уровне анализа. Возможность количественной оценки изменений пространственного положения древесной растительности на основе разработанной оригинальной методики позволило выполнить следующий этап анализа — оценку значений скорости сдвига границ редколесий и сомкнутых лесов на территории, характеризующейся значительной широтной протяженностью. Наличие этих результатов обусловило необходимость получения количественных оценок пространственно-временной динамики климата на Урале на основе картографических моделей высокого пространственного разрешения.

Таким образом, исследования климатогенной и антропогенной пространственно-временной динамики древесной растительности и климата на Урале проведены с использованием единого методологического подхода, предусматривающего необходимость рассмотрения исследуемых феноменов на разных пространственных и временных масштабах.

Район исследований на Среднем Урале представляет собой полигон прямоугольной формы с размерами сторон 45 x 45 км. Восточная сторона района исследований примыкает к границе города Екатеринбурга. Объекты исследований — сосновые древостои искусственного и естественного происхождения, произрастающие на разном удалении от СУМЗа. Изучение реакций ростовых характеристик деревьев и 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 (Фомин, Шавнин, 2001; Фомин и др. 2001; Фомин и др., 2007).

Исследование реакции фотосинтетического аппарата хвои сосны (*Pinus sylvestris* L.), сформировавшейся в разных световых условиях с разными уровнями загрязнения атмосферы промышленными выбросами СУМЗа, проводилось на временных пробных площадях (ВПП), расположенных в зонах с высоким, средним и фоновым уровнями загрязнения. Для лабораторного изучения срезали побеги предыдущего года закладки из верхней, средней и

нижней частей крон деревьев южной экспозиции. При помощи флуориметра РАМ-2000 (Walz, Германия) были проведены измерения параметров быстрой флуоресценции хлорофилла *a* на неотделенной от побегов хвое.

Определение содержания хлорофиллов *a* и *b* в хвое производили путем экстрагирования 80% раствором ацетона с последующим измерением оптической плотности экстракта на спектрофотометре СФ-46 (ЛОМО, Россия) на длинах волн 649 и 665 нм. Концентрации пигментов рассчитывали по уравнениям Вернона (Гродзинский А. М., Гродзинский Д. М., 1973 с. 434), а их количество в хвое представлено на сухой вес.

При определении валового содержания серы в хвое использовали методику, описанную в работе Ю. И. Маслова (1978). Измерение флуоресцентных характеристик проводили в трех, а определение содержания пигментов в хвое — в трех-шести биологических повторностях по каждому из трех ярусов кроны дерева. Определение содержания серы в растительном материале произведено в трех аналитических повторностях для средней пробы на каждый ярус. Свободную и связанную воду в хвое второго года определяли по методике, приведенной в работе С. С. Медведева с соавторами (1996).

Исследование ростовых процессов деревьев сосны на действие естественных и антропогенных факторов было проведено на трех постоянных пробных площадях (ППП) в сосновых древостоях естественного происхождения 60-88-летнего возраста, расположенных в зонах с высоким и фоновым уровнями загрязнения атмосферы промышленными выбросами. На основе данных перечета деревьев была произведена выборка 18-19 модельных деревьев с диаметрами, близкими к среднему. Дендрохронологические исследования были проведены с учетом общепринятых методик (Cook, 1985; Шиятов и др., 2000).

Для оценки климата района исследований были использованы данные инструментальных измерений метеорологических станций Михайловск (287 м над ур. м.), Ревда (324 м над ур. м.) и Екатеринбург (280 м над ур. м.) (Метеорологический ежегодник, 1962–2002). Значения концентраций взвешенных веществ и диоксида серы на метеорологическом посту, расположенном на расстоянии 9 км к северу от СУМЗа, предоставлены ГУ «Свердловский ЦГМС-Р».

Исследование сезонной динамики температуры воздуха на высоте 3 м и почвы на глубине 10 см на постоянных пробных площадях, расположенных в зоне с фоновым и высоким уровнями атмосферного загрязнения, было проведено с использованием автоматических термодатчиков (StowAway TidbiT Data Logger, Onset Computer Corp., США). На данных ППП в холодный период 2009—2010 гг. ежемесячно проводились снегомерные измерения, как в районе закладки даталоггеров, так и на всей пробной площади. Количество измере-

ний — не менее 60. Анализ мезоклимата в данном районе также был проведен с использованием данных инструментальных наблюдений суточного разрешения на метеостанции г. Ревда 1998—1999 и 2009—2010 г. (по данным сайта gr5.ru).

Для количественной оценки влияния аэропромышленных загрязнений на биометрические параметры естественных сосновых древостоев в условиях горно-увалистого рельефа предложен следующий подход. В геоинформационной системе (ГИС) была создана база данных, содержащая информацию о расположении и конфигурации таксационных выделов, а также значения лесоводственно-таксационных характеристики древостоев, произрастающих на территории Ревдинского лесничества, расположенного в юго-западной части района исследований. На основе лесоустроительных материалов и цифровой модели рельефа (ЦМР) были созданы растровые слои, содержащие количественную информацию о биометрических и лесоводственно-таксационных характеристиках древостоев, а также морфометрических параметрах рельефа. С использованием мультивариантных математико-статистических методов были выделены ведущие факторы, влияющие на величины средних диаметров и высот древостоев. На основе уравнений множественной линейной регрессии с помощью растрового моделирования в ГИС были созданы карты-схемы распределения значений биометрических характеристик, отражающие влияние аэропромышленных загрязнений на рост деревьев в условиях горного рельефа (Фомин, Шавнин, 2002).

Для оценки состояния древостоев, находящихся в условиях действия комплекса антропогенных факторов, разработана и апробирована методика экологического зонирования с использованием метода комплексной оценки состояния древостоев (Калинин и др., 1991; Shavnin et. al., 1997; Шавнин и др., 2000; Шавнин и др., 2002; Папулов и др., 2003; Шавнин и др., 2003). В основе модели лежит способ преобразования натуральных значений частных признаков в шкалу кодированных откликов. Последующий перевод в шкалу безразмерных желательностей или показателей состояния (ПС) производился с помощью функции Харрингтона. На основе величин ПС, рассчитанных по отдельным характеристикам, производился расчет обобщенного показателя состояния (ОПС) для каждой ВПП.

Всего в данном районе было заложено 140 ВПП прямоугольной формы в искусственных молодняках сосны обыкновенной с максимально совпадающими лесорастительными условиями. На всех ВПП были произведены стандартные лесоводственно-таксационные описания. На основании сплошного перечета (каждая ПП имела не менее 300 деревьев сосны обыкновенной) выделяли группу из 40 модельных деревьев с диаметрами, наиболее близкими к среднему. Для каждого дерева в группе был определен радиальный прирост ствола на высоте

1.3 м за последние 10 лет. У трех модельных деревьев были произведены измерения значений высоты и приростов по высоте за этот же период.

Из анализа были исключены ВПП значительно отличающиеся от других по условиям местопроизрастания или густоте. Расчет ОПС древостоев производился для 119 ВПП. Вычисление величин ПС и ОПС были выполнены отдельно для первого и второго классов возраста. На всех ВПП величины диаметров и высот были приведены к 15 и 30 годам для насаждений первого и второго классов возраста соответственно (Shavnin, Fomin, Marina, 1997).

Расчет поверхностей состояния древостоев на основе величин ОПС на ВПП выполнен с использованием метода пространственной интерполяции «кригинг» с использованием сферической и экспоненциальной моделей аппроксимации семивариансы (Webster, 1986; Oliver, Webster, 1990). На данных поверхностях были выделены зоны с разным состоянием древостоев. Проведение семивариансного анализа и создание поверхностей состояния было выполнено в геостатистическом пакете «GS+ for Windows» (Gamma Design Plus, США).

Для экспресс-оценки состояния древостоев был разработан алгоритм обработки и анализа цифровых фотографий крон деревьев в автоматизированной системе анализа изображений. Для оценки состояния дерева предлагается использовать изображение всей кроны (для отдельно стоящих деревьев) или верхней ее части (для деревьев в древостое). При разработке методики были использованы фотографии отдельных деревьев с разной степенью повреждения кроны, которые были получены с использованием цифровой зеркальной фотокамеры Canon EOS 350D (Фомин и др., 2008). Алгоритм обработки и анализа изображений реализован в программном модуле, созданном на базе платформы SIMAGIS (SIAMS, Россия и Smart Imaging Technologies, США).

В ходе исследований был разработан метод выявления уязвимых сторон и недостатков методик измерений, основанных на использовании систем автоматизированного анализа изображений, а также выполнена оценка показателей точности МИ. В качестве объекта для апробации подхода была выбрана описанная выше программа для анализа состояния деревьев по цифровым фотографиям их крон (Фомин и др., 2008).

Сравнительный анализ морфофизиологической оценки состояния деревьев и экспресс-оценки их состояния с использованием автоматизированной системы анализа изображений был проведен на 27 постоянных пробных площадях (ППП), расположенных на разном удалении от СУМЗа. ППП были подобраны парами так, чтобы в каждом конкретном месте относительно близко друг к другу располагались молодые и более старые сосновые древостои. В ряде случаев оказалось невозможно найти относительно

старые лесные насаждения рядом с молодыми, поэтому было заложено 15 ППП в сосновых молодняках (I—II класс возраста) искусственного происхождения и 12 ППП в древостоях IV—VII классов возраста. На каждой из них был проведен пересчет деревьев в соответствии с общепризнанными методиками (Огиевский, Хиров, 1974; ОСТ-56-69-83) и были подобраны 6—20 модельных деревьев с диаметрами, близкими к среднему. Для каждого модельного дерева был рассчитан обобщенный показатель состояния ( $ОПС_{морф}$ ) на основе двух показателей — диаметра на высоте 1,3 м и радиального прироста ствола за 5 лет.

У модельных деревьев на 15 ППП, заложенных в сосновых молодняках, дополнительно были определены высоты и приросты по высоте за последние 5 лет (по мутовкам). Также было проведено изучение пигментного состава хвои. Для учета сезонной динамики физиологических характеристик проводились повторные замеры на контрольных пробных площадях. На основе пяти показателей состояния (диаметр на высоте 1,3 м, радиальный прирост за 5 лет, высота, прирост по высоте за 5 лет, содержание хлорофилла *a*) был рассчитан обобщенный показатель состояния ( $ОПС_{морф+хл.}$ ). Методика его расчета аналогична той, что использовалась при определении  $ОПС_{морф}$ . На 12 ППП была произведена фотосъемка крон деревьев цифровым фотоаппаратом Canon EOS 350D. Полученные изображения были обработаны в программном модуле «Tree State Assessment». Для каждой пробной площади было обработано не менее 5 фотографий.

При проведении экологического зонирования использовали следующие градации величин  $ОПС$ : 27 баллов и ниже — очень плохое состояние; 28-37 — плохое; 38-47 — удовлетворительное и свыше 47 — хорошее. При оценке состояния древостоев по  $ОПС_{фото}$  были использованы следующие градации: менее 0,14 — хорошее состояние; 0,15-0,20 — удовлетворительное; 0,21 и выше — плохое.

На всех ППП были взяты образцы почв и проведено измерение содержания в них меди. Образцы были подготовлены к анализу по стандартной методике (Аринушкина, 1970) с использованием сита диаметром 0,312 мм. Измерение концентрации меди проводили по общепризнанной методике в вытяжках, полученных при обработке образцов азотной кислотой, на атомно-абсорбционном спектрометре «Спираль-14» ( $СКО < 7\%$ ).

В пределах экотона верхней границы древесной растительности на массиве Рай-Из преобладают чистые лиственничные (*Larix sibirica* Ledeb.) лесотундровые сообщества, на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском — ель сибирская (*Picea abovata* Ledeb.), кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour), береза извилистая (*Betula tortuosa* Ledeb.) и лиственница Сукачева (*Pinus sukaczewii* Dyl.) В нижней части экотона встречаются лиственничные редколесья и леса с

примесью ели сибирской и березы извилистой, на массиве Ирмель — ель сибирская и береза извилистая.

Исследования изменения температуры воздуха и осадков на Полярном, Северном и Южном Урале были проведены на основе данных трех станций: Салехард, Чердынь и Златоуст. Они имеют наиболее длинные и полные ряды значений метеорологических параметров в Уральском регионе. Высотное расположение станций: Салехард – 15 м над ур. м., Чердынь – 202 м над ур. м., Златоуст – 468 м над ур. м. Данные по среднемесячным температурам воздуха представлены с 1883 по 2000 гг., по осадкам – с 1891 по 2000 гг.

Для анализа временных рядов значений температуры и осадков выбраны следующие временные интервалы: год, весенний (март-май), летний (июнь-август), осенний (сентябрь-ноябрь), зимний (декабрь-февраль) периоды, вегетационный (май-август) сезон, а также холодный период (ноябрь-март). Предварительно были рассчитаны средние величины температуры воздуха по перечисленным выше временным интервалам. Аномалии средней температуры воздуха и суммарного количества осадков за каждый год были вычислены по разнице между текущим значением и средним в базовом периоде (1961—1990 гг.). Используемые при проведении исследований метеоданные из климатических справочников, характеризуют климатические показатели по месяцам, поэтому для оценки климатических условий и степени засушливости был использован условный показатель обеспечения растений влагой — плювиотермический коэффициент. Значение данного коэффициента рассчитывается как отношение количества выпавших осадков (мм) к сумме средних месячных температур за определенный временной интервал (Педь, 1975). Расчеты были выполнены для трех метеостанций с учетом смещения сроков начала и окончания вегетационного периода в зависимости от широтного расположения станций.

Исследование пространственно-временной динамики климата Уральского региона основано на метеоданных, полученных с 1961 по 2000 гг. Помимо указанных выше периодов (сезонов года, вегетационного и холодного) рассмотрены данные за каждые год, десятилетие и двадцатилетие (Фомин, 2008, 2009). Для анализа изменения температуры воздуха на Урале были выбраны 126 метеорологических станций. Пропущенные значения температуры на некоторых станциях были восстановлены с использованием статистических связей. Восстановление проводили для метеостанций, имеющих статистически значимые линейные зависимости между значениями температуры близлежащих станций, со схожим высотным расположением и необходимыми величинами этого показателя за пропущенные годы. Значения коэффициентов детерминации линейных моделей были выше 90,4 %. После процедуры восстановления массив метеоданных был разделен на тестовую и обучающую выборки, содержащие 30 и 70% значений от общего числа метеостанций в каждой соответственно.



На основе данных обучающей выборки для каждого временного периода были построены множественные линейные регрессионные модели вида

$$T = a_0 + a_1 \text{long} + a_2 \text{lat} + a_3 \text{dem}, \quad (1)$$

где  $T$  – средняя температура за период,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $a_0$  – свободный член;  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты при переменных;  $\text{long}$  – долгота, в.д, град.;  $\text{lat}$  – широта, с.ш., град.;  $\text{dem}$  – высота над уровнем моря, м.

Полученные уравнения позволили реконструировать температуру воздуха в районе исследований. Для представленных в работе средних значений температуры по десятилетиям и двадцатилетиям коэффициенты детерминации моделей множественной регрессии составили  $R^2 > 88,16\%$ . Сдвиг среднего значения колеблется от 0,14 до 0,2  $^{\circ}\text{C}$ , в последнее десятилетие возрастая до 0,32  $^{\circ}\text{C}$ .

В геоинформационной системе с использованием полученных уравнений были рассчитаны растры, ячейки которых содержат значения температуры воздуха. В качестве входных параметров модели были использованы цифровая модель рельефа Уральского региона (SRTM, размер ячейки растра составляет  $1,1 \times 1,1 \text{ км}^2$ ), а также растры с ячейками, содержащими значения широты и долготы. Для оценки изменения значений 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 метеостанции, которые расположены на Северном и Среднем Урале. Их выбор обусловлен тем, что только для этих станций есть полные ряды данных. Восстановление пропущенных значений для других метеостанций не проводилось, так как проверка количественной адекватности регрессионных моделей позволила установить, что они не пригодны для проведения данной процедуры.

Обработка данных заключалась в усреднении по рассматриваемым в работе десятилетним и двадцатилетним периодам суммарных годовых значений выпадающих осадков. Их распределение по территории Урала также представлено в виде карт-схем, на которых условными знаками показаны величины изменений средних суммарных значений осадков за указанный период. На основе метеоданных были рассчитаны пространственно осредненные среднегодовые аномалии.

Источником данных о положении границы сомкнутого леса на Полярном Урале в XX веке служили тематические карты лесотундровых сообществ и их границ в 1960 и 2000 гг.; на Северном Урале — в 1955 и 2005 гг., для района на Южном Урале — в 1973 и 2006 гг. Карты были созданы по специально

разработанным методикам (Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005; 2007; Капралов и др., 2006). Источником данных о расположении верхней границы сомкнутого леса в середине и конце XX века в районе исследований на Южном Урале также служили топографические карты масштаба 1:50000 и 1:100000, созданные в 1960 и 1990 гг. соответственно. Для анализа сдвига границы сомкнутого леса в районе исследований на Северном Урале были использованы лесоустроительные карты масштаба 1:25000, созданные в 1955—1956 и 1998 годах (Капралов и др., 2004).

Оценка горизонтального смещения границ редколесий и сомкнутого леса производилась по специально разработанному алгоритму в геоинформационной системе. Схема его иллюстрирующая представлена на рис. 2. От линии, характеризующей местоположение границы в начале исследуемого периода, были построены буферные области. Буфер — это область, точки границы которой удалены от каждой точки исходной линии, на заданное расстояние. В качестве исходной линии используется линия границы редколесий или сомкнутого леса в начале исследуемого периода. Величины буферов кратны размеру ячейки цифровой модели рельефа района исследований. В результате проведения данной процедуры создается слой, содержащий буферные области, последовательно сменяющие друг друга. После растеризации на него накладывается растровый слой границы 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 редколесий (или сомкнутого леса). Статистики распределения используются для количественной оценки величины горизонтального сдвига.

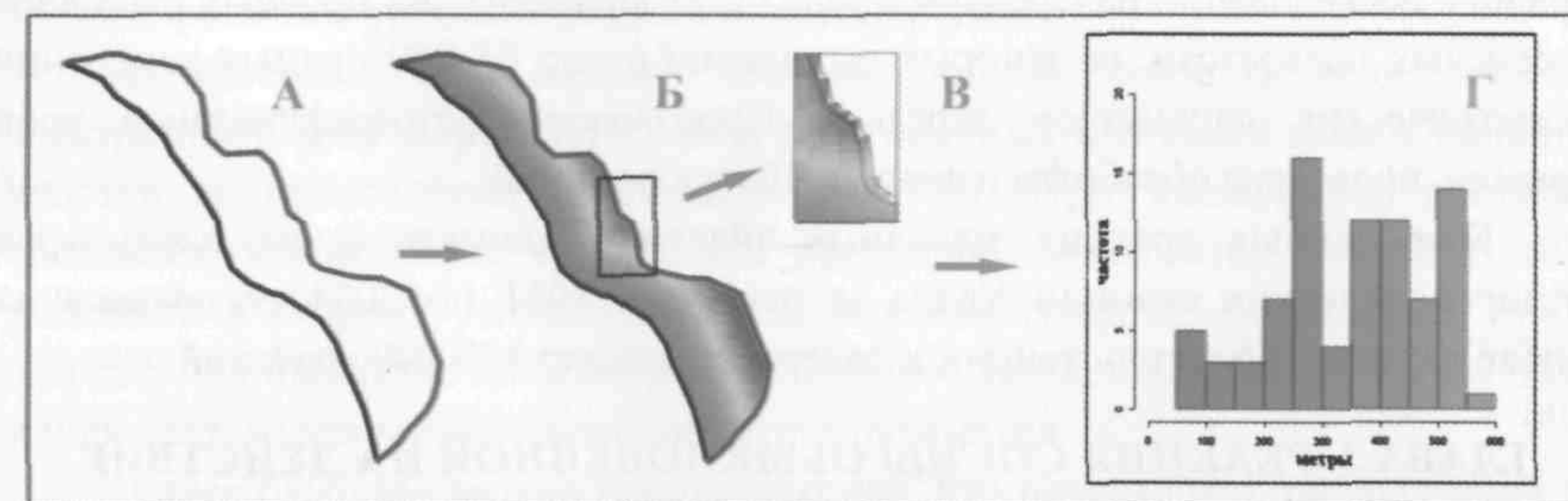


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая алгоритм оценки горизонтального сдвига границы

Для оценки вертикального смещения границы линейные слои границ в начале и конце исследуемого периода растеризуются и накладываются на цифровую модель рельефа. Информация о высоте каждой ячейки растрового слоя границ извлекается с цифровой модели рельефа. На основе этих данных строятся гистограммы распределения высот ячеек границы в начале и конце исследуемого периода. Статистики распределения используются для оценки величины вертикального смещения границы редколесий (или сомкнутого леса) за исследуемый период. Пространственный анализ 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](http://www.r-project.org)).

Ниже приведено краткое описание объема выполненных работ. В ходе исследований с использованием бумажных оригиналов топографических карт были созданы цифровые карты (изолинии и отметки высот, водные потоки, озера, дороги) масштабов 1:25000 и 1:100000 общей площадью 320 км<sup>2</sup>. На их основе были созданы цифровые модели рельефа.

Были обработаны 27 аэрофотоснимков районов исследований масштабов 1:25000—1:50000 залетов 1961—2000 гг., а также созданы геоинформационные базы данных лесотундровых сообществ на Полярном Урале (около 500 выделов и 10 000 описаний); лесных выделов на Северном Урале на основе лесоустроительных данных 1955—1998 гг. (около 7000 выделов и свыше 30 000 описаний). На их основе созданы шесть электронных карт-схем, характеризующих местоположение верхней границы редколесий и сомкнутого леса в районах исследований за период с 1955 по 2006 гг.

Установлены точки, с которых в XX в. производилось фотографирование высокогорных ландшафтов модельных территорий разными исследователями. Проведена геопривязка точек фотосъемки ландшафтных фотографий — 378 шт. В районе исследований на Среднем Урале было заложено 167 пробных площадей в сосновых древостоях, на которых выполнено около 65 000 прямых измерений биометрических параметров деревьев. Произведено фотографирование крон деревьев, проведена обработка и анализ 110 изображений.

База данных средних месячных значений климатических параметров метеорологических станций Урала за период с 1961 по 2004 гг. создана на основе данных 126 метеостанций и содержит и около 130 000 значений.

### ГЛАВА 3. РЕАКЦИЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ДЕЙСТВИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Отдельные показатели флуоресценции хлорофилла обладают достаточно высокой чувствительностью к действию атмосферных промышленных

загрязнений. Исследования влияния O<sub>3</sub> на флуоресцентные характеристики фотосинтетического аппарата (ФСА) листьев березы показали, что одним из следствий этого воздействия является снижение светового порога второй фазы световой кривой нефотохимического тушения флуоресценции (Shavnin et. al. 1999). 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. С целью решения этих вопросов и проверки высказанных предположений в настоящей работе проведено изучение характеристик фотосинтетического аппарата хвои сосны обыкновенной, сформировавшейся в условиях с разными уровнями освещенности и загрязнения атмосферы промышленными выбросами СУМЗ, путем сравнительного изучения пигментного состава хвои и световых кривых параметров быстрой флуоресценции хлорофилла *a*.

Установлено достоверное снижение содержания зеленых пигментов в хвое деревьев всех ярусов кроны с приближением к заводу. Величина отношения содержания хлорофиллов *a* и *b* (хл *a* / хл *b*) при этом возрастает. При слабой интенсивности света (менее 10-15 мкЕ/м<sup>2</sup>с) отличия между квантовой эффективностью нециклического электронного транспорта на участках с разным уровнем загрязнения атмосферы незначительны. При величине фотосинтетически активной радиации (ФАР) выше 15 мкЕ/м<sup>2</sup>с было выявлено существенное снижение значений этого параметра у хвои деревьев из зон с высоким и средним уровнями загрязнения атмосферы по сравнению с зоной с фоновым уровнем загрязнения (контроль).

В интервале 0-40 мкЕ/м<sup>2</sup>с световые кривые скорости нециклического электронного транспорта (ETR) хвои всех пробных площадей имеют линейные участки и практически совпадают (рис. 3). При увеличении плотности светового потока выше 40 мкЕ/м<sup>2</sup>с происходит отклонение зависимости от линейной в сторону уменьшения угла наклона графика. Возрастание уровня загрязнения вызывает снижение ETR. В более затененных частях кроны также наблюдается уменьшение значений этого параметра.

Ранее было высказано предположение, что первая фаза, наблюдаемая при низких уровнях ФАР, связана с переходом хлоропластов из состояния 1 в состояние 2 (Shavnin et. al. 1999), приводящем к уменьшению притока энергии на фотосистему II (ФСII). Принимая во внимание, что отличия как эффективности квантового выхода ФСII (Y), так и ETR у хвои разных ярусов на

начальных участках световых кривых незначительны, описанное выше уменьшение значений коэффициента нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла ( $qN$ ) можно объяснить увеличением диссипации световой энергии в светособирающих комплексах. Ввиду совпадения особенностей  $Y$  и  $ETR$  у хвои, выросшей в условиях затенения и при загрязнении, снижение величин  $qN$  хвои на пробных площадях с высоким и средним уровнями загрязнения атмосферы промышленными выбросами по сравнению с контролем также можно объяснить этим механизмом.

Низкий порог светового насыщения  $ETR$ , а также высокие значения коэффициента нефотохимического тушения флуоресценции  $qN$  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.

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.

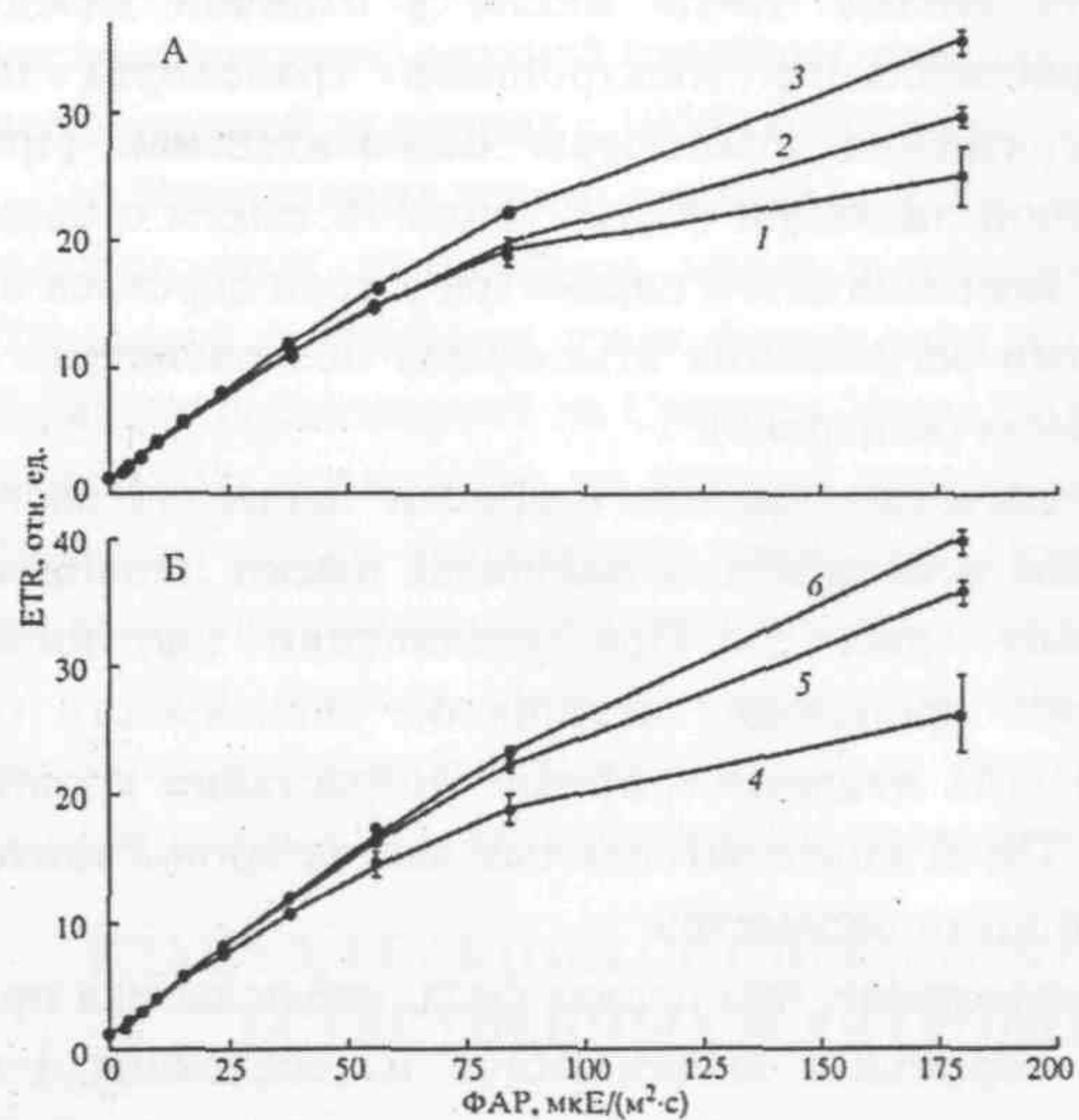


Рис. 3. Световые зависимости скорости нециклического электронного транспорта ( $ETR$ ) фотосинтетического аппарата хвои сосны, произрастающей в условиях с различными уровнями загрязнения атмосферы (А) и освещенности (Б).

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 на контрольной пробной площадке (фоновая зона). При величине стандартной ошибки менее 0,5 отн. ед. бары не показаны

Проведенные исследования позволили предложить при проведении комплексной оценки состояния древостоев использовать, наряду с содержанием хлорофиллов  $a$  и  $b$ , флуоресцентные характеристики фотосинтетического аппарата хвои: квантовую эффективность нециклического электронного транспорта, скорость нециклического электронного транспорта и коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции. Измерение данных характеристик должно производиться при величинах плотности светового потока выше  $100 \text{ мкЕ/м}^2\text{с}$  (Фомин и др., 2001).

Анализ сезонной динамики микроклимата в древостоях, произрастающих в условиях с высоким (ППП 9) и фоновым (ППП 4) уровнями загрязнения атмосферы промышленными выбросами, позволил установить ряд закономерностей в изменении микроклимата лесного биогеоценоза в импактной зоне. Снижение густоты древостоя, а также сомкнутости крон деревьев под влиянием аэропромышленных загрязнений, приводит к возрастанию величины суточной амплитуды температуры воздуха в древостое (рис. 4). Почва загрязненной пробной площади в летний период прогревается более значительно по сравнению с контрольным участком. В начале холодного периода, при незначительной глубине снежного покрова и низких температурах наблюдается более значительное (в несколько раз) промерзание верхнего горизонта почвы по сравнению с контрольной пробной площадью. Данное явление обусловлено тем, что в районе исследований преобладают ветры западного, юго-западного и юго-восточного направлений. При этом на пути движения воздушных масс находятся горные хребты (увалы), расположенные в западной части района. Это приводит к неравномерному распределению снегового покрова в районе: в импактной зоне, которая расположена в центре района, выпадает меньшее количество снега по сравнению с фоновой зоной, расположенной в его западной части.

Анализ содержания в хвое хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и катехинов свидетельствует о негативном воздействии поллютантов на фотосинтетический аппарат хвои деревьев на загрязненной пробной площади. На контрольной пробной площади наблюдается более раннее начало ассимиляционной активности деревьев сосны, которое проявляется в виде устойчивого возрастания содержания зеленых пигментов в хвое в конце апреля – начале мая (рис. 5).

Сравнительный анализ сезонной динамики содержания хлорофиллов  $a$  и  $b$  на ППП 4 и ППП 9 в 1998—1999 и 2009—2010 гг. позволил установить, что в 2010 году наблюдалось более раннее начало возрастания ассимиляционной активности деревьев сосны по сравнению с 1999 г. на обеих пробных площадях. При этом на контрольной пробной площади начало этого процесса наступало раньше, чем на загрязненной, как в 1999, так и 2010 г. Первое обусловлено тем, что теплый период 2010 года был более жарким, чем аналогичный отрезок времени 1999 г. Более раннее начало вегетационного сезона на ППП 4, по-

видимому, обусловлено тем, что на загрязненной ППП 9 снег сходит раньше и количество доступной почвенной влаги на данной участке меньше, чем на ППП 4.

Это происходит из-за того, что, во-первых, в импактной зоне выпадает меньше снега по сравнению с западной частью фоновой зоны. Во-вторых, более редкий и менее сомкнутый древостой загрязненной пробной площади, способствует лучшему прогреванию почвы и быстрому таянию снега. Ускорению процесса таяния также способствует выпадение пыли на поверхность снежного покрова, которая переносится на исследуемый участок со стороны горнобогатительной фабрики и шламоотвалов. В-третьих, на загрязненной пробной площади, значительная часть снеговой воды, стекает по поверхности почвы, о чем свидетельствует наличие многочисленных промоин.

Необходимо отметить, что содержание хлорофиллов *a* и *b* в 1998—1999 было ниже, чем в 2009—2010 гг. В 2010 году на СУМЗе было завершено процесс перехода на новую технологию производства, которая позволяет существенно снизить объемы выбросов завода. Однако, наиболее вероятно, что эффект возрастания содержания зеленых пигментов, по-видимому, имеет климатогенную природу, так как древостой на контрольной пробной площади и раньше не испытывал существенного воздействия со стороны СУМЗа.

Снижение оводненности хвои и содержания в ней свободной воды (см. рис. 5 Г), наблюдаемое в условиях высокого уровня атмосферного загрязнения, свидетельствует о появлении адаптационного синдрома, который характеризуется меньшей активностью метаболических процессов, для обеспечения которых нет необходимости сохранять большое количество свободной воды.

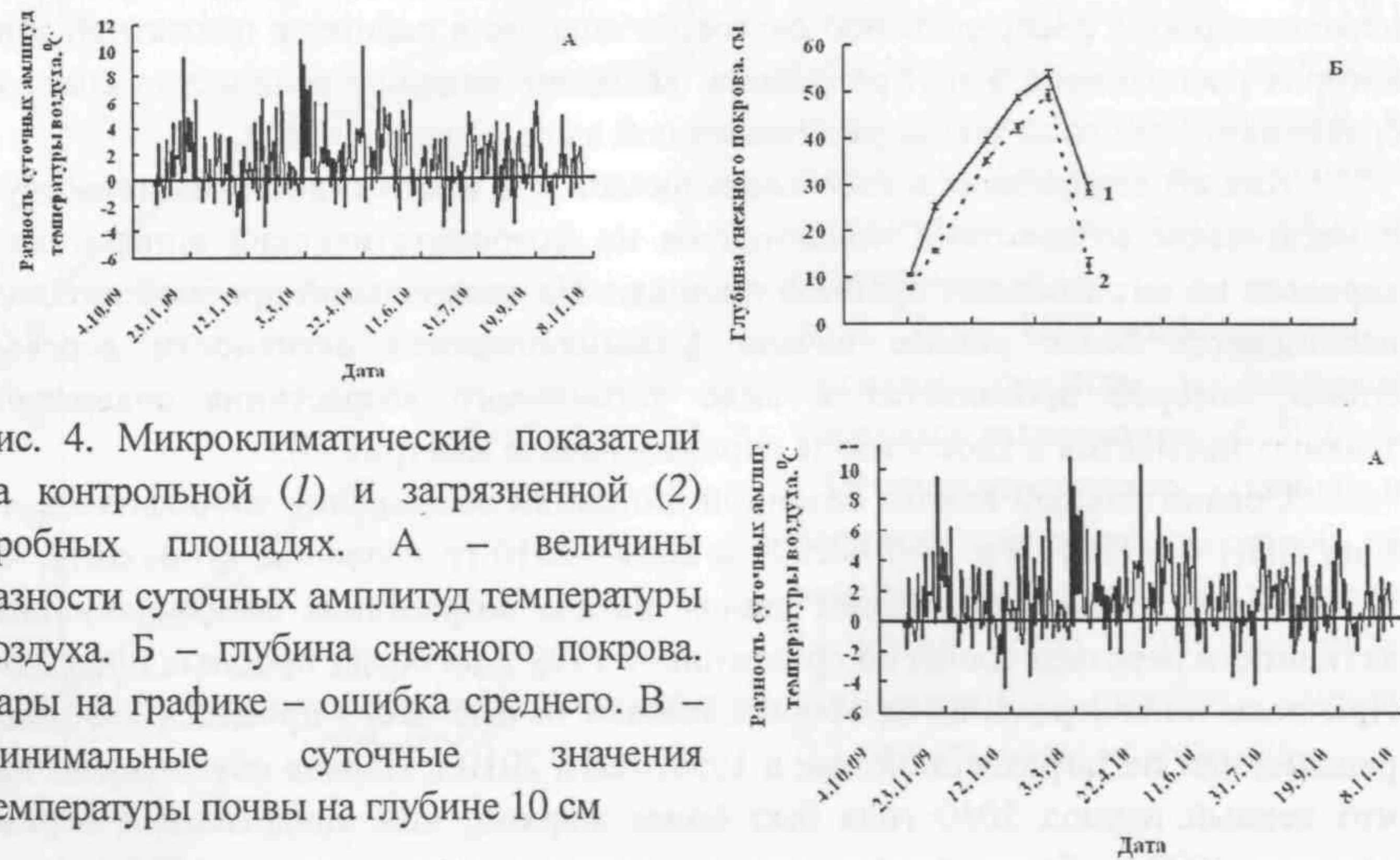


Рис. 4. Микроклиматические показатели на контрольной (1) и загрязненной (2) пробных площадях. А – величины разности суточных амплитуд температуры воздуха. Б – глубина снежного покрова. Бары на графике – ошибка среднего. В – минимальные суточные значения температуры почвы на глубине 10 см

Устойчивость к действию стрессовых факторов поддерживается за счет сохранения количества связанной воды на уровне, необходимом для обеспечения функционирования основных физиолого-биохимических процессов. Способность деревьев на ППП 9 сохранять на одном уровне содержание свободной воды в хвое связана с ее ксероморфной структурой, способствующей удержанию воды в условиях водного и температурного стресса.

Таким образом, установленные в ходе исследований закономерности свидетельствуют о том, что изменение значений климатических показателей на более высоком уровне анализа (мезоклимат), приводит к существенным изменениям на нижнем уровне (микроклимат) и может усиливать негативное воздействие атмосферных загрязнений на древесную растительность.

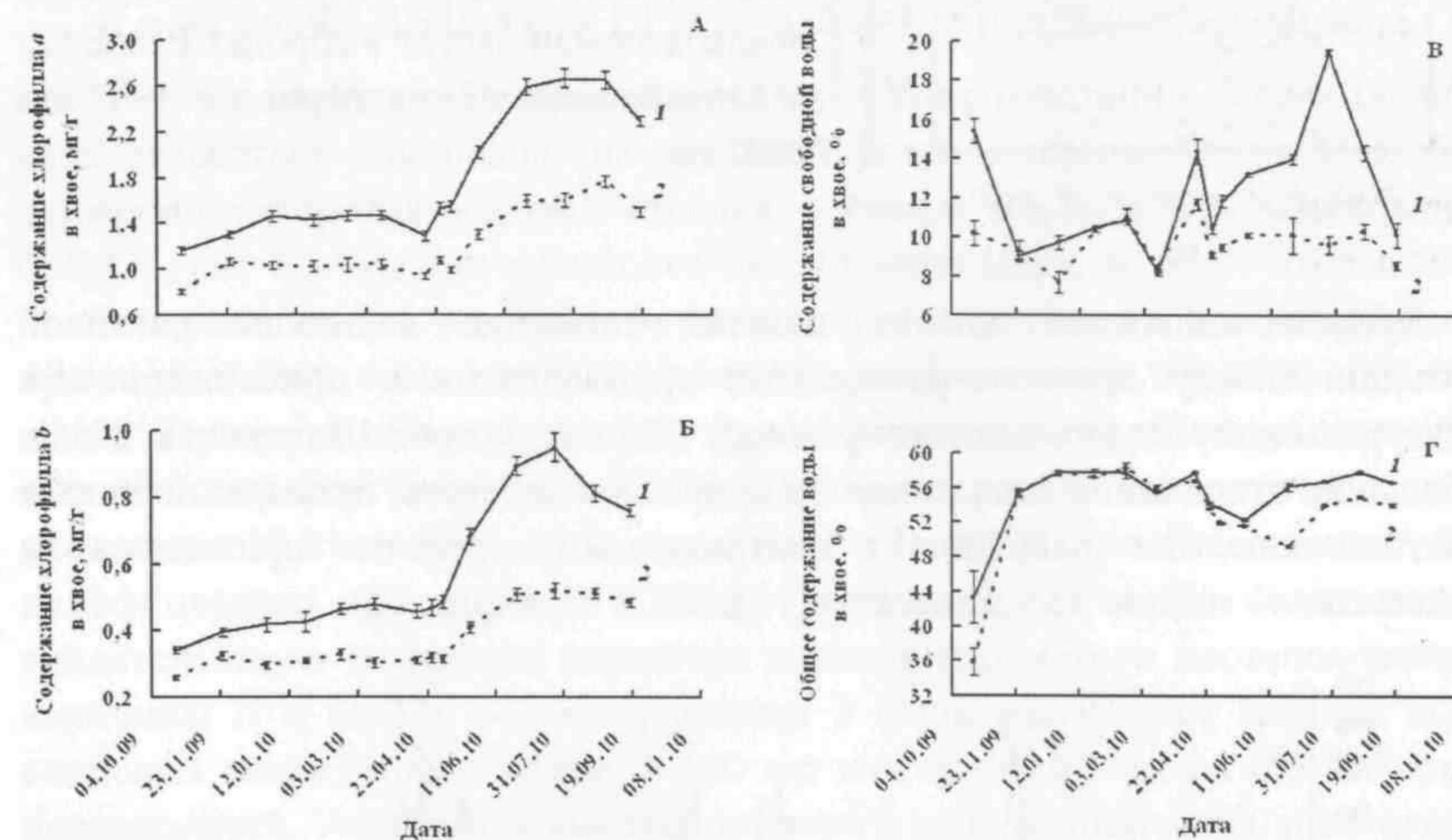


Рис. 5. Сезонная динамика содержания хлорофилла *a* (А) и *b* (Б), а также содержание свободной (В) и связанной воды (Г) в хвое деревьев на контрольной (1 – ППП 4) и наиболее загрязненной (2 – ППП 9) пробных площадях. Бары на графиках – значение ошибки среднего

Сравнительный анализ данных инструментальных измерений на метеостанциях, расположенных в зоне с высоким уровнем загрязнения атмосферы промышленными выбросами (г. Ревда) и в фоновой зоне (г. Михайловск), позволил установить, что в импактной зоне величины разности максимальной и минимальной суточных значений температуры, как правило,

меньше, чем в фоновой зоне. Данный факт, по-видимому, объясняется более высокой концентрацией взвешенных веществ и газов в атмосфере вблизи СУМЗа. Это приводит к сглаживанию суточных изменений температуры воздуха в районе задымления.

На рис. 6 приведены значения концентрации взвешенных веществ в воздухе и суммы осадков в мае-августе за 1992 – 2002 годы. Видно, что увеличение концентрации взвешенных веществ в течение периода вегетации сопровождается ростом количества осадков ( $R_{\text{спирм}} = 0,66$ ;  $\alpha < 0,05$ ). Выпадение осадков изменяет вертикальное распределение взвешенных веществ в воздухе, способствуя повышению их концентрации в приземном слое воздуха.

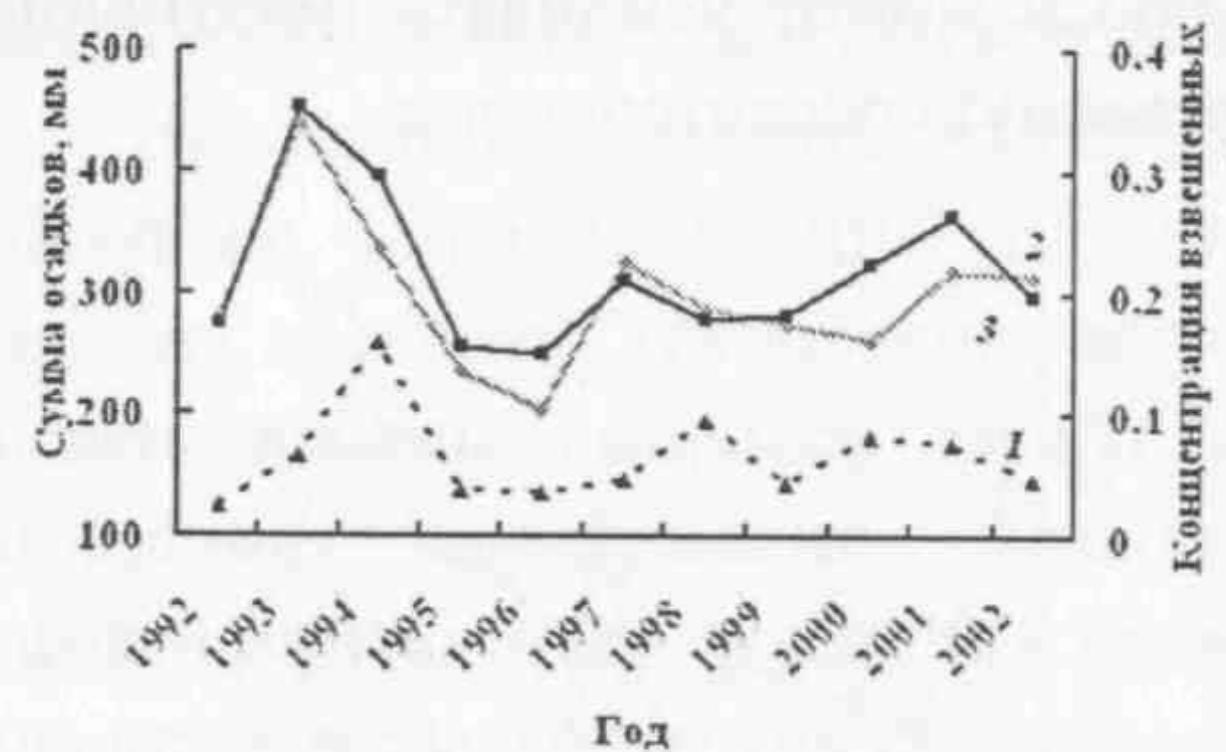


Рис. 6. Концентрация взвешенных веществ в воздухе (1) и суммы выпавших осадков за май-август в городах Ревде (2) и Михайловске (3) за период с 1992 по 2002 гг.

Древесно-кольцевой анализ показал снижение величины ранговой корреляции между древесно-кольцевыми хронологиями с приближением к Среднеуральскому медеплавильному заводу (Попов, Фомин, Шалаумова, 2011). Наибольшие отклонения хода индексов приростов деревьев, произрастающих в импактной зоне, по сравнению с контрольными деревьями приходится на семидесятые — начало восьмидесятых годов XX века (рис. 7).

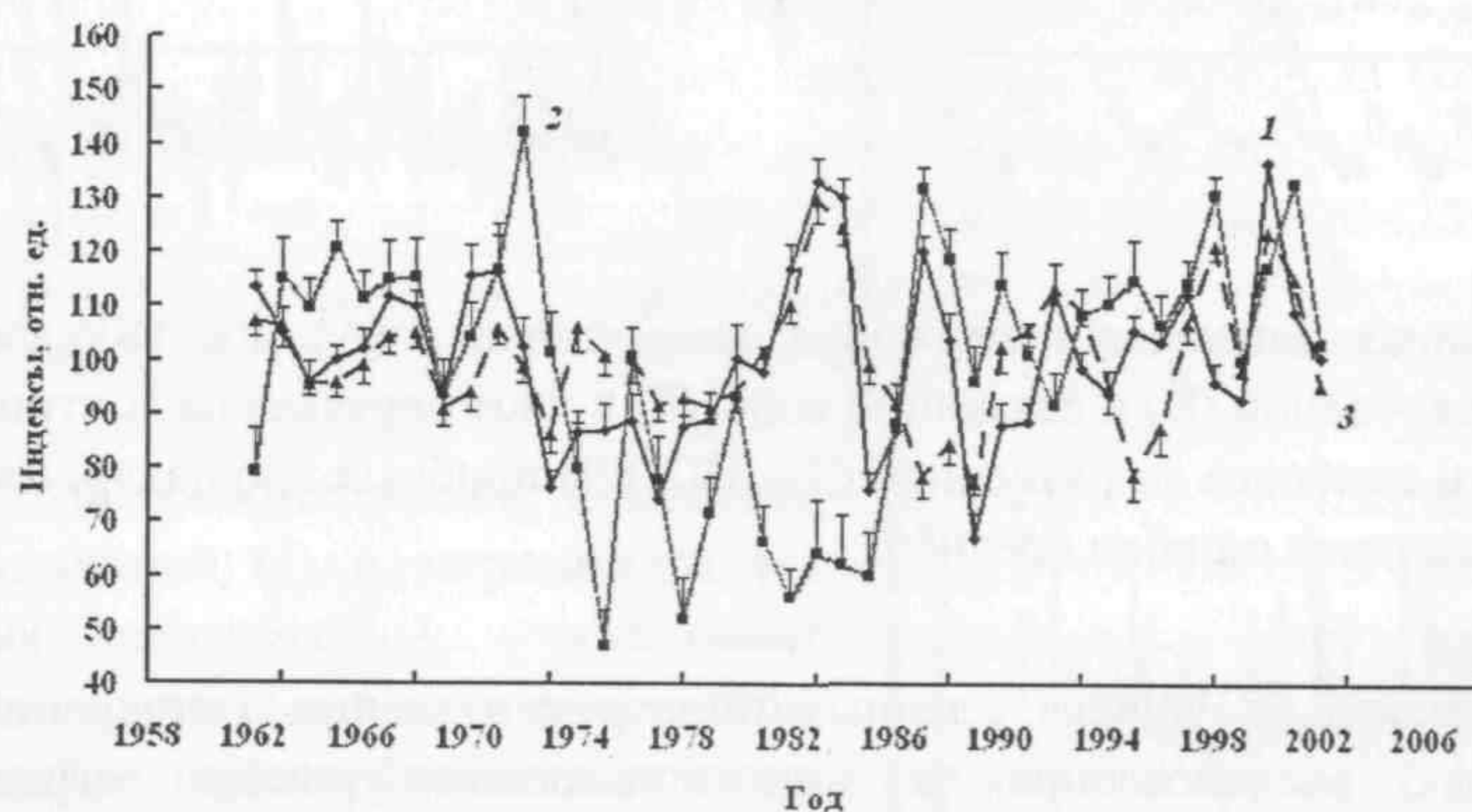


Рис. 7. Динамика индексов приростов сосновых древостоев в фоновой (1 — ППП 4 и 3 — ППП 16) и импактной зоне (2 — ППП 12). Бары на графиках — ошибка среднего. Чтобы не загромождать рисунок, они отложены в одну сторону

Семидесятые годы XX в. — одно из самых холодных десятилетий второй половины прошлого века. В этот же период на Среднем Урале наблюдалось сокращение количества осадков. Семидесятые и восьмидесятые годы XX века также характеризуются одним из самых уровней производства СУМЗа.

#### ГЛАВА 4. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ В ЗОНАХ ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Проведение множественного линейного регрессионного анализа позволило найти зависимость изменения значений среднего диаметра ( $D$ ) и высоты ( $H$ ) древостоя от возраста и параметров, характеризующих местоположение насаждений. Эти уравнения имеют вид

$$D^{1/2} = 2,150 + 0,040 Asp + 0,157 R - 0,005 E - 0,964 P + 0,517A^{1/2}, R^2 = 0,941, (2)$$

$$H = -25,979 + 0,348 Asp + 1,159 R - 0,018 E + 10,988 \ln A, R^2 = 0,956, (3)$$

где  $R^2$  — коэффициент детерминации;  $Asp$  — код экспозиции склона (величина кода возрастает для диапазона значений углов с шагом  $30^\circ$  от 1 до 5 при движении по/против часовой стрелки с севера на юг);  $R$  — расстояние до СУМЗа, км;  $E$  — высота местности над уровнем моря, м;  $P$  — относительная полнота, отн. ед.;  $A$  — возраст древостоя, лет. Константы и все коэффициенты при переменных статистически значимы с доверительной вероятностью 0,99 и выше. Проверка количественной адекватности модели была выполнена на тестовой выборке (Розенберг, 1989). Величина средней квадратичной ошибки составила 12,2 и 8,4% для уравнений (2) и (3) соответственно. Знаки коэффициентов при  $Asp$ ,  $R$  и  $E$  в уравнениях (2) и (3) совпадают, что свидетельствует о сходном характере влияния параметров местоположения на величины  $H$  и  $D$ . На основе уравнения 3 были рассчитаны средние высоты сосновых насаждений в возрасте 100 лет на тестовый участок ( $50 \text{ км}^2$ ) района исследований. Увеличение высоты местности над уровнем моря, расстояния до СУМЗа и снижение освещенности макросклона сопровождаются уменьшением величин средних диаметров и высот древостоев (Фомин, Шавнин, 2002; Фомин, Шавнин, 2004).

С использованием мультивариантных методов анализа и растрового моделирования с помощью ГИС можно проводить оценки величин 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 растровых моделей в ГИС в перспективе позволят увеличить ревизионный период при проведении лесоустроительных работ и снизить затраты на их проведение.

Содержание меди в почве является объективным показателем уровня техногенной нагрузки. Значения данного параметра на ППП коррелируют с величинами обобщенного показателя состояния древостоев, рассчитанных по значениям диаметров и радиальных приростов деревьев за последние 5 лет. Коэффициент корреляции ( $r$ ) между содержанием меди в почве и значениями обобщенного показателя, рассчитанного на основе морфометрических характеристик ( $ОПС_{морф}$ ) молодых (20-40 лет) и более старых (70-130 лет) древостоев, совпадает и равен  $-0,55$  ( $\alpha < 0,05$ ). Возрастание содержания меди в почве сопряжено со снижением величин обобщенного показателя, и, следовательно, ухудшением состояния древостоев.

Значения  $ОПС$  70-120-летних древостоев, рассчитанных по фотографиям крон деревьев ( $ОПС_{фото}$ ), также коррелирует с величиной содержания меди в почве ( $r = 0,55$ ,  $\alpha < 0,05$ ). С повышением содержания меди в почве наблюдается увеличение значения данного показателя, т. е. ухудшение состояния древостоев.

Анализ фотографий крон деревьев сосны старших возрастов позволил выделить три состояния древостоев (хорошее, удовлетворительное, плохое). Для получения объективной и более точной оценки состояния желательнее использовать не только показатели, которые характеризуют ростовые, но и физиологические процессы деревьев.  $ОПС_{морф}$  сосновых молодняков были дополнены данными о содержании хлорофилла  $a$  в хвое модельных деревьев. Коэффициент корреляции между  $ОПС_{морф+хл. a}$  и показателем загрязненности почвы медью составил  $-0,66$  ( $\alpha < 0,01$ ). Проведенные исследования свидетельствуют о том, что сосновые молодняки, произрастающие в районе действия СУМЗа, имеют лучшее состояние, чем древостои более старших возрастов.

Значения физиологических параметров, как правило, являются лабильными, поэтому их использование предпочтительно при проведении экспресс-оценки эпизодических и сильных воздействий. Использование физиологических параметров при оценке состояния древостоев отдельно от ростовых характеристик деревьев в зонах со средним и низким уровнем загрязнения атмосферы поллютантами могут приводить к завышенной оценке состояния. Применительно к старшевозрастным древостоям перспективным выглядит использование метода автоматизированного анализа цифровых изображений кроны. Причем этот метод может применяться как отдельно, так и в сочетании с методом комплексной морфофизиологической оценки состояния древостоев.

На рис. 8 приведены изображения поверхностей, построенных с использованием ЦМР и обобщенных показателей состояния древостоев, рассчитанных по комплексу морфометрических характеристик. Поверхность состояния была получена методом пространственной интерполяции «кригинг» на

основе значений  $ОПС$  на 119 ВПП (Фомин, 1998; Шейдеггер и др., 1998). На данном рисунке видно, что характерные изменения формы поверхности состояния совпадают с крупными элементами рельефа. В данном районе преобладают западные ветры. Этот фактор в сочетании с аэропромышленными загрязнениями СУМЗа, а также негативными воздействиями г. Екатеринбурга (прилегает непосредственно к восточной части района исследований), в значительной степени обуславливает расположение участков с низкими значениями  $ОПС$ , т. е. с относительно плохим состоянием древостоев (Фомин, Шавнин, 2001).

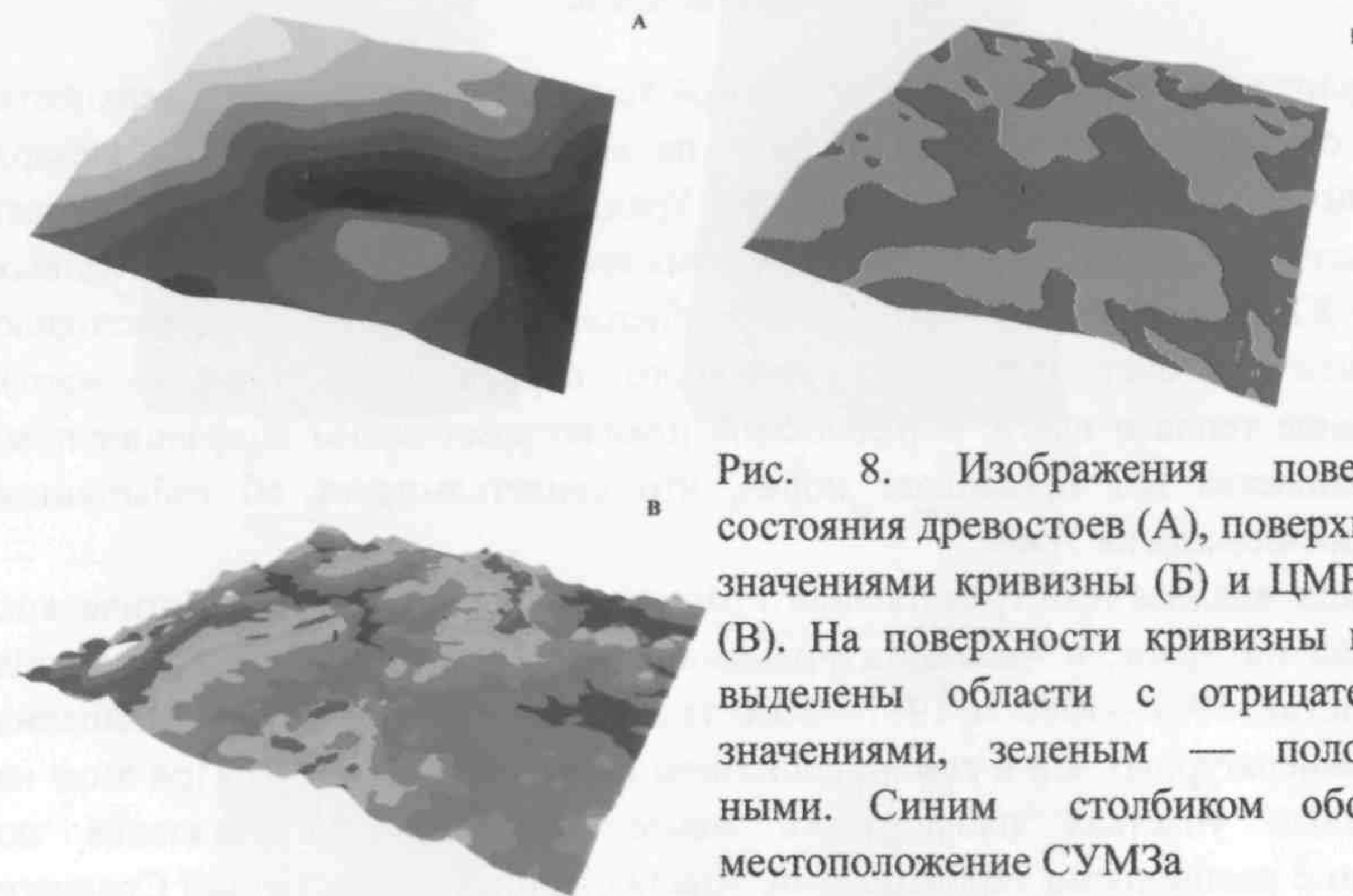


Рис. 8. Изображения поверхности состояния древостоев (А), поверхности со значениями кривизны (Б) и ЦМР района (В). На поверхности кривизны красным выделены области с отрицательными значениями, зеленым — положительными. Синим столбиком обозначено местоположение СУМЗа

Изменение в пространстве значений  $ОПС$  древостоев или содержания поллютантов в субстрате характеризуют морфологические характеристики статистической поверхности — значения градиента и кривизны. Смена знака кривизны характеризует смену характера изменений значений исследуемого параметра (роста или снижения). Использование нулевого значения кривизны поверхности позволяет сегментировать ее на области, однородные по характеру изменений (Фомин, Николаев, 2011). В пределах каждой из этих областей становится возможным более детальный анализ причин, обуславливающих размер, форму, конфигурацию зон, а также диапазон изменения значений параметра состояния, которые можно оценить при помощи зональных функций в геоинформационной системе (Фомин и др., 2003).

Приведенные на рис. 8 поверхности иллюстрируют опосредованное, через мезо- и макрорельеф, действие комплекса экологических факторов на состояние древостоев. Следующим этапом изучения состояния лесов, логически вытекающем из предыдущих этапов исследований в рамках

использования предложенного методологического подхода, должна быть оценка величины скорости и ускорения дигрессионных или демулационных процессов в лесных насаждениях. Эти показатели относятся к более высоким логическим типам информации (Бейтсон, 2007). Изучение динамики значений показателей состояния в пространстве и времени, включая разработку оригинальных методик, является предметом самостоятельного исследования в будущем.

## ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.

Анализ временных рядов среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли и суммарного количества осадков на метеостанциях городов Салехард (Полярный Урал), Чердынь (Северный Урал) и Златоуст (Южный Урал) свидетельствует о наличии трендов возрастания температуры и суммарных годовых осадков в XX веке. При этом увеличение среднегодовой температуры происходило в основном за счет потепления холодного периода года (ноябрь—март). Соотношение тепла и влаги, определяемое пльвиотермическим коэффициентом, для большинства лет превышает норму, что свидетельствует об избыточном увлажнении климата на Урале.

В ходе анализа пространственного распределения значений климатических показателей на Урале, в частности при сопоставлении температурных карт для двадцатилетий 1961—1980 и 1981—2000 гг., установлена тенденция смещения границ температурных зон в северо-восточном направлении (рис. 9). При этом на возвышенных участках наблюдалось менее значительное потепление по сравнению с равнинными территориями. Анализ данных метеостанций Среднего Урала позволил установить факт увеличения количества суммарных годовых осадков. Результаты проведенных исследований, включающих рассмотрение особенностей рельефа, позволяют конкретизировать значения климатических показателей и детализировать климатическую карту региона. Анализ изменений климата на Урале во второй половине XX в. свидетельствует в пользу гипотезы о климатогенной природе процесса подъема древесной растительности на горных массивах (Шалаумова, Фомин, Капралов, 2010).

Модели расчета климатических карт позволяют учесть широтное, меридиональное и высотное положение участка местности, для которого производится оценка значения температуры, а построенные на их основе климатические карты – оценить изменение средних региональных значений температуры. Наличие такого рода количественной информации на уровне региона необходимо при проведении анализа пространственно-временной динамики древесной растительности в экотоне верхней границы леса на Полярном, Северном и Южном Урале.

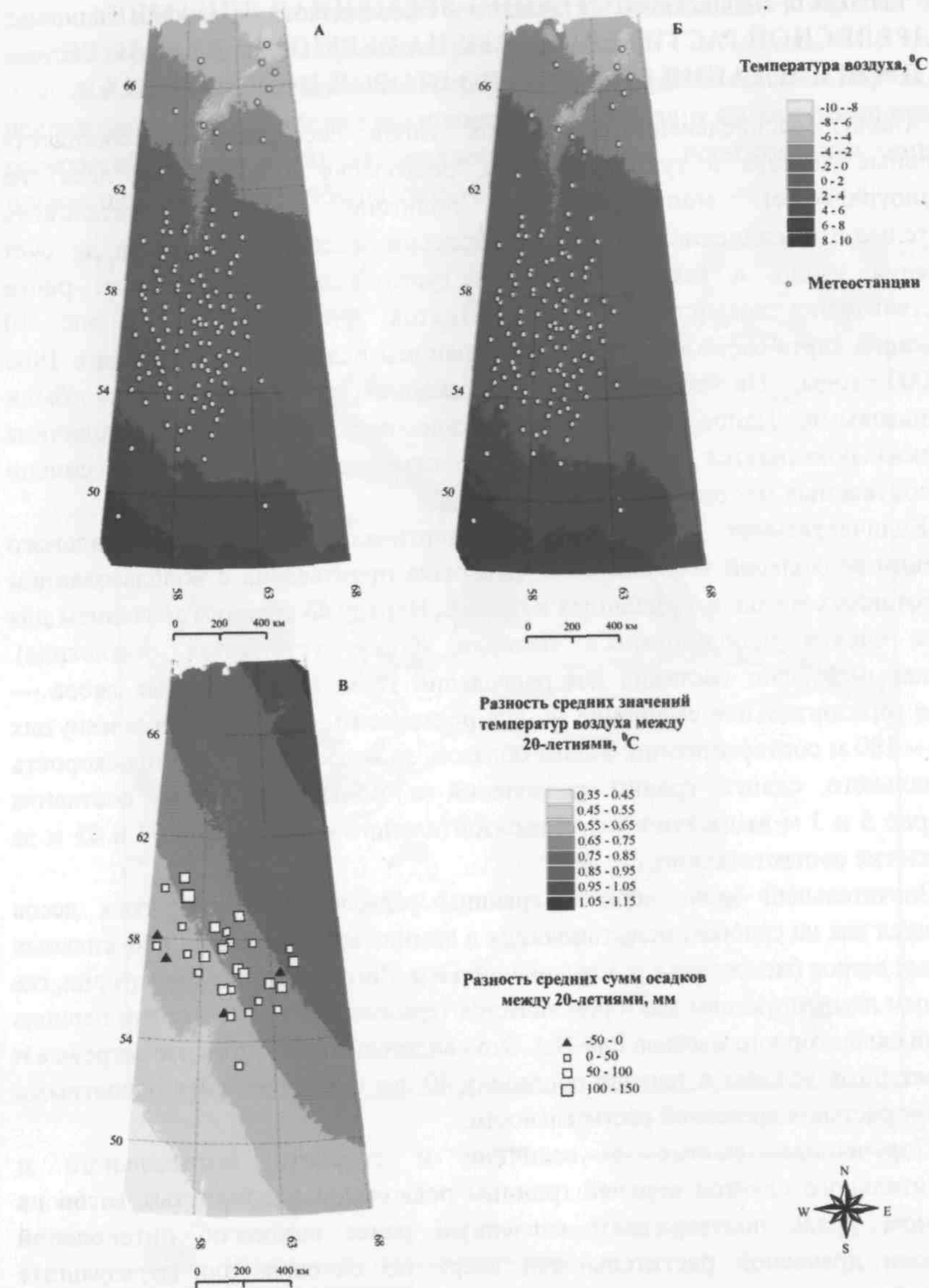


Рис. 9. Распределение значений средней годовой температуры воздуха по двадцатилетиям по территории Урала. А — 1961—1980 гг.; Б — 1981—2000 гг.; В — распределение значений разности средних годовых температур и осадков между двадцатилетиями

## ГЛАВА 6. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ ЕЕ ПРОИЗРАСТАНИЯ НА УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.

Анализ распределения различных типов лесотундровых сообществ (отдельные деревья в тундре, редины, редколесья и сомкнутые леса) на Полярноуральском мониторинговом полигоне позволил установить значительное увеличение площади редколесий и сомкнутых лесов за счет облесения тундр, а также увеличения густоты и продуктивности ранее существовавших древостоев (Чехлов, Шиятов, Фомин, 2002). На рис. 10 изображена карта-схема сдвига верхней границы редколесий за период с 1960 по 2000 годы. На разных участках склонов величины сдвигов были неодинаковыми. Наиболее часто отсутствие или незначительная величина смещения объясняется наличием крутых каменистых склонов или сильно ветрообдуваемых местообитаний.

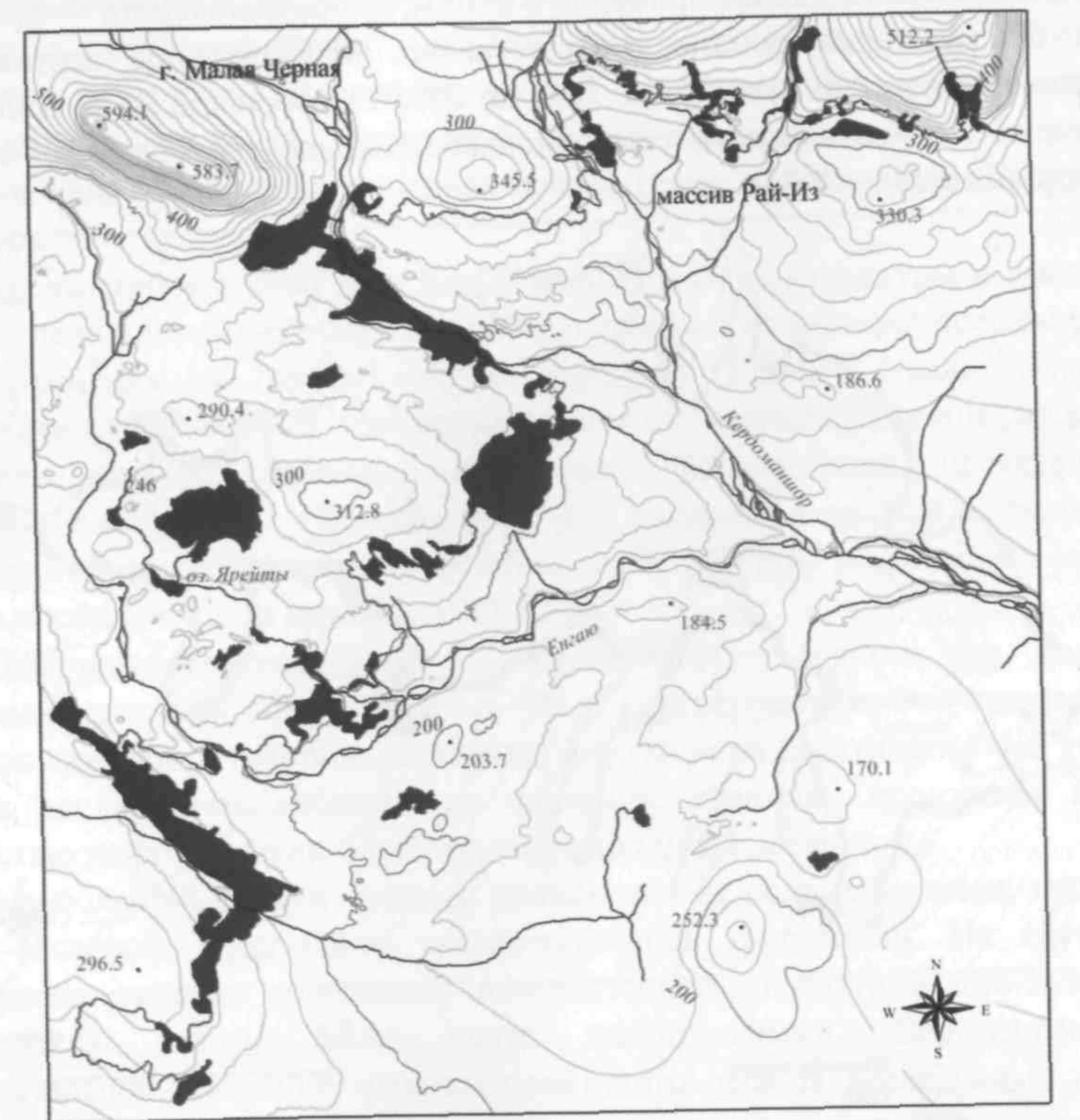
Количественная оценка величин вертикального и горизонтального смещений редколесий и сомкнутого леса была произведена с использованием разработанных методов, описанных в главе 2. Наряду со средним значением для оценки сдвига использовалась медиана (более устойчивая статистика). Вертикальный сдвиг составил для редколесий 18 м, для сомкнутых лесов — 14 м, а горизонтальное смещение — для редколесий — 175 м, для сомкнутых лесов — 180 м соответственно. Таким образом, за исследуемый период скорость вертикального сдвига границ редколесий и сомкнутых лесов составила примерно 5 и 3 м за десятилетие, а горизонтального — примерно 44 и 45 м за десятилетие соответственно.

Значительный сдвиг верхней границы редколесий и сомкнутых лесов произошел как на склонах, испытывающих в зимние месяцы воздействие сильных западных ветров (междуречье р. Кердоманшор и р. Енгаю), так и на территории, где основным лимитирующим фактором является термический режим летнего периода (южный склон горного массива Рай-Из). Это свидетельствует о том, что ветровые и температурные условия в течение последних 40 лет стали более благоприятными для произрастания древесной растительности.

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 вверх по склонам гор в результате потепления и увлажнения климата, которые наблюдались в XX столетии (Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005; Шиятов и др., 2007; Шалаумова, Фомин, Капралов, 2010). При этом в настоящее время древесная растительность еще не достигла климатически обусловленного предела из-за слабой обеспеченности

семенами лиственницы тундровых участков, расположенных в верхней части экотона верхней границы древесной растительности.

На Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве проведены исследования изменений видового состава, структуры и высотного положения редколесий (мелколесий) на верхнем пределе их произрастания, которые произошли за период с 1956 по 2005 гг.



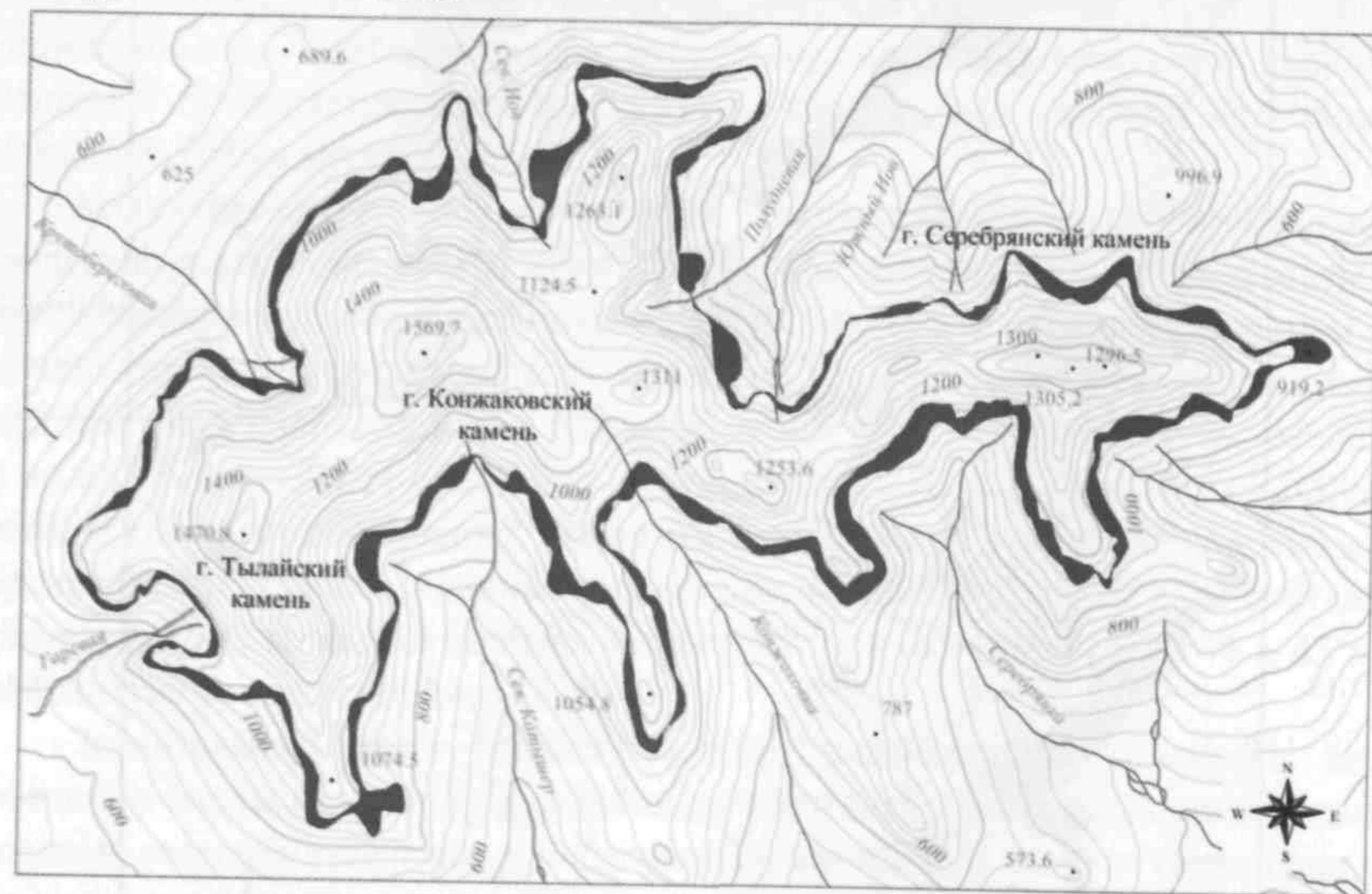
- Отметки высот
- Реки
- Область сдвига границы редколесий
- Граница редколесий
- Озера

Изолинии проведены через 40 м

Рис. 10. Карта-схема сдвига границы редколесий на Полярном Урале (массив Рай-Из) с 1960 по 2000 гг.



На рис. 11 показаны области сдвига редколесий за этот период. Видно, что за рассматриваемый промежуток времени на большей части склонов произошел подъем границы редколесий. 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. Таким образом, за исследуемый период скорость вертикального сдвига границ редколесий и сомкнутых лесов составила примерно 9 и 10 м, а горизонтального — примерно 25 и 58 м за десятилетие соответственно. Максимальное вертикальное смещение редколесий за период с 1956 по 2005 гг. составило 38 м, сомкнутых лесов — 51 м, максимальное горизонтальное смещение редколесий — 420 м, сомкнутых лесов — 990 м.



Отметки высот  
 Реки  
 Область сдвига границы редколесий  
 Граница редколесий

Изолинии проведены через 40 м

Рис. 11. Карта-схема сдвига границы редколесий на Северном Урале (Тылайско-Конжаковско-Серебрянский горный массив) за период с 1955—1956 по 2005 гг.

Достаточно большие величины смещения границы, наблюдаемые в верховье рек Сев. Иов (до 420 м), Полудневой (до 330 м) и Серебрянка (до 320 м), обусловлены небольшой крутизной отдельных участков склона 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.

В наибольшей степени вверх по склонам продвинулись лесные сообщества с доминированием березы и лиственницы на Серебрянском Камне, и с доминированием кедра на Конжаковском Камне. Представленные выше результаты свидетельствуют о том, что на Тылайско-Конжаковско-Серебрянском горном массиве во второй половине XX века происходила интенсивная экспансия древесной растительности как в пределах подгольцового пояса, так и в нижней полосе пояса горных тундр (Капралов и др., 2006).

Проведенные в 2006 году исследования состава, структуры и высотного распределения лесных сообществ, произрастающих на верхнем пределе своего распространения на горном массиве Ирмель (Южный Урал), позволили установить существенные изменения в экотоне верхней границы древесной растительности по сравнению с данными исследований, проведенными С.Г. Шиятовым в 1973 г. (Фомин и др., 2007; Капралов и др., 2007). На рис. 12 приведена карта-схема, иллюстрирующая сдвиг границы редколесий в данном районе исследований за период с 1973 по 2006 гг.

Величины вертикального и горизонтального сдвигов (по медиане) границы редколесий составили 27 и 60 м соответственно. Это означает, что скорость смещения границы составляет 8 и 18 м за десятилетие. На участке склона, на котором наблюдалось снижение границы, произошел пожар, полностью уничтожившим березово-лиственничный древостой.

Наибольший подъем границы происходил на пологих склонах западной, северо-западной, северной и северо-восточной экспозиции. На крутых и каменистых склонах восточного, юго-восточного, южного и юго-западного направления сдвиги были менее значительными. Вертикальное и горизонтальное смещение границы сомкнутого леса за исследуемый период составляют величины 25 м и 270 м соответственно. Это соответствует скорости смещений 8 и 82 м за десятилетие соответственно.

Установленные в ходе исследований изменения обусловлены улучшением климатических условий, способствующих появлению и роста ели на ранее необлесенных участках склонов. Данному процессу также способствует наличие островков березовых мелколесий и елового стланника, минимизирующих негативное действие отрицательных температур на молодое поколение ели и способствующее накоплению снежного покрова на ветрообдуваемых склонах горного массива. На выживание ели на ранних этапах онтогенеза и выход ее в верхний ярус древостоя указывает увеличение

количества «чистых» ельников (с 49 до 64 % в целом по массиву) на современном рубеже верхней границы редколесий. Принимая во внимание потенциальную пригодность отдельных участков склона для произрастания древесной растительности в верхней части массива Ирмель, можно утверждать, что вертикальное смещение границы сомкнутого леса и редколесий имеет климатогенную природу.

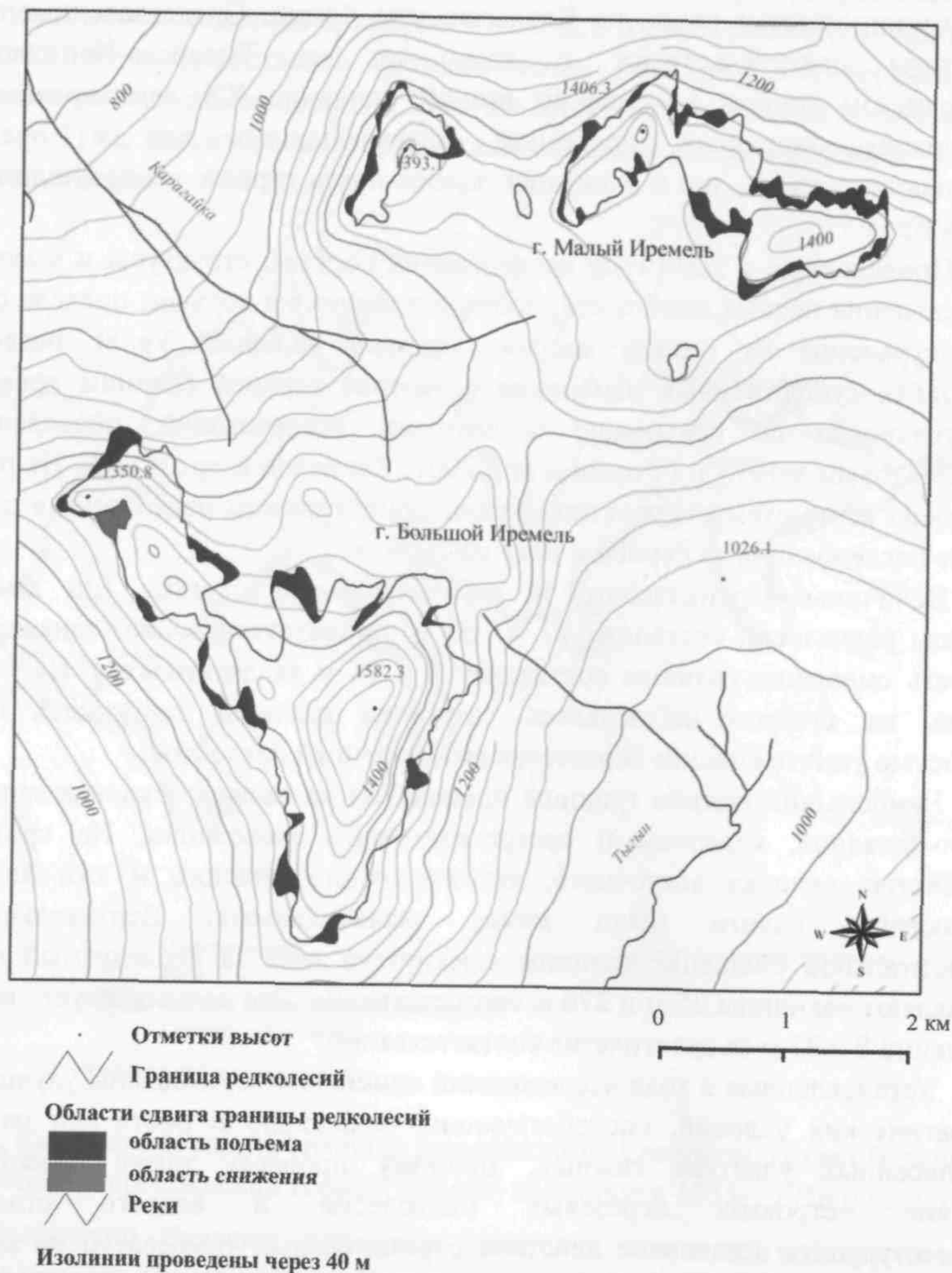


Рис. 12. Карта-схема сдвига границы редколесий на Южном Урале (горный массив Ирмель) за период с 1973 по 2006 гг.

Исследуемые районы Урала характеризуются разными уровнями повышения температуры воздуха, при этом значения скорости вертикального сдвига границ редколесий и сомкнутых лесов на исследуемых горных массивах отличаются незначительно и находятся в диапазонах 5-9 и 3-10 м за десятилетие соответственно. Это означает, что потепление и увлажнение климата на Урале во второй половине XX в. сопровождалось улучшением мезо- и микроклиматических условий, что способствовало вертикальному подъему древесной растительности на исследованных горных массивах. При этом значения скорости сдвига границ в значительной степени определялось не величиной потепления, а сочетанием комплекса орографических и эдафических факторов, мезо- и микроклиматических условий, биологическими особенностями древесной растительности, произрастающей в ЭВГДР, а также обеспеченностью семенами горно-тундровых участков в верхней части экотона.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований и разработок, которые выполнены в соответствии с заявленными целью и задачами.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан методологический подход к анализу динамики древесной растительности, произрастающей в условиях изменения климата и антропогенных воздействий, создан комплекс количественных методов оценки ее состояния и анализа пространственной динамики включающий: метод автоматизированной оценки состояния деревьев по цифровым фотографиям их крон; метод выявления уязвимых сторон и недостатков методик измерений, основанных на использовании систем автоматизированного анализа изображений; метод экологического зонирования территории; метод создания карт распределения значений температуры воздуха в пространстве с учетом рельефа земной поверхности; метод оценки значений вертикального и горизонтального сдвигов растительных рубежей.

2. Реакции фотосинтетического аппарата хвои сосны на действие аэропромышленных загрязнений и затенения, выражающиеся в снижении квантовой эффективности преобразования световой энергии и скорости нециклического электронного транспорта, а также увеличении диссипации световой энергии при высоких уровнях освещенности являются неспецифическими. Снижение эффективности преобразования световой энергии, вызванное действием загрязнений и затенения определяется общим механизмом энергообмена в хлоропластах. Показана перспективность использования перечисленных выше флуоресцентных характеристик фотосинтетического аппарата хвои для определения состояния сосновых древостоев.

3. В зоне с высоким уровнем атмосферного загрязнения наблюдается сокращение амплитуды суточных колебаний значений температуры воздуха, а выпадение осадков сопряжено с увеличением концентрации взвешенных веществ в приземном слое воздуха. Снижение густоты древостоев и сомкнутости крон деревьев в зоне с высоким уровнем загрязнения приводит к существенному изменению микроклиматических условий в лесном биогеоценозе, выражающихся в увеличении амплитуды суточных колебаний значений температуры воздуха, более значительному прогреванию почвы в течение вегетационного сезона. Особенности мезоклимата района, связанные с неравномерностью распределения осадков в холодный период, могут усиливать негативное воздействие атмосферных загрязнений на состояние деревьев за счет значительного промерзания почвы. В условиях высокого уровня атмосферного загрязнения у сосны обыкновенной наблюдается более позднее начало возрастания ассимиляционной активности в весенний период. Устойчивость к действию стрессовых факторов в течение вегетационного периода поддерживается за счет сохранения количества связанной воды в хвое на уровне, необходимом для обеспечения функционирования основных физиолого-биохимических процессов.

4. Экспресс-метод автоматизированной оценки состояния деревьев по цифровым фотографиям их крон позволяет повысить объективность и точность визуальной оценки степени угнетения деревьев в условиях негативного действия одного или нескольких экологических факторов. Метод выявления уязвимых сторон и недостатков методик измерений (МИ), основанных на использовании систем автоматизированного анализа изображений является универсальным и может быть использован при исследовании МИ по изображениям объектов, полученным на макро- и микроуровнях.

5. Геостатистические модели адекватно описывают пространственные закономерности изменения интегральных параметров состояния древостоев в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами крупного медеплавильного производства. Градиент изменения значений интегральных параметров, расположение, размер, и конфигурация зон с различным состоянием древостоев в значительной степени определяются особенностями взаимного расположения основного источника аэропромвыбросов и элементов макрорельефа района исследований.

6. Картографические модели пространственного распределения значений температуры воздуха, полученные с использованием мультивариантных методов и растрового моделирования в ГИС, позволяют адекватно оценивать изменение температуры в пространстве. В горных районах разность значений температуры воздуха между последним и предпоследним

двадцатилетиями XX в. была меньше, чем на равнинных участках. В целом для Урала характерно северо-восточное направление возрастания величины данного показателя.

7. Региональное потепление и увлажнение климата на Урале во второй половине XX в. способствовало вертикальному подъему древесной растительности в высокогорьях Урала. Значения скорости вертикального сдвига границ редколесий и сомкнутых лесов за этот период на горных массивах Рай-Из (Полярный Урал), Тылайско-Конжаковско-Серебрянский (Северный Урал) и Иремель (Южный Урал) находятся в интервалах 5-9 и 3-10 м за десятилетие соответственно. При этом несмотря на то, что во второй половине XX века на Полярном Урале наблюдается более значительное потепление по сравнению с Северным и Южным Уралом, значения скорости сдвига границ древесной растительности на массиве Рай-Из были меньше, чем в районах исследований на Северном и Южном Урале. Это означает, что скорость сдвига границ в значительной степени определялась не величиной потепления, а сочетанием комплекса орографических и эдафических факторов, мезо- и микроклиматических условий, биологическими особенностями видов древесных растений, произрастающих в экотоне верхней границы древесной растительности, а также обеспеченностью семенами горно-тундровых участков, расположенных в верхней части экотона.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монографии:

1. Фомин В. В. Климатогенная и антропогенная пространственно-временная динамика древесной растительности во второй половине XX века. / В. В. Фомин. — Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН. 2009. 150 с.
2. 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.
3. Фомин В. В. Географические информационные системы. / В. В. Фомин, З. Я. Нагимов, С. А. Шавнин, Д. Ю. Голиков. — Екатеринбург. 2003. 106 с.

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

4. Фомин В. В. Экологическая оценка территории в зоне действия медеплавильного производства. / В. В. Фомин, А. А. Николаев // Аграрный вестник Урала. 2011. №4 (83). С. 18—20.

5. Попов А. С. Влияние мезоклимата и атмосферных промышленных загрязнений на радиальный прирост сосны обыкновенной. / А. С. Попов, В. В. Фомин, Ю. В. Шалаумова // Аграрный вестник Урала. 2011. № 4 (83). С. 15—18.
6. Шалаумова Ю. В. Пространственно-временная динамика климата на Урале во второй половине XX века. / Ю. В. Шалаумова, В. В. Фомин, Д. С. Капралов // Метеорология и гидрология. 2010. № 2. С. 44—54.
7. Фомин В. В. Метрологические аспекты анализа изображений. / В. В. Фомин, А. П. Михайлович, А. С. Попов, Н. Ф. Низаметдинов, Ю. В. Шалаумова // Измерительная техника. 2008. № 2. С. 25—28.
8. Фомин В. В. Автоматизированная оценка состояния деревьев с использованием системы анализа изображений. / В. В. Фомин, Д. С. Капралов, А. С. Попов, В. И. Крюк // Лесной журнал. 2008. № 1. С. 24—30.
9. Шиятов С. Г. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале. / С. Г. Шиятов, М. М. Терентьев, В. В. Фомин, Н. Е. Циммерманн // Экология. 2007. № 4. С. 243—248.
10. Фомин В. В. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Южном Урале во второй половине XX века. / В. В. Фомин, Д. С. Капралов, М. М. Терентьев, А. А. Барова, А. В. Устинов, Н. Е. Циммерманн // Геоинформатика. 2007. № 1. С. 56—61.
11. Капралов Д. С. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Южном Урале. / Д. С. Капралов, С. Г. Шиятов, В. В. Фомин, Ю. В. Шалаумова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2007. Вып. 180. С. 59—68.
12. Фомин В. В. Морфофизиологическая и автоматизированная оценка состояния сосновых древостоев в зоне действия атмосферных промышленных загрязнений. / В. В. Фомин, А. С. Попов, Н. Ф. Низаметдинов, Ю. В. Шалаумова, С. А. Шавнин // Лесной вестник. 2007. № 8. С. 75—79.
13. Капралов Д. С. Изменения в составе, структуре и высотном положении мелколесий на верхнем пределе их произрастания в горах Северного Урала. / Д. С. Капралов, С. Г. Шиятов, П. А. Моисеев, В. В. Фомин // Экология. 2006. № 6. С. 403—409.
14. Фомин В. В. Влияние горного рельефа местности и аэропромышленных загрязнений на биометрические характеристики сосновых древостоев. / В. В. Фомин, С. А. Шавнин // Экология. 2002. № 3. С. 170—174.
15. Шиятов С. Г. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале. / С. Г. Шиятов, М. М. Терентьев, В. В. Фомин // Экология. 2005. № 2. С. 1—8.
16. Фомин В. В. Неспецифическая реакция фотосинтетического аппарата хвои сосны на действие аэропромышленных загрязнений и затенения. /

В. В. Фомин, С. А. Шавнин, Н. В. Марина, Г. Н. Новоселова // Физиология растений. 2001. Том 48. № 5. С. 760—765.

17. Фомин В. В. Экологическое зонирование состояния лесов в районах действия атмосферных промышленных загрязнений. / В. В. Фомин, С. А. Шавнин // Экология. 2001. № 2. С. 104—108.

#### Статьи в журналах и сборниках:

18. Капралов Д. С. Климатогенная пространственно-временная динамика древостоев основных лесообразующих пород, произрастающих на верхнем пределе их распространения. / Д. С. Капралов, В. В. Фомин, А. С. Галлеев, А. П. Доброноженко, М. М. Терентьев // Лесной и химический комплексы — проблемы и решения (экологические аспекты). — Красноярск. 2004. С. 183—190.

19. Фомин В. Рост сосновых древостоев в горной местности с высоким уровнем загрязнения атмосферы промышленными выбросами. / В. Фомин, С. Шавнин // ARCREVIEW. 2004. № 4. С. 7.

20. Шавнин С. А. Изучение ростовых и физиологических процессов в древостоях и оценка устойчивости лесных экосистем, расположенных в зонах действия аэропромышленных загрязнений. / С. А. Шавнин, В. В. Фомин, Н. В. Марина, Г. Н. Новоселова, Е. С. Папулов, Л. И. Королева, В. И. Крюк, Д. И. Голиков // Региональный конкурс РФФИ “Урал”. Результаты научных работ, полученные за 2002 год. Аннотационные отчеты. — Екатеринбург. 2003. С. 382—385.

21. Папулов Е. С. Комплексная оценка состояния лесных экосистем по морфологическим параметрам древостоев и содержанию тяжелых металлов в почве. / Е. С. Папулов, Н. В. Марина, А. В. Гусев, В. В. Фомин, С. А. Шавнин // Биологическая рекультивация нарушенных земель. — Екатеринбург. 2003. С. 356—363.

22. Шавнин С. А. Изучение ростовых и физиологических процессов в древостоях и оценка устойчивости лесных экосистем, расположенных в зонах действия аэропромышленных загрязнений. / С. А. Шавнин, В. В. Фомин, Н. В. Марина, Г. Н. Новоселова, Е. С. Папулов, Л. И. Королева, В. И. Крюк, Д. И. Голиков, С. С. Шавнин // Региональный конкурс РФФИ “Урал 2001”. Результаты научных работ, полученные за 2001 год. Аннотационные отчеты. — Екатеринбург. 2002. С. 244—247.

23. Чехлов О. ArcInfo помогает изучать климатогенную динамику лесотундровых экосистем. / О. Чехлов, С. Шиятов, В. Фомин // ARCREVIEW. 2002. № 2. С. 7.

24. Шавнин С. А. Экофизиологический подход к оценке состояния сосновых древостоев, расположенных в зонах антропогенного воздействия. / С. А. Шавнин, Д. Ю. Голиков, В. А. Калинин, Н. В. Марина, Г. Н. Новоселова,

В. В. Фомин // Технологии качества жизни. 2000. Вып. 1 (1). Часть Б. Специальные методы. С. 57—68.

25. Фомин В. В. Морфофизиологическая оценка состояния сосновых молодняков в зонах действия атмосферных промышленных загрязнений Первоуральско-Ревдинского промышленного узла // автореф. дисс... канд. с-х. н. — Екатеринбург. 1998. 23 с.

26. Шейдеггер К. Лихеноиндикация и морфофизиологическая оценка состояния древостоев в экологическом мониторинге лесов в загрязненных районах Среднего Урала. / К. Шейдеггер, К. Штейнмайер, Д. Пезотта, С. Шавнин, В. Фомин, И. Михайлова, А. Махнев // Леса Урала и хозяйство в них — Екатеринбург: Уральская государственная лесотехническая академия. 1998. Вып. 20. С. 393—405.

27. Shavnin S. A. Application of the Generalized State Index Determination to Ecological Monitoring of Forests in Polluted Areas. / S. A. Shavnin, V. V. Fomin, N. V. Marina // Measurement and Modeling in Environmental Pollution. — Southampton, UK and Boston, USA: Computational Mechanics Publications. 1997. P. 399—407.