

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Опекунова Марина Германовна**

Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на  
основе биоиндикации

специальность 25.00.23 физическая география и биогеография, география  
почв и геохимия ландшафтов

Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена на кафедре геоэкологии и природопользования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Официальные оппоненты:

член корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук,  
Додин Давид Абрамович, ВНИИОкеангеология

доктор географических наук, профессор, Тишков Аркадий Александрович, институт географии РАН

доктор географических наук, Федоров Анатолий Семенович, С.-Петербургский государственный университет

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет», г. Москва

Защита состоится 5 марта 2013 г. в 15-00 час. на заседании диссертационного совета Д.212.232.64 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» по адресу: 197376 Санкт-Петербург, ВО, 10-я линия д. 33, центр дистанционного обучения «Феникс»  
e-mail: spb.geograph@gmail.com  
тел. /факс: (812)323-06-27

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.г.н.

Лесовая С.Н.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Одной из главных задач современной географии является совершенствование традиционных и разработка новых комплексных подходов к диагностике техногенной трансформации ландшафтов. В практику ландшафтных исследований прочно вошли индикационные геоботанические методы (Раменский, 1956; Ellenberg, 1996; Викторов, Востокова, 1961; Виноградов, 1964; Теоретические вопросы..., 1971; Tüxen, 1973; Викторов, Ремезова, 1988 и др.). Их значимость особенно увеличилась с развитием экологического направления в исследовании ландшафтов. В настоящее время наметились новые подходы к оценке состояния природно-территориальных комплексов (ПТК) (Касимов, 1995; Николаевский, 1998; Карташев, 1999; Каплин, 2001; Ермаков, 2003; Баргальи, 2006; Биоиндикация..., 2007; Биологический контроль..., 2008; Геохимия ландшафтов..., 2012 и др.). Они включают ряд удобных, дешевых и эффективных методов, основанных на изучении реакций организмов на антропогенное воздействие (Le Blanc, Sloover, 1970; Rao, 1982; Бурдин, 1985; Парибок, 1983; Алексеева-Попова, 1983, 1991, 2005; Ярмишко, 1997; Markert et al., 1997; Черненькова, 2002; Уфимцева, Терехина, 2005; Жиров и др., 2007; Лянгузова, 2008; Мазная, Лянгузова, 2010; Sawidis et al., 2011 и др.). Однако при всей методологической обоснованности и перспективности применения биоиндикации в определении степени техногенной трансформации ландшафтов осуществить ее в полной мере сложно из-за отсутствия разработанной методики отбора биоиндикаторов. Кроме того, необходимо дальнейшее изучение ответных реакций биоты на антропогенное изменение природных потоков вещества и энергии в ландшафтах.

Расширение ландшафтно-экологических исследований в районах Крайнего Севера, выполняющихся зачастую в режиме вертолетного десанта, требует разработки экспресс-методов, позволяющих за короткое время получить максимум информации о состоянии и степени трансформации ландшафтов. При этом диагностика должна включать как изменение ПТК в целом, так и отдельных его компонентов, в том числе позволять оценить состояние такой крайне динамичной среды как атмосферный воздух. К наиболее перспективным методам, удовлетворяющим этим условиям, относится фитоиндикация (Виноградов, 1964; Парибок и др., 1987; Биоиндикация..., 1988; Уфимцева, Терехина, 2005; Markert et al., 2003; Poikolainen et al., 2004; Жиров и др., 2007; Jovan, 2008 и др.). Она предусматривает изучение химического состава растений во взаимосвязи с окружающей средой, а также реакций организмов и их сообществ на антропогенное воздействие. При этом в ландшафтно-геохимических исследованиях существенно изучение особенностей миграции и аккумуляции поллютантов в системе почва-растение, являющейся интегральным индикатором многолетних процессов загрязнения (Ильин, 1991; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Никонов и др., 2004 и др.).

Для каждой географической зоны существует определенная система взаимосвязи компонентов ландшафта, проявляющаяся в формировании зональных и азональных ПТК. Их отличают специфический тип миграции химических элементов и определенная интенсивность биологического круговорота, обусловленные влиянием климата и геологического строения (Перельман, Касимов, 1999). Поэтому в качестве модельных территорий для отработки комплекса биоиндикационных методов были выбраны ПТК различных физико-географических зон: тундровой и лесотундровой (Кольский полуостров, север Западной Сибири и Норильское плато), таежной (Се-

ро-Запад России), лесостепной и степной (Южный Урал) зон.

В основу исследований положена оценка воздействия на ПТК горнорудной и нефтегазодобывающей отраслей промышленности. Они остаются одними из самых неблагоприятных в экологическом отношении и приводят к значительной техногенной трансформации ландшафтов. В работе рассматривается влияние АО “Североникель” (Мончегорск, Мурманская область), РАО «Норильский никель» (г. Норильск), АО “Карельский окатыш” (г. Костомукша, Карелия), Учалинского ГОКа (г. Учалы, Башкортостан), Башкирского медно-серного комбината (г. Сибай, Башкортостан), нефтегазодобывающего комплекса севера Западной Сибири. Особое внимание уделено урбогеосистемам с многофакторным и поликомпонентным воздействием, где необходима надежная система индикации антропогенного воздействия (мегаполис Санкт-Петербург и города Мончегорск, Костомукша, Сибай и Учалы).

**Целью** диссертационного исследования является разработка и верификация комплекса методов биоиндикации для диагностики техногенной трансформации ландшафтов с различной напряженностью антропогенного воздействия. Для реализации данной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Изучить природные ландшафтно-геохимические факторы формирования химического состава почв и растений, морфологических параметров растений, видового состава и структуры растительности в различных физико-географических условиях.

2. Определить влияние горнорудной и нефтедобывающей промышленности на химический состав почв и растений, морфологические параметры растений, видовой состав и структуру растительности в разных физико-географических зонах по мере нарастания антропогенного воздействия.

3. Установить комплекс химических элементов-индикаторов для различных видов антропогенного загрязнения. Выявить виды-индикаторы техногенеза, отличающиеся наибольшей информативностью.

4. Определить приоритетные морфологические, флористические и фитоценологические индикаторные признаки изменения ПТК в ряду нарастания антропогенной нагрузки. Дать оценку возможности использования этих параметров при диагностике техногенной трансформации ландшафтов.

5. Обосновать комплекс биоиндикационных методов, адекватно отвечающих состоянию ландшафтов в условиях антропогенного воздействия в различных природных зонах РФ, дать прогноз изменения ключевых геокомплексов и разработать систему мониторинга с использованием биоиндикаторов.

6. Осуществить сравнительный анализ эффективности методов биоиндикации техногенной трансформации ландшафтов при фоновой оценке территорий, экологическом мониторинге, изучении состояния ландшафтов и др.

**Научная новизна.** Впервые с использованием системного подхода обоснованы критерии диагностики техногенной трансформации тундровых, таежных и степных ландшафтов по фитоиндикационным показателям. Разработаны теоретико-методологические и методические подходы оценки ответной реакции ПТК (урбогеосистем) на внешнее воздействие предприятий горнорудной и нефтедобывающей промышленности. На основе анализа аккумулирующей способности растений, рядов биологического поглощения элементов, корреляционных связей и состава парагенезисов, облия, встречаемости и других критериев, предъявляемых к выбору биоиндикаторов, предложены виды растений для оценки состояния ПТК в разных физико-географических зонах. Разработан метод сопряженного анализа химического состава абиотических компонентов ПТК, индикаторных видов растений и общей ландшафт-

но-геохимической обстановки.

Применен метод корреляционных плед и впервые показана его эффективность при диагностике техногенной трансформации ПТК. С помощью нелинейного метода дендритов установлены пространственно-временные закономерности, определяющие видовой состав растительности и направленность сукцессий при техногенезе. Доказано, что видовой состав плед указывает на характер изменения фитоценозов при нарастании антропогенного воздействия.

Обоснован комплекс биоиндикаторов техногенной трансформации ландшафтов и особенности его применения в зависимости от физико-географических условий, видов воздействия и степени нарушенности ПТК в ряду нарастания антропогенеза. Предложена система мониторинга техногенной трансформации ландшафтов с использованием биоиндикаторов.

**Практическая значимость и реализация работы.** Разработанный комплекс методов биоиндикации позволяет повысить точность, упростить и снизить материальные и временные затраты при выполнении оценки экологического состояния, ресурсного потенциала, устойчивости ПТК к антропогенным нагрузкам. Он незаменим при проведении инженерно-экологических изысканий в труднодоступных районах, где отсутствует посты мониторинговых наблюдений. Установленные базовые фоновые содержания приоритетных загрязняющих веществ в почвах и растениях изученных регионов необходимы для проведения экологического мониторинга воздействия горнорудной и нефтегазодобывающей промышленности.

Результаты ландшафтно-экологических исследований с применением данного комплекса методов переданы в Сибайское Территориальное Управление охраны окружающей среды (Башкортостан). Даны рекомендации по расположению ряда производственных объектов, рациональному водопользованию и перепрофилированию агропроизводства.

С помощью комплексного биоиндикационного анализа установлена степень нарушенности ландшафтов на момент начала строительства порта в Лужской губе. Даны прогноз изменения геокомплексов при нарастании нагрузок и рекомендации по оптимизации природопользования, размещению рекреационных, буферных и природоохранных зон.

По результатам оценки экологического риска нарушения и загрязнения ландшафтов сделан научно обоснованный прогноз и даны рекомендации по минимизации возможных последствий при организации экскурсионной эколого-краеведческой зоны на территории государственного заповедника "Костомукшский". Результаты оценки уровня загрязнения ПТК в зоне воздействия ОАО «Карельский окатыш» вошли в ежегодники «Летопись природы».

Разработанная система экологического мониторинга территории нефтегазовых месторождений реализована на 15 лицензионных участках ЯНАО.

**Защищаемые положения:**

- Оценка экологического состояния ландшафтов базируется на детальной характеристике растений и растительности, которые служат индикаторами антропогенной трансформации ПТК. Фитоиндикация экологического состояния ПТК проводится с учетом природных зональных, а зональных, а также антропогенных составляющих биогеохимического круговорота. Выделить антропогенную составляющую в сложном взаимодействии природных и антропогенных факторов позволяет разработанный комплекс методов, включающий сопряженный анализ состояния видов-индикаторов и компонентов ПТК.

- Для диагностики техногенной трансформации ландшафтов следует использовать деревья (дендроиндикация), мхи (бриоиндикация) и лишайники (лихеноиндикация). Применение видов травяно-кустарничкового яруса целесообразно в безлесных ПТК. Предложены виды-индикаторы техногенного воздействия на ландшафты в тундровой, таежной и степной зонах с учетом физико-географических особенностей и интенсивности антропогенного воздействия.

- Изменение химического состава растений и почв отвечает специфике техногенеза. Загрязнение компонентов ландшафта диагностируется увеличением содержания типоморфных химических элементов в индикаторных видах растений и трансформацией их ассоциативности. В качестве биоиндикаторов целесообразно применять биообъекты, обладающие безбарьерным типом аккумуляции – корку древесных пород *Pinus sylvestris L.*, *Populus balsamifera L.*, *P. nigra L.* и др.

- Комплекс индикаторов состояния ландшафта меняется в зависимости от вида воздействия и степени нарушенности ПТК. Диагностика ландшафтно-деструктивных и фоново-параметрических нарушений включает морфологические, флористические и фитоценотические признаки. Они могут быть использованы при экспресс-оценке в рекогносцировочных и мониторинговых исследованиях, а также эффективны при определении общего состояния ПТК. Эти признаки не могут рассматриваться как специфические показатели антропогенного влияния, поскольку вызваны суммарным воздействием всех внешних факторов. Определение интенсивности загрязнения по морфологическим флористическим и фитоценотическим признакам возможно только при сопряженном анализе химического состава абиотических компонентов ПТК и фитоиндикаторов, а также общей ландшафтно-геохимической обстановки.

**Фактический материал.** В период с 1979 по 2011 гг. в шести регионах страны (Кольский полуостров, Карелия, Ленинградская область, север Западной Сибири, Норильское плато, Южный Урал) были выполнены детальные ландшафтно-экологические исследования с применением комплекса методов биоиндикации. На 3250 пробных площадях проведен анализ техногенной трансформации ПТК, изучены реакции растений (в зависимости от региона от 118 до 300 видов) и растительности на возрастание антропогенного воздействия и выявлены его фитоиндикаторы. Отобрано и проанализировано более 3400 проб почв и около 6000 проб растений.

**Личный вклад автора.** Цели, задачи и методология ландшафтно-экологических исследований с применением биоиндикации сформулированы лично диссертантом. Под руководством и при непосредственном участии автора проведены комплексные ландшафтно-экологические изыскания в Ленинградской области, на Южном Урале, Кольском полуострове, севере Западной Сибири. Автор принял участие в полевых исследованиях, выполняемых кафедрой геоэкологии и природопользования СПбГУ в государственном заповеднике «Костомукшский», а также геохимической партией Центральной арктической геологоразведочной экспедиции, занимавшейся поисково-оценочными работами в Норильском и Игарском районах Красноярского края. Лично или под руководством диссертанта проведен отбор проб, подготовка и химический анализ проб растений и почв, а также осуществлены экспериментальная, камеральная и математическая обработка материалов с применением ГИС-технологий, сформулированы основные результаты работы.

**Апробация работы, публикации.** Основные положения работы докладывались на 48 пленарных и секционных заседаниях: Научных конференций факультета географии и геоэкологии и НИИГеографии СПбГУ (1997, 2002, 2003), Международ. симпозиуме и выставке по загрязнению окружающей среды в Центральной и Восточ-

ной Европе (Будапешт, Венгрия, 1994; Варшава, Польша, 1996, 1998; Прага, Чешская Республика, 2000, 2003), II Международ. совещании, посвященном памяти проф. А.И. Перельмана (Новороссийск, 1999), III Международ. совещании «Геохимия Биосферы» (Новороссийск, 2001), Всерос. научно-практической конференции «Проблемы геоэкологии Южного Урала» (Оренбург, 2003), Международ. школе "Современные методы эколого-геохимической оценки состояния и изменений окружающей среды" (Новороссийск, 2003), конференции «Экологическая геология и рациональное недропользование» (Санкт-Петербург, 2003, 2009), Международ. конференции «Взаимодействие общества с окружающей средой в условиях глобальных и региональных изменений» (Москва – Барнаул, 2003), XXII съезде Русского Географического общества (Кронштадт, 2005), Международ. научной конференции «Геохимия биосферы» (к 90-летию А.И. Перельмана; Москва, 2006), на Сергеевских чтениях (Москва, 2006, 2010), Международ. научной конференции «Антропогенная трансформация природной среды» (Пермь, 2010), Международ. симпозиуме, посвященном 20-летию финско-русского заповедника «Дружба» (Кухмо, Финляндия, 2010), Международ. конференции по исследованию арктических и северных территорий (Тромсе, Норвегия, 2010), Международ. конференции, посвященной 165-летию В.В. Докучаева «Ресурсный потенциал почв – основа продовольственной и экологической безопасности России» (Санкт-Петербург, 2011), Третьем Международ. полевом симпозиуме «Западносибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее» (Ханты-Мансийск, 2011), Всерос. научной конференции «Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М.А. Глазовской)» (Москва, 2012) и др.

По теме диссертации опубликовано 130 работ, в том числе: 2 монографии (в соавторстве), 4 учебных пособия, 19 статей в ведущих периодических изданиях, 44 статьи в журналах и сборниках.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 402 стр. текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, приложений, содержит 65 таблиц, 94 рисунка, список литературы состоит из 501 источника.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность зав. каф. геоэкологии и природопользования СПбГУ, проф. В.Н. Мовчану и с.н.с. БИН РАН Н.В. Алексеевой-Поповой за поддержку исследований и консультативную помощь, проф. В.В. Дмитриеву, проф. Ю.Н. Сергееву и другим сотрудникам факультета географии и геоэкологии за ценные замечания и рекомендации при подготовке рукописи, а также участникам экспедиционных исследований И.Ю. Арестовой, А.Г. Ганулу, Н.Т. Ганул, С.В. Грибалева, Е.Ю. Елсуковой, Д.А. Краснову, С.Ю. Кукушкину, А. Ю. Опекунову, О.В. Сенькину, В.М. Щербакову и др. В экспедиционных исследованиях и при обработке материалов приняли участие студенты, магистранты и аспиранты каф. геоэкологии и природопользования СПбГУ, за что автор выражает им признательность.

Диссертационное исследование основано на мировоззрении, сформированном трудами к.г.н. М.Д. Скарлыгиной-Уфимцевой – учителя, которой автор выражает глубокую благодарность.

Работа выполнена при поддержке проектов ФЦП «Интеграция» № 326.69 «Поддержка и развитие Учебно-научного центра «Современные методы оценки экологического состояния окружающей среды» на базе СПбГУ и Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН» (1997-2001 г.г.), № Б0038 «Современные методы оценки экологического состояния окружающей среды» на базе СПбГУ и Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН» (2002-2004 г.г.), проекта СО.125 «Поддержка полевой практики по геоэкологии «Оценка экологического риска в районах разработки

рудных месторождений», программы «Университеты России – фундаментальные исследования» УР.08.01.024 «Биогеохимическая оценка экологического состояния окружающей человека среды в природно-техногенных аномалиях» (научн. рук. проф. В.Н. Мовчан).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлена методология биоиндикационных исследований при диагностике техногенной трансформации ландшафтов. Биоиндикация загрязнений основывается на изучении различных биохимических, физиологических, анатомических, морфологических и других отклонений в развитии организмов и их сообществ, возникающих под действием антропогенных факторов (рис. 1). Большое внимание уделяется проблеме использования приемов и методов классической биоиндикации для оценки техногенной трансформации ландшафтов (Артамонов, 1986; Шурберт, 1988; Криволицкий, 1991; Николаевский, 1998; Карташев, 1999; Каплин, 2001; Проблемы экологии..., 2005 и др.).



Рис. 1. Общая схема фитоиндикационных признаков (по материалам S.Sanny и J. Bayer с изменениями)

Дается литературный обзор и критический анализ современного состояния проблемы использования в диагностике техногенной трансформации ПТК приоритетных групп живых организмов: микроорганизмов, водорослей, растений, насекомых, птиц, млекопитающих, включая человека. Показано, что недостатки

различных методов биоиндикации во многом позволяет избежать фитоиндикация загрязнений – применение растений и их сообществ при мониторинге (Ярмишко, 1997; Уфимцева, 2000; Черненкокова, 2002; Баргальи, 2006; Жиров и др., 2007; Бузмаков, 2010; Лянгузова, 2010 и др.). Особое положение растений в ландшафте, связанное с автотрофным питанием, прикрепленным образом жизни, присутствием практически во всех ПТК определяет их высокие индикаторные возможности. Интенсивность фотосинтеза и запасы создаваемой биомассы относятся к чутким индикаторам изменения ПТК. Особенности химического состава, процессы метаболизма, внешний облик, видовой состав и другие флористические и фитоценотические признаки отражают условия местообитаний и позволяют оценить состояние и изменение абиотических компонентов и техногенную трансформацию ПТК.

Растения обладают относительно высокой чувствительностью к воздействию загрязняющих веществ. Считается (Никонов и др., 2004; Проблемы экологии..., 2005 и др.), что их можно использовать как индикаторы уровня и вида загрязнения, а также для мониторинга состояния отдельных компонентов и ландшафта в целом. Однако на практике при диагностике техногенной трансформации ПТК исследователи сталкиваются с целым рядом трудностей. К их числу относятся не только выбор видов и жизненных форм, разномасштабность их пространственно-временной изменчивости, но и соответствие каждому уровню организации биосистем своего набора показате-



лей функционального состояния. В результате перечень информативных признаков становится чрезвычайно обширным, что увеличивает трудоемкость работ и снижает оперативность диагностики. Поэтому необходимо усовершенствование подходов к оценке экологического состояния ландшафтов, а также разработка новых методов биологической диагностики фоновых и нарушенных ПТК.

Изменчивость параметров компонентов и элементов ландшафтов, а также внутривидовая гетерогенность таксонов требуют соблюдения перечисленных ниже правил проведения биоиндикационных исследований: единых методов сбора материала, регламентации сроков и продолжительности исследований. Вместе с тем, применение традиционных биоиндикационных признаков при техногенной трансформации ПТК имеет ряд ограничений, что связано с дискретно-континуальным характером строения ландшафтной оболочки. Структура растительного покрова выступает индикатором изменения свойств абиотических компонентов в пространстве, однако стабилизирующее воздействие фитоценозов на среду обитания требует отработки показательных критериев и выявления их реакции на лимитирующие факторы.

В главе рассмотрены фундаментальные ландшафтно-экологические понятия: экологическая устойчивость, ресурсный потенциал, техногенная трансформация и др. Под *устойчивостью* ПТК понимается его способность при воздействии внешнего фактора пребывать в одном из своих состояний и возвращаться в него в силу инертности и восстанавливаемости, а также переходить из одного состояния в другое вследствие пластичности, не выходя при этом за рамки инварианта в течение заданного интервала времени (Гроздинский, 1987). Подчеркивается, что геосистемы характеризуются множеством устойчивостей и оценивать ее можно только применительно к конкретному виду нарушений. Любой ПТК обладает *природно-ресурсным потенциалом* – совокупностью природных ресурсов, которые могут быть использованы в хозяйстве с учетом достижений научно-технического прогресса (Гладкий, Чистобаев, 1998). В ходе хозяйственного освоения происходит его количественное и качественное изменение. Параметрическое определение состояний природной среды, обеспечивающих существование сообществ живых организмов, характерных для этих состояний в естественных условиях и под влиянием техногенеза, представляет *оценку экологического состояния* ПТК (Дмитриев, 2003). Она неразрывно связана с качеством объекта (совокупность физических, химических, биологических и иных показателей), изменение которого под влиянием техногенеза рассматривается как *техногенная трансформация* ПТК.

В оценке экологического состояния природной среды и диагностике ее техногенной трансформации необходим учет зональных, а зональных и интразональных факторов дифференциации земной поверхности и биогеохимического круговорота. В главе рассматривается значение пространственно-временной изменчивости поведения поллютантов в различных географических районах, поскольку для каждой природной зоны характерны специфический тип миграции химических элементов, определенная интенсивность биологического круговорота, формирующаяся под влиянием ведущего климатического фактора.

Внутри каждого региона по принципу географической непрерывности выделяются субрегионы и биогеохимические провинции, отличающиеся комбинацией признаков по концентрации и соотношению химических элементов и а зональными типами миграции вещества в пределах рудных и техногенных аномалий, бессточных котловин и других проявлений а зональной дифференциации ландшафтной оболочки (Ковальский, 1979). В качестве а зонального фактора трансформации естественного

биогеохимического круговорота рассматривается антропогенное воздействие (вид, продолжительность, масштаб). Оно изменяет качественные и количественные параметры круговорота веществ, имея в каждой биогеохимической провинции специфические черты. Поэтому в основе исследований лежит определение взаимодействия зональной, азональной и антропогенной составляющих круговорота вещества (возможности появления антагонистических, синергетических и компенсационных эффектов), направленности интегрального процесса и долгосрочных последствий с подключением механизмов саморегуляции и самовосстановления. Вместе с пространственно-временной изменчивостью поведения химических элементов в разных географических районах для определения вероятности неблагоприятных последствий при антропогенном воздействии изучены ПТК с различной техногенной нагрузкой. Они представляют единый ряд с нарастанием техногенного воздействия: ненарушенные (фоновые) ПТК → ненарушенные ПТК в районах геохимических аномалий → слабонарушенные ПТК под влиянием локальных источников загрязнения → антропогенно нарушенные ПТК в районах техногенных аномалий → урбогеосистемы. Соотношение зональной, азональной природной и антропогенной составляющих в биогеохимическом круговороте меняется в зависимости от статуса системы (рис. 2).



Рис. 2. Значимость зональных и азональных факторов в биогеохимическом круговороте при различной степени антропогенной нагрузки

Показано, что исследование индикаторных свойств растительности невозможно без детальной характеристики почвенного покрова. Почва представляет собой компонент ландшафта, который образуется в результате сложного взаимодействия элементов и компонентов ПТК. В силу этого особенности ее морфологического строения и физико-химические свойства позволяют выявить не только выраженность зональных и азональных признаков, но и оценить интенсивность антропогенной нагрузки. Особенности залегания пород, их состав и характер рельефа приводят к трансформации зонального процесса и появлению черт азональности. Содержание большинства химических элементов в почвах сохраняет тесную связь с почвообразующим материалом, но она не является пропорциональной.

Рассмотрены роль горных пород и почв, основные факторы и процессы, определяющие миграцию и аккумуляцию микроэлементов (МЭ) в ландшафтах и поступ-

ление их в растения. Основное внимание уделено изучению тяжелых металлов (ТМ) – химических элементов с атомной массой более 50 (Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Cd и др.), которые при определенных концентрациях могут оказывать токсичное действие (ГОСТ 17.4.3.07-2001). В работе анализируется роль гумуса, глинистых минералов, полуторных окислов и карбонатов почв в их миграции и аккумуляции.

Обосновывается необходимость оценки как валового содержания металлов, так и их подвижных форм. Валовое количество определяет естественный региональный геохимический фон, на который накладывается антропогенное загрязнение. В зависимости от химической природы растворителей из почвы экстрагируются металлы, находящиеся в разных формах и соединениях. В проводимых исследованиях использована ацетатно-аммонийная вытяжка (ААБ, рН=4,8), в большей степени отвечающая поглотительной способности растений. Именно для нее в настоящее время разработаны ПДК металлов в почвах. Представлены основные закономерности распределения подвижных форм ТМ в профиле почв, определяющие интенсивность биогеохимического круговорота.

Отмечено особое место почв, сформировавшихся над рудными телами. В результате выветривания этих тел образуются вторичные ореолы рассеяния ТМ, которые проявляются во всех компонентах ландшафта.

В главе рассмотрены основные антропогенные источники поступления ТМ в компоненты ПТК и вклад техногенных потоков в биогеохимические циклы. При поступлении ТМ в окружающую среду они подвергаются различным превращениям с изменением валентности и растворимости. Металлы играют важную роль в процессах метаболизма живых организмов и оказывают многостороннее влияние на физиолого-биохимические процессы в растениях. Однако при избыточном содержании они обладают сильными токсическими свойствами по отношению к биоте.

Другим распространенным видом антропогенного воздействия является загрязнение природных вод и почв *нефтью и нефтепродуктами*. При добыче, транспортировке, переработке и использовании в окружающую среду поступает около 2% добытой нефти (Орлов, Аммосова, 1994). Разведка и освоение нефтегазовых месторождений на севере Западной Сибири неизбежно приводят к загрязнению и изменению тундровых ПТК (Пиковский, 1988; Солнцева, 1998). Отмечено, что при оценке экологических последствий загрязнения ПТК нефтяными углеводородами (НУ) необходимо учитывать не только содержание углеводородов в компонентах ландшафта, но и общие физико-географические условия. Для северных районов опасность загрязнения почв НУ возрастает, поскольку в кислых, холодных, переувлажненных и малогумусных условиях деградация НУ происходит крайне медленно. Таким образом, ТМ и НУ относятся к числу приоритетных поллютантов, поступающих в компоненты ландшафта при техногенезе и изменяющих природные циклы химических элементов, контроль которых следует осуществлять в первую очередь.

На основе анализа литературных данных (Биоиндикация загрязнений..., 1988; Markert, 1997; Николаевский, 1998; Уфимцева, Терехина, 2005; Федорова, 2005; Петрунина и др., 2007; Marmor, Randraue, 2007; Королюк, 2007; Ярмишко, 1997; Ставрова, 2007; Жиров и др., 2007; Лянгузова, 2010 и др.) показано, что комплекс методов биоиндикации укладывается в существующее представление об уровнях организации живого вещества: ген – клетка – орган – вид – популяция – сообщество (рис. 1, табл. 1). Таким образом, все разнообразие методов биоиндикации, следуя представлениям Ю. Одума (1975) о подразделениях биологии, представлены в виде «пирога» биоиндикации. В нем горизонтальные слои образованы индикаторными признаками «фун-

даментальных» подразделений: генетики, биохимии и т.д. (рис. 3). Вертикальные сегменты сложены таксономическими подразделениями, к числу которых относятся лишенология, бриология и т.д.

Таблица 1. Классификация фитоиндикационных признаков

Признаки			
Физиологические и биохимические	Морфологические	Флористические	Фитоценотические
1. Химический состав растений 2. Активность основных физиологических процессов (фотосинтез, дыхание и др.) 3. Содержание пигментов 4. Изменение активности ферментов и т.д.	1. Ксероморфизм 2. Размеры растений и отдельных органов, ежегодный прирост и т.д. 3. Хлороз и некроз 4. Суховершинность 5. Изменение окраски 6. Тераты и т.д.	1. Специфическая флора 2. Присутствие-отсутствие индикаторного вида 3. Индикаторные плеяды видов 4. Обилие и продуктивность индикаторного вида 5. Дендро-, брио-, лишеноиндикация и т.д.	1. Продуктивность сообщества 2. Сомкнутость и проективное покрытие сообщества, ярусов и т.д. 3. Анализ доминантов, эдификаторов сообщества 4. Экобиоморфный состав сообщества и ярусов 5. Вертикальная и горизонтальная структура сообщества 6. Границы зональных, интра- и азональных фитоценозов 7. Площади зональных, интра- и азональных фитоценозов и т.д.

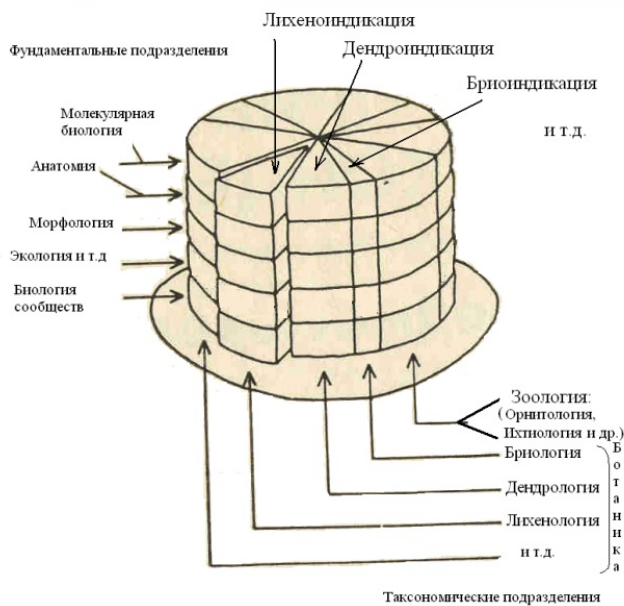


Рис. 3. Схема структурных подразделений биоиндикации

Рассмотрены особенности применения основных методов фитоиндикации (Проблемы экологии..., 2005; Малышева, 2006; Петрунина и др., 2007; Копчик и др., 2008; Frontasyeva, 2011; Adamo, 2003; Poikolainen et al., 2004; Baptista et al., 2008; Berg et al., 2011 и др.). Ведущая роль в диагностике техногенной трансформации ландшафтов принадлежит древесным растениям в силу их высокой индикаторной значимости (Кулагин, 1974; Добровольский, 1983; Парибок и др., 1983; 1989; Воронин, 1989; Лесные экосистемы..., 1990, Касимов, 1995; Чер-

ненькова, 2002; Ярмишко, 2007; Быков, 2007 и др.). Они способны поглощать и нейтрализовать часть поллютантов, задерживать пылевые частицы, а также индцировать особенности загрязнения за счет разнообразия ответных реакций. В качестве биоиндикационных признаков широко используются морфологические характеристики как отдельных деревьев (радиальный и линейный прирост, продолжительность жизни хвои, наличие некроза и хлороза, жизненное состояние древостоя и т.д.), так и в целом древесного яруса и полога подроста. Но основное внимание уделяется изменению их химического состава. Реакция древесных пород на загрязнение существенно различается. Наиболее устойчивы к антропогенному загрязнению лиственные породы. Голосеменные более чувствительны к воздействию поллютантов и поврежда-

ются в первую очередь. В мировой практике биологического мониторинга используются различные виды деревьев: граб *Carpinus betulus* L., ясень *Fraxinus excelsior* L., дубы *Quercus robur* L. и *Quercus ilex* L., клен *Acer pseudoplatanus* L., вишня *Prunus serrula* L., кипарис *Cupressus sempervirens* L., тополь черный *Populus nigra* L., платан *Platanus hybrida*, манго *Mangifera indica*, эвкалипты и др. К числу древесных пород, часто применяемых в подобных исследованиях на территории РФ, относятся сосна обыкновенная *Pinus sylvestris*, ели *Picea abies* (L.) Karst., *P. obovata* Ledeb., березы *Betula pendula* Roth, *B. pubescens* Ehrh, липа *Tilia cordata* L., дуб *Quercus robur*, тополь *Populus balsamifera*.

Под действием техногенного загрязнения содержание ТМ в деревьях существенно меняется. В практике биомониторинга широко изучается химический состав листьев, ветвей, корки и древесины, аккумулирующая способность которых различна. Максимальные концентрации поллютантов наблюдаются в корке деревьев, обладающей безбарьерным типом аккумуляции к сере, ТМ, радионуклидам и т.д. Минимальные содержания ТМ обнаруживаются обычно в ветвях и древесине. Хорошие индикаторные свойства присущи листе и хвое деревьев, но их химический состав обладает большой погодичной флуктуацией и зависит во многом от погодных условий текущего и предшествующего годов.

Наибольшей индикаторной значимостью в сосновых древостоях обладают: средняя высота деревьев, средний диаметр стволов, радиальный прирост, надземная биомасса среднего дерева, возрастной состав хвои, прирост побегов текущего года, поражение хвои некрозом и хлорозом, степень деградации деревьев и накопление фитотоксикантов. Анализ и учет возобновления, подроста и подлеска важен при оценке давности последнего пожара. Рекомендуется определять сомкнутость древостоя, так как от нее зависит состояние нижних ярусов фитоценоза, а также толщину лесной подстилки, которая указывает на давность последнего нарушения.

Показаны преимущества и недостатки использования растений травяно-кустарничкового и мохового-лишайникового ярусов в диагностике техногенной трансформации ПТК. Антропогенные изменения в их видовом составе вызываются тремя основными причинами: аэротехногенным загрязнением, давностью последнего пожара, рекреационной нагрузкой. Растения травяно-кустарничкового яруса обладают широкими индикаторными возможностями в ПТК, в большей или меньшей степени лишенных древесного яруса (в степях, лесостепях, тундрах и др.), который являясь своеобразным экраном, препятствует проникновению поллютантов в приземную часть лесного сообщества.

При оценке загрязнения воздуха с помощью метода лишеноиндикации необходим учет всех факторов воздействия – освещенности, степени увлажнения таллома, экспозиции лишайников на стволе, господствующих ветров, – которые имеют большое значение в жизнедеятельности лишайников и определяют их устойчивость к поллютантам. Наиболее чувствительны к ним виды лишайников р.р. *Usnea*, *Alectoria*, *Ramalina*, *Lobaria*, а относительно устойчивы – *Hypogymnia*, *Xanthoria*, *Lecanora*. Применение метода требует знания экологии лишайников: видоспецифические требования к местообитанию и индивидуальные особенности видов. Лишайники относятся к хорошо изученным таксонам низших растений, но трудны для определения в полевых условиях. Применение лишеноиндикации в ландшафтно-экологических исследованиях имеет ряд ограничений, особенно в крупных городах, где часто присутствуют зоны «лишайниковой пустыни». В связи с этим необходима унификация под-

ходов и методов, разработка комплекса взаимозаменяемых методик, позволяющих проводить исследования ПТК с различной напряженностью антропогенной нагрузки.

Повышенный интерес в ландшафтно-экологических исследованиях к бриоиндикации обусловлен меньшим объемом трудоемких микроскопических исследований по сравнению с лишайниками. Они широко применимы в тундровой и таежной зонах. Немаловажно их широкое распространение и доступность отбора проб. В бриоиндикации отмечены два аспекта: 1) бриофиты при всей способности переносить неблагоприятные условия, все же весьма чувствительны к загрязнению, в частности к изменению состава атмосферного воздуха; 2) высокая сорбирующая способность мхов вызывает накопление ТМ, ПАУ, хлорорганических соединений, радионуклидов и др. С помощью бриоиндикации устанавливают наличие в атмосфере SO<sub>2</sub>, индуцируют выбросы различных предприятий. Мхи способны накапливать элементы в больших количествах, чем другие растения. Аккумуляция элементов в них менее зависит от климатических условий, чем в лишайниках. Распределение видов мхов по типам местобитания характеризует широту их экологической амплитуды. Наиболее чувствительны и показательны следующие виды мхов: *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum formosum*, *Hypnum cupressiforme*, *Rhytidiadelphus squarrosus*. Установлено, что чем больше антропогенная нагрузка на лесные ПТК, тем разнообразнее моховой покров. Для оценки трансформации ландшафтов перспективно использование индикационных возможностей бриоценоморф (Андреева, 1990).

В целом делается вывод о том, что в диагностике техногенной трансформации ландшафтов наиболее эффективно применение деревьев, мхов и лишайников. Использование видов травяно-кустарничкового яруса целесообразно в безлесных ПТК. Виды-индикаторы техногенного воздействия для тундровой, таежной и степной зон устанавливаются с учетом региональных особенностей и интенсивности антропогенной нагрузки и рассмотрены в главе 4.

**Вторая глава** посвящена методике исследований, в основу которой положен комплексный сравнительно-географический анализ состояния ландшафтов и их изменения под действием антропогенной нагрузки в изученных регионах. Для получения сопоставимых данных полевые исследования проводились в сходных ПТК. Сходство участков устанавливалось по физико-географическим признакам, основные из которых – геологическое строение, положение в рельефе, механический состав, морфология и тип почв, состав и структура фитоценоза, в лесных сообществах – возраст древостоя. На каждом ключевом участке при изучении изменения концентрации химических элементов в пространственной дифференциации природной среды и выявлении особенностей миграции химических элементов в пределах элементарного геохимического ландшафта применялись методы экологического профилирования и эталонных площадей. Определены фоновые значения биоиндикационных признаков и осуществлена верификация методов фитоиндикации при оценке экологического состояния ПТК с различным уровнем антропогенного воздействия. В работе применен комплекс ландшафтно-геохимических и биоиндикационных методов, включающих полевые исследования, лабораторный анализ, экспериментальное моделирование, статистические методы обработки и картографические способы отображения материалов.

Химический анализ проб почв и растений проводился методами спектрального, атомно-абсорбционного и ICP MS анализов в аккредитованных лабораториях ВНИИОкеангеология, ВСЕГЕИ, «Мониторинг Арктики», ИКМ Инжиниринг, БИН РАН и лаборатории «Геоэкологического мониторинга» СПбГУ. Он включал общий физико-химический анализ почв, определение валового содержания и подвижных форм (из-

влекаемых ААБ и  $1N HNO_3$ ) металлов, содержание серы, сульфатов (в растениях), также НУ, ПАУ, ПХБ (в почвах). Проведена оценка металлоустойчивости растений методом корневого теста и вегетационные опыты по накоплению ТМ растениями Южного Урала.

Статистический, корреляционный и факторный анализы полученных данных выполнены с помощью авторского пакета программ ВСЕГЕИ PGD v91.2, ВСЕГЕИ PGD 32, а также в среде Microsoft Office программой Excel Win.5,0 Rus., 2003 и 2007. Выделение фитоиндикаторов техногенной трансформации ландшафтов проведено на основе анализа аккумулирующей способности видов, рядов биологического поглощения элементов, корреляционных связей и состава парагенезисов в обобщенных факторных нагрузках, обилия, встречаемости и др. критериев, предъявляемых к выбору индикаторных видов. Экспертная оценка экологической устойчивости, ресурсного потенциала, нарушенности ПТК выполнена по программе “Признак”, разработанной в лаборатории экологического моделирования СПбГУ (Капралов и др., 1994).

В **третьей главе** дано физико-географическое описание районов исследований (1979-2011 гг.): 1) тундра, лесотундра и северная тайга Западной Сибири в пределах Ямало-Ненецкого Автономного Округа (ЯНАО) на 28 газоконденсатных месторождениях; 2) северная тайга Карелии, государственный заповедник (ГЗ) «Костомукшский», территория вблизи «ОАО «Карельский Окамыш» (КГОК), г. Костомукша; 3) горная тундра, северная тайга: Кольский п-ов в зоне воздействия комбината «Североникель» (Мончегорский район); 4) горная тундра, северная тайга: Красноярский край, Норильский и Игарский районы; 5) средняя и южная тайга - Ленинградская обл.: Приозерский, Тосненский, Лужский, Ломоносовский районы; г. Санкт-Петербург: Василеостровский, Московский, Курортный районы; 6) лесостепь и степь Башкирского Зауралья: Баймакский, Хайбуллинский и Учалинский районы, г. Сибай и г. Учалы (табл. 2).

Рассмотрены основные источники и специфика антропогенного воздействия на ландшафты. Дается анализ ландшафтно-геохимической обстановки в естественных условиях и при трансформации природных процессов под влиянием техногенеза с использованием опубликованных и собственных материалов. В основу анализа положены результаты расчета регионального геохимического фона (РГФ) почв и оценка роли ведущих факторов функционирования ПТК, полученных на основе метода главных компонент факторного анализа.

**Четвертая глава** раскрывает основные направления и методы применения фитоиндикации в ландшафтно-экологических исследованиях. Рассматриваются закономерности накопления химических элементов в фоновых условиях, особенности трансформации химического состава растений, изменение морфологических параметров, видового состава, строения и структуры фитоценозов при техногенезе.

Аргументируется положение о том, что основой фитоиндикационных исследований ПТК в условиях антропогенного воздействия является *биогеохимическая оценка*. Большое внимание уделено изменению химического состава растений, являющихся одним из первых звеньев биогенной миграции и во многом определяющих интенсивность биогеохимического круговорота (Критерии..., 1992). Исследования фоновых ПТК модельных площадей позволили установить особенности аккумуляции ТМ растениями, которые являются базовыми для диагностики трансформации геосистем под влиянием техногенеза.

Важной биогеохимической характеристикой процессов, происходящих в ПТК, является *зольность*. Она отражает уровень накопления минеральных веществ в орга-

Таблица 2. Характеристика районов исследования по степени техногенной трансформации ПТК

	Природные (фоновые) геосистемы	Ненарушенные ПТК в районах естественных геохимических аномалий	Слабонарушенные природные геосистемы под влиянием локальных источников загрязнения	Сильно нарушенные геосистемы в районах техногенных аномалий	Урбогеосистемы
Уренгойская тундра	Тундровые, лесотундровые и северотаежные ПТК на территории лицензионных участков вне зоны техногенеза	Не представлены	ПТК в зоне воздействия поисково-оценочных и эксплуатационных скважин, УКПГ, автомобильных дорог, трубопроводов и др. объектов на лицензионных участках	ПТК в промышленной зоне нефтегазовых промыслов, Ново-Уренгойского газохимического комплекса, ГКС «Новоуренгойская», УПКТ и др.	Вахтовые жилищные комплексы, г. Новый Уренгой
Район Костомукши	Северо- и среднетаежные ПТК ГЗ «Костомукшский»	ПТК государственного заповедника «Костомукшский»	ПТК вдоль автомобильных дорог, линий коммуникаций и других линейных и локальных объектов	ПТК вблизи карьера, дробильного цеха, хвостохранилища и др. производственных объектов ОАО «Карельский Окамыш»	г. Костомукша
Мончегорский район	Горнотундровые и северотаежные ПТК горного массива Хибин в 75-80 км к юго-востоку от г. Мончегорска	ПТК Чуна-тундры в 40-45 км к югу от г. Мончегорска, ПТК в 15-20 км к северу от г. Мончегорска (район г. Лысой)	ПТК горного массива Хибин вблизи ПАБСИ, ПТК в 5-10 км к северу от г. Мончегорска, ПТК массива Ньюдаивенч	ПТК вблизи производственных объектов комбината «Североникель», ПТК водосборов р. Нюд, р. Вите, р. Курка	г. Мончегорск
Ленинградская область	Средне- и южно-таежные ПТК в Ломоносовском, Тосненском, Всеволожском и Приозерском районах, в районе п. Шапки, п. Дибунны, в Курортном р-не СПб	Не представлены	ПТК Невского лесопарка, спортивной базы Суаранда, ПУНС, Курортного р-на СПб, ПТК вблизи производственных объектов п. Кузнечное, портового комплекса Усть-Луга	ПТК в пределах промышленных зон Санкт-Петербурга	г. Санкт-Петербург
Норильское плато	Горнотундровые и северотаежные ПТК Игарского и Норильского районов	ПТК медных и медно-никелевых рудопроявлений Игарского и Норильского районов	ПТК в зоне слабого воздействия РАО «Норильский никель»	ПТК в р-не Кайеркан г. Норильска	Не изучались
Башкирское Зауралье	Лесостепные и степные ПТК Челябинской обл., в 14 км к северу от г. Сибай, в р-не коллективного сада №16 вне рудоносных зон	ПТК Баймакского рудного р-на, п. Мукасово и п. Туркменево в 10-25 км на северо-запад от г. Сибай в Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоне	ПТК в р-не карьера месторождения Юбилейное, Семеновской золотоизвлекающей фабрики, Тубинского рудника	ПТК вблизи Сибайского и Камаганского карьеров, хвостохранилищ, СОФ и др. производственных объектов БМСК, УГОК, п. Калининское, п. Семеновский, п. Тубинский	г. Сибай и г. Учалы



низмах, обусловленный содержанием химических элементов в окружающей среде, степенью их доступности растениям, а также избирательным поглощением в зависимости от систематической принадлежности видов (Виноградов, 1963; Ковальский, 1973; Скарлыгина-Уфимцева и др., 1976). Средняя зольность растений составляет 3-5%. Минимальными значениями характеризуются корка и ветви древесных пород (0,5-1,5%). У кустарников зольность листьев в 2-2,5 раза превышает зольность ветвей и выше среднего показателя для растительности в целом (5% по В.В.Добровольскому, 1998). Травянистые виды имеют зольность до 5-7%. Установлено, что в естественных условиях и при слабой антропогенной нагрузке при увеличении концентрации химических элементов в среде наблюдается повышение зольности растений. При нарастании загрязнения сначала идет увеличение общего содержания минеральных компонентов в растениях, затем по мере усиления загрязнения оно снижается. В живых тканях растений этот процесс может рассматриваться как саморегуляция в условиях стресса. В корке деревьев, характеризующейся безбарьерным типом аккумуляции, наблюдается прямая корреляция между зольностью и интенсивностью техногенеза.

Аккумуляция металлов растениями обусловлена их химическими свойствами, биологическим сродством, физиологическими функциями и жизненным состоянием органов (Скарлыгина-Уфимцева и др., 1976; Алексеева-Попова, 1983, 1991; 2005; Лянгузова, 1990; 2010). Часть металлов (Cu, Fe, Mn, Zn, Co, Mo) относится к жизненно важным элементам и является катализатором ферментов в растениях. Cd, Pb, Sr, Cr, Hg чаще всего ингибируют ферменты и отрицательно влияют на процессы жизнедеятельности в растениях (Школьник, 1973; Сергейчик, 1994 и др.). Распределение МЭ в органах растений сильно варьируется в зависимости от функций элемента в организме. Установлено, что наибольшее количество металлов содержится в корнях, затем в стеблях и листьях и, наконец, - в семенах, клубнях, корнеплодах, т.е. растение обладает определенной защитной системой от токсикантов (Ковальский и др., 1981).

В растениях наблюдается постепенный рост содержания химических элементов к концу вегетации, что объясняется повышением общей зольности растительной массы. Так, на Южном Урале в районе исследований содержание Ni, Co, Cr в растениях увеличивается осенью в 2-3 раза по сравнению с весной. Сравнение химического состава растений Уренгойской тундры показало значительные изменения в уровне содержания ТМ при активизации ростовых процессов. В начале вегетации наблюдается относительная однородность элементного состава видов. В середине лета отмечается значительная трансформация концентрации металлов, обусловленная как спецификой биохимических процессов в различных видах растений, так и изменением подвижности элементов в конкретных ландшафтно-геохимических условиях и возможностью вовлечения ТМ в биологический круговорот. Так, в начале вегетации содержание элементов биологического захвата Ba и Pb в растениях выше, чем в июле, а биогенных Zn и Mn, наоборот, – ниже.

Во всех изученных регионах растения обладают хорошо выраженными индивидуальными биогеохимическими особенностями. Отмечены достоверные различия накопления металлов в зависимости от систематической принадлежности и жизненной формы. Так, в фоновых условиях севера Западной Сибири брусника *Vaccinium vitis-idaea* и багульник *Ledum decumbens* выделяются интенсивной аккумуляцией Mn, Zn и Ba, лишайник *Cladonia alpestris* и лиственница *Larix sibirica* – Pb. В фоновых северо-таежных ПТК Костомукши мхи отличаются повышенным по сравнению с кустарничками концентрациями Fe, содержание его в 10-20 раз выше, чем в бруснике и чернике. Брусника характеризуется повышенным содержанием Zn, в несколько раз

превышающим концентрации в чернике. В чернике отмечается интенсивное поглощение Mn и Fe, в среднем в 2 раза превышающее аккумуляцию их брусникой. Это хорошо согласуется с литературными данными, показывающими интенсивную аккумуляцию Mn видами рода *Vaccinium* (Раменская, 1974; Алексеева-Попова, 1983, 2005; и др.). По определению Н.С. Петруниной (2002) эти растения – привычные и типичные концентраторы Mn, способные накапливать его в условиях фонового содержания в почве. По мнению Т.А. Парибок (1970) накопление Mn кустарничками в подзоне северной тайги вызвано его высокой доступностью в условиях кислой реакции почв.

Химический состав растений определяется комплексом ландшафтно-геохимических условий. По результатам факторного анализа в фоновых ПТК на территории нефтегазовых месторождений севера Западной Сибири выделяется 3-4 значимых природных процесса, регулирующих накопление МЭ в растениях. Первый фактор (42-48% корреляционных связей) – породный. С ним связана группа, включающая большинство химических элементов – Zr, Y, V, Cr, Ti, Ba, Co. В лишайнике к ним добавляются Ni и Sr. Более сложное влияние подстилающих горных пород отмечено в карликовой березке, для которой и второй фактор отражает минералогическую особенность подстилающих пород. Второй ведущий процесс естественных тундровых ландшафтов с весом 10-13% отличается положительной связью накопления Pb, Zn и Mn в противовес Cu, Zr и Ti. К последним в багульнике присоединяются Y, Ba, Sr и Ni, в карликовой березке – Ag, а в лишайнике – Cr. Сравнение с факторной структурой почв позволяет рассматривать его как отражение изменения подвижности химических элементов при смене песчаных почв торфяниками. Устойчивую роль фактора в ландшафте доказывает стабильный состав элементов во всех изученных видах. Около 7 % корреляционных связей объясняется процессом образования труднорастворимых органоминеральных комплексов Cu и Mn в органогенных горизонтах почв элювиальных фаций.

Таблица 3. Фоновое содержание МЭ в растениях различных ПТК

Химический элемент/ Регион	Уренгойская тундра/лесотундра	Кольский полуостров, северная тайга	Норильское плато, северная тайга	Костомукшский район, Карелия, северная тайга	Ленинградская область, средняя тайга	Башкирское Зауралье, лесостепь/степь	Кларк по В.В. Добровольскому, 1998
N проб/видов	1250/7	419/14	1047/11	989/8	240/7	2000/14	
Ba	81	н/о	13	н/о	9	н/о	22,5
Cu	6	4	24	3	0,7	13	8
Co	0,5	0,2	0,9	0,2	0,06	0,16	0,5
Mn	330	45	57	30	15	39	205
Ni	1,5	20	10	0,6	0,3	1,3	2
Pb	2	0,2	0,8	1,9	0,9	2,1	1,25
Zn	17	15	10	10	13	43	30
Fe	48	24	н/о	50	н/о	145	н/о

Промывной режим почв таежной зоны способствует выносу МЭ и снижению интенсивности их вовлечения в биологический круговорот. Исследования на территории ПУНС и в заповеднике «Костомукшский» показали, что фоновое содержание большинства ТМ в корке сосны *Pinus sylvestris* ниже средних показателей, приводимых В.В. Добровольским для растительности суши (далее – кларка растений). При этом растения ПТК естественных геохимических аномалий характеризуются высоким

содержанием ТМ, типоморфных минерализации. Средние показатели содержания элементов, принятые за региональный фон (кларк) растений (РКР, табл. 3), свидетельствуют о том, что изученные виды Норильского плато характеризуются низкими величинами Mo, Mn, Ag, Y, Pb, Ga, V, Zr, Sc и Zn по сравнению с кларком растений по В.В. Добровольскому. Концентрации Ti и Ba близки к нему, а Cu, Ni, Cr, Sr и Co в 2–5 раз превышают его. Сопоставление РКР Норильского района с РКР Уренгойской тундры, близкой по физико-географическим условиям, но формирующейся на бедных в геохимическом отношении песчаных отложениях, показало, что общим для тундровых ландшафтов Сибири является низкое содержание Ag, Y, Pb, Ga, Zn и Sr по сравнению с кларком растений. Геолого-геохимические особенности регионов определяют накопление в растениях Уренгойской тундры Ba, Ti и Mn, а в растениях Норильского плато – Cu, Ni и Co. Резкое снижение концентрации Mn в последних можно объяснить хорошо известным антагонизмом в биологических системах Cu и Mn (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ильин, 1991 и др.).

Анализ накопления МЭ растениями ПТК Норильского плато свидетельствует о достоверных различиях их аккумуляции в зависимости от жизненной формы и систематической принадлежности видов. По интенсивности поглощения металлов все изученные растения можно расположить в следующем порядке: кустарники: *Betula nana* > *Salix lanata* > *Salix glauca* > *Salix phylicifolia* > *Duschekia fruticosa*; кустарнички: *Ledum palustris* > *Vaccinium uliginosum* > *Empetrum nigrum*; разнотравье (представители семейств): *Caryophyllaceae* > *Ranunculaceae* > *Asteraceae* > *Polygonaceae* > *Fabaceae*. Карликовая березка во всех регионах в разных ландшафтно-геохимических условиях отличается повышенными содержаниями Mn, Ba, Zn и относится к привычным концентраторам этих элементов (Алексеева-Попова, 1967; 2000; Алексеева-Попова, Дроздова, 2001, 2004 и др.). К растениям-концентраторам Cu относятся *Delphinium elatum* и смолевка *Silene paucifolia* Ledeb.; Ni, Co, Cr – сассурея *Saussurea alpina* (L.) DC. и горец *Polygonum bistorta* L. Высокий коэффициент биологического поглощения (Кб) Zn характерен для представителей семейства крестоцветных, карликовой березки и лишайников, Ni и Cu – для видов рода *Veronica* и лишайников.

Методом главных компонент факторного анализа выделено от 3 до 6 значащих факторов, отражающих особенности геологического строения, закономерности биологической аккумуляции МЭ и геохимическую специализацию изученных видов. Главная особенность факторной структуры – ведущая роль оруденения в накоплении МЭ. Однако каждому виду растений присущи свои особенности их аккумуляции. Так, в листьях и ветвях *Betula nana* факторный анализ выявил по пять значащих факторов, два из которых являются рудными, с общим весом корреляционных связей в выборках листьев – 45%, ветвей – 19%. В листьях I фактор отражает биологическую аккумуляцию МЭ, ведущее место в которой занимают типоморфные медно-никелевому оруденению ТМ. II фактор этой же выборки ответствен за накопление Cu, четко разделенной с породными элементами Ti, Y, Sn, Mo, La, V и Ag. Остальные факторы характеризуют особенности хода физиологических процессов в листьях ерника.

Химический состав растений естественных геохимических аномалий Южного Урала определяется спецификой медноколчеданной минерализации. Основные индикаторные металлы в растениях – Zn, Cu и Fe. Концентрация МЭ в укосах биомассы существенно различается, как в отдельных агроботанических группах, так и по годам. Наименьшее их содержание наблюдается в злаках. Максимальные концентрации всех металлов обнаружены в разнотравье и ветоши. Количество отмершей биомассы растений и ее химический состав индицируют особенности биологического круговорота,

сбалансированность миграционных потоков и интенсивность техногенной нагрузки. С отмершей частью растений выводятся ТМ и таким образом поддерживается их оптимальный уровень в живых тканях. Накопление типоморфных рудопроявлению металлов отмечено в разнотравье. Изучение Кб, содержания и пространственного распределения ТМ позволяет выделить виды, рекомендуемые в фитоиндикационных исследованиях, – полынь *Artemisia austriaca*, вероника *Veronica incana*, чабрец *Thymus marschallianus*, шалфей *Salvia stepposa* и подмаренник *Galium verum*.

В пределах элементарного геохимического ландшафта повышение содержания рудных металлов в растениях отмечается при близком залегании горных пород, а также при переходе от элювиальных к иллювиальным и подчиненным фациям. Изучение химического состава растений на модельных площадях в течение 10 лет указывает на существенное изменение показателей из-за погодных условий. Максимальное содержание ТМ отмечается во влажные годы, минимальное – в сухие. При этом концентрация может меняться в 2-3 раза, поэтому при проведении фитоиндикационных исследований необходимо ежегодное определение фоновых характеристик (рис. 4).

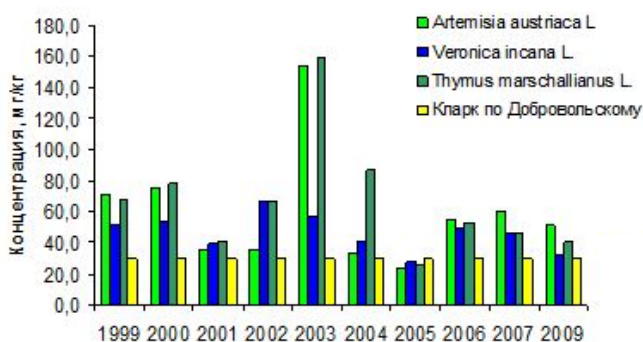


Рис. 4. Изменение среднего содержания Zn в растениях иллювиальной фации фоновых ПТК (Сибай-Гайская рудоносная зона, Южный Урал)

Индикатором выпадения кислотных дождей служат значения pH и содержание серы и сульфатов в коре сосны обыкновенной. Величина pH корки сосны варьируется в пределах 2,8-4,5. В фоновых ПТК она составляет 4,80-5,00 и значительно снижается в районах горнорудного производства. Вместе с тем, pH корки сосны можно использовать как индикатор выпадения кислотных дождей только при соблюдении требований по репрезентативности пробоотбора – одновозрастность и одинаковая сомкнутость древостоев, а при сравнительном анализе – сходство площадей по положению в элементарном геохимическом ландшафте и экспозиции склонов.

На территории Костомукшского заповедника кислотность корки сосны изменяется от 3,5 до 3,9, что несколько превышает значение кислотности корки сосны в нарушенных условиях. Это объясняется влиянием выбросов Костомукшского ГОКа и трансграничным переносом загрязненных воздушных масс. Значение pH корки тесно коррелирует с содержанием сульфатов ( $r = -0,7$ ). В хорошо продуваемых ПТК вершин холмов и на западных склонах содержание сульфатов в коре превышает 700 мг/кг (фон – до 300 мг/кг), при этом величина pH корки сосны уменьшается до 3,5.

В Ленинградской области на территории Приладожской станции pH корки сосны составляет 3,5-4,9. Минимальные значения характерны для разреженных сосняков на вершинах сельг (3,3-3,6). Здесь же наблюдается наибольшее количество  $SO_4^{2-}$  – 700–1700 мг/кг. Снижение pH и увеличение содержания в коре сосны сульфатов отмечается также на юго-западных склонах. В сомкнутых древостоях склонов и межсельговых понижений оно увеличивается до 4,1–4,2; при этом содержание сульфатов равно 100–160 мг/кг. В прибрежной зоне Финского залива в разреженных сосняках pH корки сосны снижается до 3,8–4,0. С увеличением сомкнутости древесного яруса она возрастает до 4,2–4,5, а при удалении от береговой линии pH корки увеличивается до 4,6–4,9. В пригородной зоне Санкт-Петербурга pH корки сосны изменяется от 3,9 (Невский лесопарк) до 5,0 (п. Шапки). Содержание  $SO_4^{2-}$  в пробах корки, отобран-

ных на модельных площадях, не превышают фонового значения – концентрация их составляет от 25 мг/кг (п. Дибуны) до 137 мг/кг (ст. Шапки). Доля  $\text{SO}_4^{2-}$  в общем количестве серы изменяется от 10 до 96%.

Выпадение кислотных дождей в зоне воздействия комбината «Североникель» (Кольский полуостров) индицируется снижением величины рН корки сосны до 3,0–3,7. На расстоянии 10–12 км к югу от комбината концентрация ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  достигает 1570 мг/кг, а на условно фоновой территории (40–50 км к югу от источника загрязнения) – 1415 мг/кг.

В качестве показателя интенсивности выпадения кислотных дождей использована концентрация серы в растениях. Сера, как биогенный элемент, накапливается в тканях растений и ее содержание в надземной массе кустарничков на порядок выше, чем в корке сосны. Значение РКР, рассчитанное по содержанию серы в надземной массе черники и брусники в Костомукшском заповеднике, составляет 11125 мг/кг. Сравнение с кларком А.П. Виноградова (1956) для растений суши (3500 мг/кг) показывает обогащение изученных растений серой в 3 раза. Максимальное содержание серы, вызванное загрязнением воздуха, обнаружено в чернике на вырубке (27500 мг/кг). Близкое к нему значение отмечено на территории вблизи ГОКа – 24050 мг/кг. Таким образом, большая часть поллютантов выпадает перед лесом, который служит естественным барьером продвижения загрязненного воздуха вглубь лесного массива.

Большое влияние на содержание и перераспределение серы в горизонтальной структуре ПТК оказывают рельеф и сомкнутость древостоя. Повышенное содержание серы наблюдается в кустарничках, произрастающих в низинах, на заболоченных участках и в понижениях между холмами. В элювиальных ПТК в результате латеральной миграции концентрация серы в кустарничках уменьшается (до 8150–8800 мг/кг). Это значительно усложняет диагностику техногенной нагрузки, поэтому рассмотренный метод не может быть рекомендован для внедрения в практику ландшафтно-экологических исследований. Таким образом, из рассмотренных показателей к наиболее простым, удобным и надежным относится измерение рН корки древесных пород. Преимущество его показано на примере ПТК г. Санкт-Петербурга, где наблюдается как подщелачивающий, так и подкисляющий эффект воздействия источников загрязнения. Влияние кислотных дождей установлено с помощью факторного анализа и индицируется отрицательной корреляцией величины рН и концентрации сульфатов. В корке тополя *Populus balsamifera* в Петербурге на них приходится 8,3% всех корреляционных связей, что указывает на небольшой вклад кислотных дождей в общий уровень загрязнения города.

Специфическим индикатором техногенной трансформации ландшафтов служит концентрация ТМ в растениях. На основе сравнительной оценки химического состава растений в ряду нарастания антропогенного воздействия установлены виды, рекомендуемые при фитоиндикационных исследованиях трансформации ландшафтов в различных ландшафтно-географических условиях, а также индикаторные элементы, по которым проводится оценка загрязнения.

В тундровых ПТК наиболее чувствительны к повышению содержания поллютантов в компонентах ландшафта лишайник *Cladonia alpestris* и багульник *Ledum decumbens*. Карликовая березка *Betula nana*, голубика *Vaccinium uliginosum*, ива *Salix lanata* и брусника *Vaccinium vitis-idaea* характеризуются более стабильным химическим составом и отвечают преимущественно на сильное загрязнение почв. В долинах рек и на водоразделах, где встречаются листовенничные редины и редколесья, рекомендуется использовать корку листовенницы *Larix sibirica*. Локальное загрязнение

ПТК при проведении буровых работ отражается в повышенной аккумуляции Ва, Си и Сд в лишайнике, а также Ва, Сд, Аs и Рb в надземной массе кустарничков – багульника, брусники и голубики. Их аномальные концентрации установлены в ПТК вблизи карьеров, кустов скважин и перекрестков дорог. Результаты факторного анализа подтвердили, что при загрязнении ПТК, вызванном разработкой месторождения, меняется характер корреляционных связей и состав ассоциаций химических элементов. В лишайнике *Cladonia alpestris* наблюдается разделение химических элементов на две группы: породные элементы У, Тi, Сr, Со, V противопоставлены Си, Мn, Ва и Sr. Состав этой группы МЭ указывает на нарушение естественного процесса торфонакопления при повсеместной подсыпке песчаного материала. Загрязнение почв Си, Ni, Рb и накопление их в поверхностном горизонте в составе органоминеральных соединений отражается в растениях парагенезисами Мn-Ва-Си-Рb и Ni-Рb-Мn и появлением нехарактерного для природных условий антагонизма Си и Zn. В связи с оттайкой грунта и развитием процессов вторичного заболачивания на техногенных площадках вес хелатогенеза по сравнению с фоновыми участками возрастает в 2–3 раза. Таким образом, основными индикаторами антропогенной трансформации тундровых ПТК в результате нефтегазодобычи служат увеличение концентрации Zn, Ва, Рb и Ni в индикаторных видах растений, нарушение структуры связей химических элементов в обобщенных факторных нагрузках и увеличение диапазона содержания металлов.

В таежных ландшафтах наибольшей индикаторной значимостью обладает корка сосны *Pinus sylvestris*. На примере ПТК северной, средней и южной тайги показано, что безбарьерный тип аккумуляции корки сосны позволяет оценить уровень загрязнения как в условиях локальных источников воздействия (комбинат «Североникель» и Костомукшский ГОК), так и при комплексном многокомпонентном влиянии (пригороды СПб). Оно проявляется в увеличении содержания ТМ, типоморфных выбросам предприятий: «Североникель» - Си, Ni и Со, Костомукшский ГОК – Fe и Мn, пригороды Санкт-Петербурга – Рb, Zn, Си, Ni и Сd. Корка деревьев отражает интегральное загрязнение за длительный период времени, а ее химический состав показывает средний многолетний уровень содержания поллютантов в окружающей среде, т.е. она может выступать в качестве индикатора хронического загрязнения компонентов ПТК.

Содержание поллютантов в живых тканях растений в большей мере определяется условиями конкретного года. Оно указывает, прежде всего, на загрязнение за текущий вегетационный период или за последние несколько лет. Сравнительный анализ содержания МЭ в живых тканях различных жизненных форм и видов растений (хвоя сосны, надземная масса кустарничков брусники и черники, лишайники *Cladonia mitis*, *C. rangiferina* и *Cetraria islandica*, мхи *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi*, грибы подосиновики *Leccinum auranticum* и подберезовики *Leccinum scabrum*) показал, что лучшими концентраторами являются мхи. При загрязнении ПТК содержание в них ТМ в несколько раз выше, чем в других видах. Однако в условиях сильного загрязнения, например, вблизи Центрального карьера КГОКа или комбината «Североникель» зеленые мхи отсутствуют, и в качестве фитоиндикатора, наряду с коркой сосны, рекомендуется использовать бруснику и чернику. Максимальное накопление ТМ отмечено в грибах, но в связи с сезонностью появления плодовых тел они не могут служить постоянными показателями техногенной трансформации ландшафтов.

Накопление ТМ в растениях во многом определяется особенностями латерального перераспределения в условиях пересеченного рельефа. Гумидный климат и кислая реакция среды способствуют миграции вещества в пределах элементарного геохимического ландшафта таежных ПТК. В фоновых условиях растения подчиненных

фаций отличаются от видов автономных местообитаний более высоким содержанием большинства металлов. Антропогенное загрязнение приводит к изменению указанных закономерностей. Отмечается накопление поллютантов в растениях подветренных склонов и вершин моренных холмов. Наряду с этим, ведущее значение имеет сомкнутость и состав древостоя, обладающего экранирующим эффектом.

Использование сосны обыкновенной, мхов и грибов для оценки состояния урбанизированных территорий, в том числе городских кварталов, невозможно в связи с низкой устойчивостью этих растений к комплексному техногенному воздействию. В городских условиях положительный эффект применения фитоиндикационного метода с использованием корки тополя *Populus balsamifera* показан на примере оценки загрязнения Василеостровского и Московского районов Санкт-Петербурга. В городе корка тополя отличается высоким уровнем содержания большинства ТМ, значительно превышающим фоновые показатели. Метод главных компонент факторного анализа содержания ТМ, сульфатов и величины рН корки тополя подтвердил, что наибольший вклад вносит аэротехногенное загрязнение, обусловленное выбросами автотранспорта. В факторной структуре оно представлено парагенезисом Co-Ni-Pb-Mn-Zn-Cu-Cd с весом до 45% всех корреляционных связей. Результаты биоиндикационных исследований показали, что Московский район загрязнен в значительно меньшей, чем Василеостровский. Миграция вещества в системе «почва–растение» осложняется аэротехногенной эмиссией, подсыпкой привозного грунта, а также частичной рекультивацией территории. В связи с этим четкой зависимости между химическим составом почв и растений, типичной для природных комплексов, в урбогеосистемах не наблюдается. Накопление ТМ в биоте зависит не только от интенсивности круговорота ТМ в системе «почва – растение», но и отражает особенности взаимодействия компонентов в системе «атмосферный воздух–растение».

В лесостепных ПТК Южного Урала загрязнение при разработке медноколчеданных месторождений в Учалинском районе приводит к росту концентрации в растениях Zn, Cu и Fe, в 6-8 раз превышающей региональные фоновые показатели. Установлены растения-концентраторы Zn – мордовник *Echinops ritro*, чабрец *Thymus marschallianus*, Cu – мордовник, чабрец, караганник *Caragana arborescens*, Fe – мордовник, зопник *Phlomis tuberosa* и подмаренник *Galium verum*.

Значительная техногенная трансформация степных ПТК в районе БМСК наблюдается вблизи п. Старый Сибай, п. Калининское и на западном берегу о. Култубан. Однако содержание ТМ в укосах биомассы вблизи хвостохранилища, карьера и обогатительной фабрики БМСК не превышает фоновых значений. Высокая толерантность коренных популяций злаков к загрязнению определяет низкий уровень содержания ТМ в укосах степной биомассы, состоящих в основном из представителей данного семейства. В свою очередь, это обуславливает повышенную устойчивость геосистем к загрязнению ТМ. Индикаторами трансформации ПТК служат виды разнотравья, в них содержание Cu, Zn, Pb и Fe в 1,5-10 раз выше регионального фона. К концентраторам Cu и Zn относятся полынь *Artemisia austriaca*, мордовник, чабрец *Thymus marschallianus*, шалфей *Salvia stepposa* и вероника *Veronica incana*, в которых содержание Cu и Zn соответственно в 2-10 и 1,5-2 раза выше фоновых показателей.

При смене степной зоны лесостепной, увеличении кислотности почвенных растворов и повышении подвижности ТМ возрастает их содержание в растениях. В дикорастущих растениях в окрестностях г. Учалы (лесостепь) концентрация изученных ТМ выше, чем в районе БМСК (степная зона), т.е. при сходном воздействии БМСК и УГОК на окружающую среду негативный эффект влияния последнего проявляется в



большей степени. Сопряженный анализ валовых и подвижных форм ТМ в почвах, а также уровня концентрации их в растениях показал, что индикаторами техногенной нагрузки на лесостепные ПТК служат Cu и Zn, а на степные ПТК – Zn.

Рис. 5. Изменение окраски цветков растений в условиях Сибай-Гайской рудоносной зоны Южного Урала вне антропогенной нагрузки: а – изменение синей окраски цветков *Veronica incana* на розовую; б, в - экземпляры коровьяка фиолетового *Verbascum phoeniceum* с белыми и розовыми цветками; г – обесцвечивание цветка *Salvia stepposa*.



Накопление ТМ в растениях и нарушения метаболизма, возникающие при всех видах воздействия на ПТК, приводят к угнетению роста и развития, изменению строения тканей, органов и в целом к модификации диагностических признаков видов. Неспецифический характер *морфологических изменений* растений под влиянием аномальных геохимических условий, обусловленных естественными и техногенными факторами, демонстрируют результаты исследований на Южном Урале.

В условиях засушливого климата обогащение почв ТМ и резкое увеличение их подвижности во влажные периоды способствуют развитию морфологических эндемий. Это явление отмечено как в пределах естественных геохимических аномалий, так и на антропогенно трансформированных участках. Под влиянием высоких концентраций ТМ наблюдаются различные дисфункции развития растений, выражающиеся в появлении хлороза, некроза и образовании тератов (рис. 5). Наиболее яркие биогеохимические эндемии обнаружены у полыней *Artemisia austriaca*, *A. marschalliana*, вероники *Veronica incana*, подмаренника *Galium verum*, лапчатки *Potentilla humifusa*. Они затрагивают генеративную сферу и проявляются в аномалиях строения цветков, израстаниях соцветий и изменениях окраски околоцветника.



а



б

Рис. 6. Измененные формы побегов ивы *Salix lapponum* (а) в зоне воздействия комбината «Североникель» (Кольский полуостров) и *Salix alba* (б) в пределах естественной медноколчеданной минерализации на Южном Урале

Неспецифичность морфологических изменений под влиянием техногенеза демонстрируют близкие по внешнему облику тераты ивы лапландской и белой на Кольском полуострове и Южном Урале. Химический анализ показал, что в первом случае



они связаны с высоким содержанием Ni и Cr, а во втором – Cu и Zn (рис. 6).

Такие яркие аномалии развития организма являются качественным признаком стрессовой ситуации. Использование признаковой системы “присутствие-отсутствие параметра” не дает представления об интенсивности воздействия или частоте стресса. Переход к количественной оценке достигается при использовании бонитировочных шкал некрозов, хлорозов или шкалы продолжительности жизни хвои (листвы) древесных пород. Интенсивность воздействия диагностируется степенью поражения листьев хлорозом или некрозом (% покрытия), представленной в виде соответствующих классов. Картирование биоиндикационных признаков помогает восстановить пространственное распределение стресса, а сравнительная оценка серии пробных площадей дает объективную информацию распределения параметра в горизонтальной структуре ПТК.

Исследования сосны обыкновенной на модельных площадях Северо-Запада РФ показали, что изменение морфологических характеристик деревьев и хвои обусловлено экстремальным водным и минеральным режимами, орографическими условиями, освещенностью и др. естественными факторами, а также загрязнением ТМ, SO<sub>2</sub> и действием кислотных дождей. Это снижает информативность рассматриваемых признаков и создает серьезные проблемы в выделении антропогенной составляющей их изменчивости. Кроме того, в пределах исследованных территорий Северо-Запада РФ распространены две разновидности сосны обыкновенной *Pinus sylvestris*. На Кольском полуострове и в районе г. Костомукша встречается северная (лапландская) сосна, отличающаяся более короткой и широкой хвоей, сохраняющейся на деревьях до 6-7 лет, и мелкими желтоватыми шишками. Южнее произрастает лесная разновидность сосны с более коротким жизненным циклом хвои (до 3-4 лет) и более крупными шишками. Это не позволяет применять морфологические параметры для средне- и мелкомасштабного картографирования техногенной трансформации ландшафтов и ограничивает их использование локальным уровнем.

Анализ длины хвои показал достоверные различия между средними значениями на условно фоновых участках и сильно загрязненных ПТК (как у комбината «Североникель», так и у КГОКа). В пределах 15-ти километровой зоны наблюдается тенденция снижения длины хвои при удалении от источника загрязнения, но достоверной корреляции изменения длины хвои и содержания в ней ТМ не установлено. Исключение составляет Zn, накопление которого благоприятно влияет на рост хвои в условиях Кольского полуострова. Кроме того, на пересеченном рельефе (комбинат «Североникель») антропогенное воздействие на длину хвои сосны нивелируется естественными факторами дифференциации среды (микроклиматом, особенностями минерального питания, физико-химическими свойствами почв и т. д.).

В целом морфологические характеристики сосны рекомендованы как дополнительные признаки техногенной трансформации ПТК. Территория, испытывающая воздействие КГОКа, где в растениях обнаружены максимальные концентрации Fe, Mn и Ni, характеризуется повсеместной сухостерностью древостоя, увеличением количества сухостоя, фаута, уменьшением высот и диаметров стволов. В ГЗ «Костомукшский» морфологических изменений не обнаружено. Однако на продуваемых склонах западной экспозиции, где содержание сульфатов в коре сосны более 700 мг/кг и рН уменьшается до 3,5, появляется хлороз хвои, высота отторгнутой корки увеличивается с 3,5 до 7 м, покрытие эпифитных лишайников снижается с 60 до 10%.

Изменение морфологических параметров брусники и черники обнаруживается по высоте куста, ширине и длине листовой пластинки, в появлении хлороза и некроза.

Под влиянием выбросов Костомукшского ГОКа высота кустов черники и брусники уменьшается в среднем на 13-27%. Наибольшее угнетение отмечено на расстоянии 1,5-2 км от КГОКа, где установлено максимальное содержание S и Fe в почвах и растениях. Наблюдается достоверная отрицательная зависимость между накоплением кустарничками Fe, Mn и их высотой. Обнаружено уменьшение площади листовых пластинок брусники. Значимые различия ширины ее листовой пластинки на фоновой и антропогенно нарушенной территории наблюдаются в 72% случаев, а длины – в 83%. Установлена достоверная отрицательная корреляция между длиной и шириной листьев брусники и содержанием в них  $SO_4^{2-}$ . Повышение значений pH в условиях сильно кислой среды северотаежных ПТК, наоборот, положительно сказывается на их росте. Под действием выбросов растет общая толщина листовой пластинки и уменьшается ее площадь. Вместе с тем, в г. Костомукша под пологом сосняков брусника отличается увеличением морфологических характеристик листьев при возрастании содержания  $SO_4^{2-}$  в биомассе и значения pH. Рост площади листовых пластинок сопровождается их удлинением, и лист приобретает более вытянутую форму. В целом ассимиляционный аппарат брусники неоднозначно реагирует на изменение условий местообитаний на урбанизированных территориях. Ингибирование роста и развития растений под влиянием высокого содержания ТМ в почвах в ряде случаев нивелируется поступлением биогенных элементов, нейтрализацией почвенных растворов и смягчением микроклиматических условий. Таким образом, происходит компенсация жизненно важных факторов (суровый климат, высокая кислотность среды, недостаток элементов минерального питания), лимитирующих функционирование растений в условиях северотаежных ПТК.

Таким образом, при использовании морфологических показателей растений для оценки антропогенного воздействия необходимо учитывать их естественную изменчивость. Избежать ошибок позволяет работа с репрезентативными выборками данных на фоновых и испытуемых площадях, а также использование морфологических показателей в комплексе с другими индикаторными признаками, главным образом, химическим составом растений и содержанием поллютантов в природных средах. Возможность количественной оценки этих параметров при сравнительном анализе фоновых и антропогенно нарушенных ПТК с применением математической статистики повышает надежность прогноза антропогенных сукцессий и выводов о современном состоянии ландшафтов.

Техногенная трансформация ПТК проявляется в изменении *видового состава и структуры растительных сообществ*. В биоиндикационных исследованиях в качестве экспресс-оценок широко применяются некоторые постоянные фитоиндикаторы. Они во многом облегчают анализ комплекса факторов природной среды и антропогенного воздействия. Однако в отсутствие у растений специальных приспособлений к антропогенезу одни и те же реакции организмов могут быть вызваны как природными, так и техногенными факторами. Необходимо учитывать также закон замещения Алехина, компенсацию экологических факторов, их синергизм и антагонизм и влияние зональных процессов на особенности флористического состава фитоценозов. При выявлении индикаторных видов необходимо знание как флористических особенностей, так и закономерностей формирования растительного покрова в целом.

В соответствии с задачами исследования формируются требования к виду-фитоиндикатору. При оценке состояния ПТК по морфологическим отклонениям в качестве индикаторов рекомендованы наиболее чувствительные виды. При изучении химического состава растений как показателей загрязнения необходимы устойчивые

виды, отражающие изменение химизма среды. При оценке техногенной трансформации ПТК целесообразно использовать несколько взаимозаменяемых видов, что позволяет интегрировать результаты исследований и повысить эффективность оценки.

На примере растительности Норильского плато, Южного Урала и севера Западной Сибири показана перспективность использования корреляционных плеяд видов, получаемых с помощью нелинейного графического метода дендритов. Группы тесно связанных между собой видов (плеяды) имеют различное происхождение. Они отражают как пути становления флоры региона и воздействие на видовой состав основных географических и флористических центров, так и экологические условия местообитаний, в том числе техногенное воздействие. Антропогенные нарушения и загрязнение природной среды проявляются в вульгаризации флоры, изменении видового разнообразия, внедрении рудералов, увеличении обилия апохоров и в изменении структуры связей между видами. При корреляционном анализе растительности Уренгойской тундры было выделено 20 корреляционных плеяд, отражающих географические центры формирования флоры или связанных с особенностями местообитаний и антропогенным воздействием (Арестова, Опекунова, 1998). При обустройстве нефтегазовых месторождений происходит нарушение растительного покрова и загрязнение территории. При слабом механическом воздействии первыми исчезают из сообщества кустарники *Betula nana*, *Salix glauca*, *S. lanata*.; затем кустарнички – *Empetrum subholarcticum*, *Ledum decumbens*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*, одновременно происходит оголение грунта, вызывающее оттаивание многолетней мерзлоты. На дренированных участках увеличивается количество луговых видов, преимущество имеют *Chamaerion angustifolium*, *Festuca ovina*, *Arctagrostis latifolia*, *Calamagrostis holmii*, *C. langsdorffii*, что отразилось в составе и связях построенных корреляционных плеяд. Чаще всего разрастание этих видов отмечается на нарушенных луговых сообществах пойм и по колеям вездеходов на водоразделах. Подобное усиление роли этих видов в составе растительных группировок отражает начинающиеся процессы олуговения участков тундры. Характер сукцессии фитоценозов при нарастании антропогенной нагрузки можно установить по входящим в плеяду апохорным видам, получающим преимущественное развитие при нарушениях фитоценоза.

Метод корреляционных плеяд использован для оценки антропогенной динамики растительности Южного Урала. Показана значительная перестройка состава и структуры зональных степных и лесостепных сообществ Башкирского Зауралья за период с 1978-80 по 2000-2005 гг. Участие элементов «плейстоценовой степи» в составе типчаковой плеяды показывает распространение растительности нарушенных местообитаний на горные вершины и склоны. Виды-концентраторы ТМ, устойчивые к условиям естественных геохимических аномалий, в настоящее время тесно связаны с видами вторичных сукцессий, указывая на прогрессирующее загрязнение. Существование плеяды настоящих зональных ковыльных степей, участие в составе биоценозов эндемичных и реликтовых видов, говорит о наличии внутреннего потенциала, определяющего возможность самовосстановления ПТК при снижении техногенного воздействия.

Влияние техногенной нагрузки на растительные сообщества проявляется, прежде всего, в изменении их структуры, состава и строения. В многоярусных фитоценозах основное воздействие оказывается на верхний – древесный ярус. На примере модельных участков Ленинградской области, показано, что видовой состав напочвенного покрова, формируясь под влиянием множества случайных факторов, является от-

ражением не только конкретной ландшафтно-экологической ситуации, но и указывает на пространственно-временную изменчивость и динамику геосистем.

В целом биоиндикаторные признаки *флористического* и *фитоценотического* уровней имеют большое значение при визуальных рекогносцировочных и мониторинговых исследованиях, особенно в труднодоступных районах. Смена коренных фитоценозов вторичными, соотношение их площадей и стадии восстановительных сукцессий свидетельствуют об интенсивности антропогенного влияния и степени нарушенности ПТК. Ряды антропогенных сукцессий аналогичны пространственно-временным рядам естественных динамических смен. Однако самовосстановление ПТК существенно отличается по срокам и продолжительности отдельных стадий.



Рис. 7. Комплекс методов биоиндикации для диагностики техногенной трансформации ПТК

**Пятая** глава посвящена экспертной оценке состояния ландшафтов с применением методов биоиндикации широкого спектра признаков: от биохимического уровня до ценотического. В зависимости от вида и интенсивности антропогенной нагрузки комплекс методов биоиндикации меняется (рис. 7). Физиологические и биохимические признаки индикаторных видов позволяют установить нарушения на ранних стадиях антропогенного воздействия на ПТК. Морфологический анализ и использование тест-объектов рекомендуются во всех типах ПТК для оценки комплексного антропогенного воздействия. Применение тест-объектов в условиях опыта позволяет установить количественные связи в системе «доза-эффект». Флористический и фитоценотический методы могут быть использованы в районах естественных геохимических аномалий и в слабо нарушенных ПТК. Морфологический анализ и использование тест-объектов рекомендуются во всех типах геосистем для получения качественной оценки антропогенного воздействия. Для количественной характеристики и иденти-

фикации источников загрязнения в комплекс методов должен входить анализ содержания поллютантов. Экспресс-оценка экологического состояния ПТК с разной степенью нарушенности проводится фитоценоотическими методами.

Фитоиндикация позволяет оценить комплексное антропогенное воздействие как на природные объекты, так и на урбо- и агроландшафты. Наряду с интенсивностью воздействия выявляются экологические последствия нарушений на разных уровнях организации геосистем. Информативность отдельных показателей меняется, поэтому при оценке экологического состояния ландшафтов рекомендовано использовать несколько взаимодополняющих биоиндикационных признаков. Эффективность метода увеличивается при одновременном анализе абиотических компонентов, позволяющих на первых этапах исследования верифицировать индикаторную способность, чувствительность и значимость биоиндикаторов в конкретных условиях местообитания. В основе ландшафтно-экологических исследований лежит изучение фоновых ПТК (см. рис. 2). Применение фитоиндикационных методов в сочетании с компьютерными технологиями и экспертной оценкой позволяет прогнозировать изменения ПТК при нарастании нагрузки, оценить степень экологического риска загрязнения, обосновать рекомендации по оптимальному природопользованию.

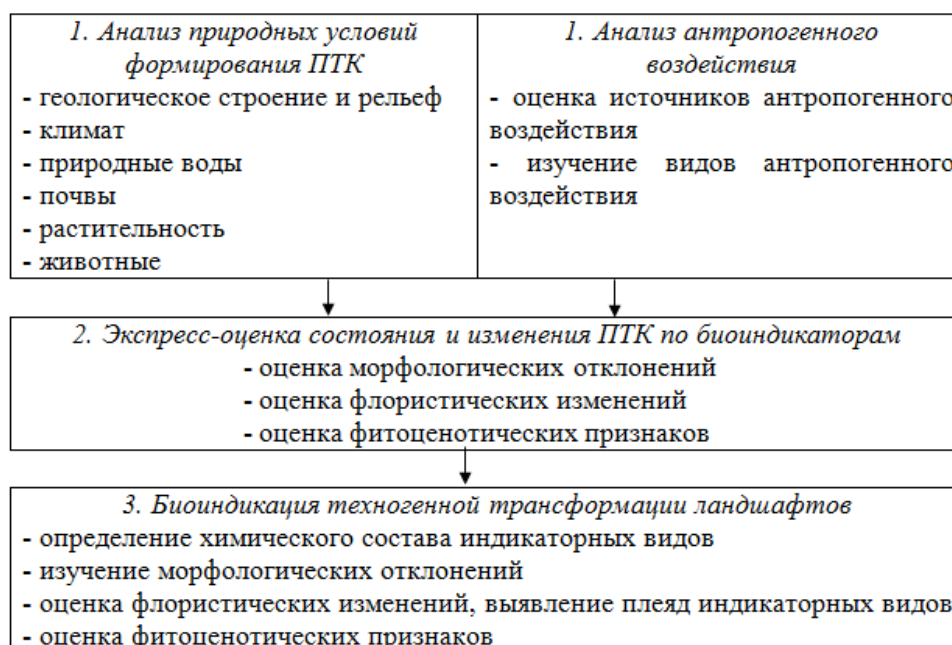


Рис. 8. Общая схема проведения биоиндикации при ландшафтно-экологических исследованиях

Тесная взаимосвязь абиотических и биотических компонентов служит основой выделения среди них наиболее информативных характеристик и использования их в качестве био- или геоиндикаторов экологического состояния ПТК. В основу специализированного ландшафтно-экологического анализа положено комплексное изучение наиболее информативных абиотических (геоиндикаторов) и биотических (биоиндикаторов) параметров, отражающих фоновое состояние ПТК и их трансформацию под влиянием антропогенной нагрузки. Возможности применения биогеоиндикаторов не исчерпываются традиционным изучением экологического состояния территорий. Они могут быть использованы при анализе антропогенной динамики ПТК и прогнозе экологических последствий нарушений. Детальная информация о состоянии геосистем

позволяет подойти к решению ряда актуальных вопросов рационального природопользования: оценке ресурсного потенциала, устойчивости ландшафтов, рейтингу источников загрязнения и т.д. Обобщенная схема проведения биоиндикации при ландшафтно-экологических исследованиях представлена на рис. 8.

Экспертное оценивание проведено для ПТК различного таксономического уровня, поэтому система признаков в соответствии с рангом оцениваемого выдела и конкретными задачами меняется. Определение комплекса био- и геоиндикаторных признаков, ландшафтно-экологический анализ, прогноз возможных нарушений, оценка устойчивости ПТК и др. носят, отчасти, субъективный характер. Объективность результатов достигается при проведении экспертной геоэкологической оценки, предусматривающей детальную разработку комплекса абиотических и биотических параметров – индикаторов анализируемых процессов и явлений, а также работой нескольких специалистов с установлением уровня согласованности результатов.

Практическая реализация предлагаемого подхода осуществлена на нескольких объектах Северо-Запада РФ, Западной Сибири, Арктической зоны России (АЗР) и др. Разработанный комплекс индикаторных признаков применен при проведении фоновых исследований и экологическом мониторинге на нефтегазовых месторождениях севера Западной Сибири. В перечень основных задач фоновых ландшафтно-экологических исследований вошли: 1. Комплексное изучение природно-ресурсного потенциала и социально-экономического состояния территории месторождений. 2. Оценка современного уровня загрязненности природных компонентов. 3. Выявление зон особой чувствительности к техногенному воздействию. Мониторинговые исследования в труднодоступных районах Севера и Сибири, где отсутствует постоянно действующая сеть государственного экологического мониторинга, для получения репрезентативных данных реализованы на основе: 1. Контроля содержания загрязняющих веществ в снеге, поверхностных водах, донных осадках, почвах и растениях (*Cladonia alpestris*, *Ledum decumbens* и корка лиственницы *Larix sibirica*). 2. Оценки нарушенности почвенного и растительного покровов, изменения видового состава и вульгаризации флоры. 3. Определения динамики нарушенности земель, активизации экзогенных геологических процессов, разрушения берегов. Для этого проведено сравнение концентраций поллютантов в природных средах с содержаниями, полученными при оценке фонового состояния территории месторождения, выполненной до его ввода в эксплуатацию.

Важным направлением ландшафтно-экологических исследований является оценка устойчивости ПТК к антропогенным нарушениям. Разработанная система биогеоиндикаторных признаков устойчивости включает абиотические и биотические компоненты, а также показатели ассимиляционной емкости природной среды. Геоиндикаторами устойчивости абиотических компонентов к химическому загрязнению являются горно-геологические условия, рельеф, ветровой и нивальный режимы, динамика поверхностных вод, развитость почв и почвенного покрова. В качестве биоиндикаторов устойчивости выделены биопродуктивность, структура растительного покрова, видовое разнообразие. Ассимиляционная емкость ПТК определяется геолого-геохимическими условиями, механическим составом рыхлых отложений, площадью водной поверхности и густотой речной сети, заболоченностью территории. К биогеоиндикаторам устойчивости абиотических компонентов к ландшафтно-деструктивному воздействию добавляются развитие склоновых и активность криогенных процессов, пастбищность, экобиоморфный состав, проективное покрытие растительного покрова. При биогеоиндикации факторов устойчивости параметрических

нарушений первостепенное значение имеют показатели, оценивающие проявленность и интенсивность конкретного вида физического воздействия.

Экспертная оценка выполнена на основе системного анализа состояния компонентов ландшафта и источников антропогенного воздействия. В качестве инструмента использован метод расстановки приоритетов, реализованный в программе «Признак». Использование программы позволяет формализовать решение задач методом аналогий и свести их к интерполяционным алгоритмам, а также выполнить расчеты интегральных показателей с задаваемой структуризацией дерева признаков. Экспертный и рейтинговый анализы заключаются в установлении оценок значимости и выраженности самих признаков. По результатам экспертной оценки факторов устойчивости абиотических и биотических компонентов ПТК и ассимиляционной емкости среды составлена карта уязвимости и техногенной нарушенности эколого-ресурсных провинций АЗР. Дана характеристика современного состояния ПТК, степени их техногенной трансформации и прогноз возможных последствий.

На основе экспертного анализа выполнена оценка устойчивости ПТК о. Врангеля к антропогенным воздействиям. С применением разработанного комплекса методов установлены основные факторы, определяющие функционирование ландшафтов, дан прогноз возможных изменений и выделены ПТК разной степени устойчивости к химическому и ландшафтно-деструктивному воздействиям. Представлены рекомендации по проведению экологического мониторинга в конкретных типах урочищ острова в связи с повышенным риском их антропогенных трансформаций.

На основе детальной физико-географической характеристики, почвенных и фитоиндикационных исследований, оценки основных источников загрязнения и закономерностей накопления поллютантов в почвах и растениях проведена экспертная оценка ресурсного потенциала и экологического риска нарушения и загрязнения ПТК Костомукшского государственного заповедника. Она реализована по дереву признаков, включающему 5 блоков: биологическую продуктивность, средообразующие свойства, устойчивость к внешним воздействиям, рекреационную ценность и научную значимость. В результате экспертного анализа выделены группы геокомплексов, характеризующиеся сходным ресурсным потенциалом и степенью антропогенной нарушенности, что дает возможность оптимизировать организацию НИР и мониторинг природной среды на территории, прилегающей к КГОКу. Разработана система параметров для определения экологического риска нарушения и загрязнения ПТК при организации в заповеднике экскурсионной зоны. Выделены 4 группы ПТК по степени экологического риска и даны рекомендации по сокращению возможного ущерба при возрастании антропогенной нагрузки на ПТК.

Рассматриваемый подход реализован при проведении комплексных ландшафтно-экологических исследований в районе спортивно-рекреационной зоны п. Суаранда (Ленинградская обл.), расположенной в 10 км к северо-востоку от Санкт-Петербурга в пределах камово-моренного ландшафта Колтушской возвышенности. В основу экспертного анализа положена оценка уязвимости и ущерба отрицательных последствий техногенеза (16 сценариев) и рейтинг источников загрязнения (11 сценариев). Антропогенное воздействие оценено по следующим источникам загрязнения: Санкт-Петербург, спортивный транспорт, рекреация, агропроизводство, животноводство, добыча песка, коммунальное хозяйство. В результате эколого-географического картографирования территории спортивно-оздоровительной зоны выделено 85 фаций, относящихся к 20 урочищам и 6 типам урочищ. Сделаны выводы об экологическом состоянии объекта, даны рекомендации по оптимальному использованию каждого из

урочищ, установлены допустимые нагрузки в соответствии с режимом функционирования и устойчивостью ПТК. Изученная территория уязвима при ее загрязнении вследствие интенсивной миграции поллютантов в легких по механическому составу отложениях камовых холмов. Интенсивное просачивание поллютантов приведет к их быстрому распространению и выносу на сельскохозяйственные угодья, что определяет необходимость контроля использования, постоянного ухода и рекультивации нарушенных земель.

При исследовании экологической обстановки в районе портового строительства в Усть-Луге разработан интегральный подход, объединяющий анализ фактической техногенной нагрузки и ресурсного потенциала ПТК. Анализ состояния растительного покрова и основных биоиндикаторных признаков на территории, прилегающей к Лужской губе, в сочетании с оценкой техногенной нагрузки и ресурсного потенциала позволил сделать вывод о начальной стадии загрязнения ландшафтов. На основе сопоставления материалов об экологических условиях района, проектных данных и сведений о характере влияния существующих объектов на ПТК даны рекомендации по оптимальному размещению портовых сооружений, рекреационных, буферных и природоохранных зон.

Таким образом, разработанный подход к оценке экологического состояния ПТК оказался эффективным при работе в различных ландшафтно-географических условиях Арктики, Сибири, северной и южной тайги Северо-Запада России с различной степенью модификации и нарушенности геосистем. Это позволяет рекомендовать комплекс методов с применением методов биоиндикации для широкого внедрения в практику экспертно-оценочных работ.

## ВЫВОДЫ

1. Химический состав растений зависит от комплекса ландшафтно-геохимических факторов (химизм горных пород, рельеф, климат, метеоусловия, физико-химические свойства почв и др.). Основным является породный фактор, определяющий накопление большинства химических элементов. Вторым по значимости в зонах естественных геохимических аномалий выступает рудный фактор, представленный набором типоморфных элементов. В фоновых условиях растения, произрастающие в подчиненных фациях, отличаются более высоким содержанием большинства ТМ, чем виды автономных местообитаний. В пределах естественных геохимических аномалий концентрация ТМ увеличивается при переходе от элювиальных к подчиненным фациям и при близком залегании горных пород. В естественных *тундровых* ландшафтах аккумуляция элементов определяется изменением подвижности металлов при смене песчаных почв торфяниками с накоплением Pb, Zn и Mn и выносом Cu, Zr и Ti, а также образованием труднорастворимых металлорганических комплексов в органогенных горизонтах почв элювиальных фаций. В *таежных* ПТК максимальная концентрация ТМ наблюдается при небольшом количестве осадков. Существенное влияние на накопление химических элементов в растениях оказывает экранирующее действие древесного яруса. В *лесостепных* и *степных* ландшафтах концентрация металлов в растениях во влажные годы в 2-3 раза выше, чем в сухие. Это требует при проведении фитоиндикационных исследований ежегодного определения фоновых характеристик.

2. Установлены наиболее информативные виды-индикаторы техногенеза: в тундровой зоне Западной Сибири – багульник *Ledum decumbens*, лишайник *Cladonia*



*alpestris*; в лесотундре к ним добавляется (регионально) сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* или лиственница *Larix sibirica*; в тайге – сосна обыкновенная или лиственница (регионально), зеленые мхи *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi*, в условиях техногенных аномалий, где отсутствуют зеленые мхи – брусника *Vaccinium vitis-idaea* и черника *Vaccinium myrtillus*; в лесостепных и степных ПТК Башкирского Зауралья индикаторами служат виды разнотравья, содержание Cu, Zn, Pb и Fe в которых при техногенном воздействии в 1,5-2 раза выше регионального фона. В лесостепных ПТК наиболее показательны мордовник *Echinops ritro*, чабрец *Thymus marschallianus*, караганник *Caragana arborescens*, зопник *Phlomis tuberosa* и подмаренник *Galium verum*; в степных ПТК – полынь австрийская *Artemisia austriaca*, вероника *Veronica incana*, чабрец *Thymus marschallianus*, шалфей *Salvia stepposa* и подмаренник *Galium verum*. Высокая толерантность коренных популяций злаков к загрязнению обуславливает повышенную устойчивость ПТК в целом к загрязнению ТМ.

3. Влияние нефтегазодобычи на ПТК севера Западной Сибири отражается в загрязнении почв и накоплении в поверхностном горизонте Cu, Ni, Pb и Ba. В индикаторных видах растений это индицируется их высокими концентрациями, нарушением природной структуры связей химических элементов, увеличением дисперсии содержания металлов и формированием парагенезисов V-Ba, Ni-Pb-Mn и Mn-Ba-Cu-Pb. Появляется нехарактерный для природных условий антагонизм Cu и Zn. В связи с вторичным заболачиванием техногенных площадок увеличивается вес хелатогенеза по сравнению с фоновыми участками.

4. При воздействии горнорудной промышленности наблюдается увеличение содержания в почвах и растениях ТМ, типоморфных выбросам предприятий: в тундровых и северо-таежных ПТК в районе комбината «Североникель» - Cu, Ni и Co, в северо-таежных ПТК в районе Костомукшского ГОКа – Fe и Mn, в лесостепных и степных ПТК в районе БМСК и Учалинского ГОКа – Zn, Cu, Fe, Pb и Cd. В пригородах Санкт-Петербурга и городских условиях элементы-индикаторы – Pb, Zn, Cu, Fe и Cd – отражают особенности взаимодействия компонентов в системе «атмосферный воздух – растение».

5. К числу наиболее показательных морфологических признаков изменения ПТК в ряду нарастания антропогенной нагрузки относятся хлороз, некроз, тератогенез и возраст хвои сосны. В целом морфологические изменения носят неспецифический характер и возникают под влиянием комплекса факторов, обусловленных как естественными (водный и минеральный режимы, орографические условия, освещенность и др.), так и антропогенными (химическое загрязнение, действие кислотных дождей и т.д.) причинами. Они могут быть использованы для диагностики техногенной трансформации ПТК только в комплексе с другими показателями – химическим составом растений и содержанием поллютантов в компонентах ландшафта. Появление морфологических отклонений, изменение видового состава и структуры растительности служат критерием для диагностики интенсивности техногенной трансформации ПТК.

6. Индикаторами техногенной трансформации ландшафтов являются группы тесно связанных видов – плеяды. Нелинейным методом дендритов установлены структурные географические и экологические ядра, определяющие видовой состав растительности и направленность сукцессий при нарастании антропогенеза. Апохорные виды, входящие в состав плеяд, позволяют прогнозировать характер изменения фитоценозов при увеличении воздействия. Кроме того, дендриты корреляционных

связей видов лежат в основе оценки устойчивости ПТК с использованием структурных связей растительности.

7. Установлен комплекс биоиндикационных признаков, включающий параметры растений (накопление типоморфных поллютантов, появление тератов, хлороза и др.) и растительных сообществ (смена доминантов и эдификаторов, изменение вертикальной и горизонтальной структур, видового разнообразия и др.), адекватно отвечающие техногенной трансформации ландшафтов. Основой биоиндикационных исследований ПТК при техногенезе является оценка химического состава растительности. Для диагностики техногенной трансформации ландшафтов надежнее использовать изменения концентрации в растениях Zn, Cu, Pb, Fe, Mn, Ni, Co, Cr и Cd, в районах нефтегазодобычи к ним добавляются Ba и V. Наибольшей индикаторной значимостью отличается корка древесных пород, обладающая безбарьерным типом аккумуляции и характеризующаяся прямой корреляцией между уровнем загрязнения и содержанием ТМ.

8. При диагностике техногенной трансформации ландшафтов на основе фитоиндикации учитывается комплексное влияние природных зональных, а зональных и антропогенных факторов в ряду нарастания антропогенного воздействия. На первом этапе проводится экспресс-фитоиндикация по флористическим и фитоценотическим признакам. Осуществляется выбор индикаторных видов и комплекс базовых показательных характеристик (хлороз / некроз / покрытие эпифитных лишайников / возраст хвои / видовой состав / запасы биомассы и т.д.). Для специфической индикации техногенеза устанавливаются региональные фоновые значения, изучается изменение химического состава индикаторных видов растений, выделяются индикаторные ассоциации элементов.

9. Эффективность применения фитоиндикаторов повышается при комплексном изучении ландшафта, выявлении геоиндикаторов техногенеза и сопряженном анализе трансформации всех составляющих ПТК. Особое внимание должно уделяться системам «почва–растение» и «атмосферный воздух–растение», причем значимость последней увеличивается с ростом техногенеза.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в ведущих периодических изданиях

1. *Опекунова М.Г.* Латеральная миграция тяжелых металлов в ландшафтах восточного склона Южного Урала. Вестник ЛГУ, сер.7, 1989, вып.2 ( №14). с. 65-74
2. *Дмитриев В.В., Васильев В.Ю., Горбовская А.Д., Мандрыка О.Н., Огурцов А.Н., Опекунова М.Г. Потапова Т.М.* Диагностика состояния водоемов, наземной растительности и почвенного покрова геосистем Карельского Приладожья. 1. Диагностика состояния водных объектов. Известия РГО. 1996. Т.128. Вып.1. С.33-43.
3. *Дмитриев В.В., Васильев В.Ю., Горбовская А.Д., Мандрыка О.Н., Огурцов А.Н., Опекунова М.Г. Потапова Т.М.* Диагностика состояния водоемов, наземной растительности и почвенного покрова геосистем Карельского Приладожья. II. Диагностика состояния почвенного и растительного покрова, устойчивость геосистем к антропогенному воздействию. Известия РГО. 1996. Т.128. Вып. 2. С. 49-54.
4. *Опекунова М.Г., Арестова И.Ю., Щербаков В.М., Ганул А.Г.* Загрязнение нефтепродуктами почв Тюменского севера / Вестник СПбГУ, сер. 7. Геология, география. 1996, вып. 3. С. 87-90.

5. *Опекунова М.Г., Арестова И.Ю., Щербаков В.М., Кучеров А.В., Ганул А.Г.* Тяжелые металлы в почвах Уренгойского Севера. // Вестник С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. 1997. Вып. 1(№ 7). С.67-76.
6. *Опекунова М.Г. Арестова И.Ю., Щербаков В.М., Мещеряков В.Г., Ганул А.Г., Кучеров А.В.* Тяжелые металлы в растениях Уренгойского Севера. // Вестник С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. 1998. Вып. 3 ( № 21). С. 53-65.
7. *Опекунова М.Г., Шебеста А.А., Щербаков В.М., Арестова И.Ю., Ганул А.Г.* Новые данные по загрязнению нефтепродуктами почв Уренгойского Севера. // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. 1998. Вып. 1 (№ 7). С. 103-107.
8. *Опекунова М.Г., Садиков М.А., Деменок Е.А., Кучеров А.В.* Микроэлементы в растениях Норильского плато // Вест. С.-Петербург.ун-та. Сер. 7: Геология, география. 2000. Вып. 3. С. 63-82.
9. *Опекунова М.Г., Алексеева-Попова Н.В., Арестова И.Ю., Грибалева С.В., Краснов Д.А., Бобров Д.Г., Осипенко О.А., Соловьева Н.И.* Тяжелые металлы в почвах и растениях Южного Урала. I. Экологическое состояние фоновых территорий // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2001. Вып. 4 (№ 31). С. 45-53.
10. *Опекунова М.Г., Щербаков В.М., Сенькин О.В., Грибалева С.В., Краснов Д.А.* Опыт проведения экспертного анализа экологического состояния геосистем // Вест.С.-Петербург.ун-та. Сер. 7: Геология, география. 2001. Вып. 1. С. 71-87.
11. *Опекунова М.Г., Алексеева-Попова Н.В., Арестова И.Ю., Грибалева С.В., Краснов Д.А., Бобров Д.Г., Осипенко О.А., Соловьева Н.И.* Тяжелые металлы в почвах и растениях Южного Урала. Ч.II. Экологическое состояние антропогенно нарушенных территорий // Вестн.С.-Петерб.ун-та. Сер. 7. 2002. Вып. 1(№ 7). С. 63-71.
12. *Мовчан В.Н., Опекунова М.Г.* Биогеохимические аспекты геоэкологических исследований // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2002. Вып. 3 (№ 23) С. 93-103.
13. *Опекунова М.Г., Муратова Э.Э.* Применение метода корреляционных плеяд для оценки трансформации природных комплексов в зоне воздействия Башкирского медно-серного комбината. Вест. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. 2005. Вып. 3. С. 51-66.
14. *Опекунова М. Г., Елсукова Е. Ю., Чекушин В. А., Томилина О. В., Салминен Р., Рейманн К.* Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината «Североникель». I. Миграция и аккумуляция химических элементов в почвогрунтах г. Мончегорска // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7: Геология, география. 2006. Вып. 2. С. 96-103.
15. *Опекунова М. Г., Елсукова Е. Ю., Чекушин В. А., Томилина О. В., Салминен Р., Рейманн К.* Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината «Североникель». II. Миграция и аккумуляция химических элементов в почвах // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7: Геология, география. 2006. Вып. 3. С. 39-49.
16. *Опекунова М. Г., Елсукова Е. Ю., Чекушин В. А., Томилина О. В., Салминен Р., Рейманн К., Анцибор Ю.Б.* Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината ”Североникель” с помощью методов биоиндикации // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2007. Вып. 1. С. 71-79.
17. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С. Ю., Арестова И. Ю.* Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы нефтегазоконденсатных месторождений Ямало-Ненецкого Автономного Округа. Вестник СПбГУ. Сер. 7, 2007, вып. 1. С. 124-127.
18. *Опекунова М. Г., Захарян Л.С., Вокуева О. В., Константинова А.Ф.* Экологический мониторинг загрязнения территории Васильевского острова г. Санкт-Петербурга

с использованием тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.). Известия РГО, 2011, Т.143, вып. 2. С. 31-44.

19. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С. Ю., Ганул А. Г.* Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в ЯНАО // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7: Геология, география. 2012. Вып. 4. С. 86-100.

### Монографии

20. Недрa России. Т.2. Экология геологической среды // Под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смыслова. СПб-М.: изд-во СПбГГИ, 2002. 645 с.

21. Остров Врангеля: геологическое строение, минерагения, геоэкология. Коллектив авторов /Под ред. *М.К. Косько, В.И. Ушакова* //Тр. НИИГА-ВНИИОкеангеология, т. 200. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2003. 137 с.

### Основные статьи в журналах и сборниках

22. *Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Щербаков В.М.* Экологическая уязвимость природных комплексов Арктической зоны России // Российская Арктика./ Главные редакторы Д.А. Додин, В.С. Сурков. СПб, 2002. С.841-857.

23. *Опекунова М.Г.* Фитоиндикация современного состояния экосистем Северо-Западного Приладожья // Длительные изменения и современное состояние ландшафтов Приладожья. Отв. ред. Г.А. Исаченко. СПб., 1995. С. 49-58.

24. *Опекунова М.Г., Мовчан В.Н.* Экогеохимические проблемы рационального природопользования в районах исторически сложившихся природно-техногенных аномалий Южного Урала /Сборник статей: География и окружающая среда – СПб, Наука, 2003, с. 94-111.

25. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Арестова И.Ю., Кукушкин С.Ю.* Особенности проведения фоновой оценки и экологического мониторинга нефтегазопромысловых работ в Арктике / Сергеевские чтения. Инженерно-экологические изыскания в строительстве: теоретические основы, методика, методы и практика. Выпуск 8. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23 марта 2006 г.) М.: ГЕОС, 2006. С. 49-57.

26. *Опекунова М. Г.* Применение метода корреляционных плейд для оценки антропогенной динамики растительности / Сборник трудов Всероссийской научной конференции с международным участием «Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы». Т. 2. СПб, 2011. С. 428-432.

27. *Опекунова М. Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С. Ю.* Антропогенная динамика тундровых экосистем Западной Сибири под влиянием нефтегазодобычи // Человек и Север: антропология, археология, экология. Материалы всеросс. конф. г. Тюмень, 26-30 марта 2012 г. Тюмень: изд-во ИПОС СО РАН, 2012. Вып. 2. С. 403-406.

28. *Опекунова М. Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С. Ю.* Анализ изменения ландшафтов севера Западной Сибири под влиянием нефтегазодобычи // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М.А. Глазовской). Доклады Всеросс. научн. конф. Москва, 4-6 апреля 2012 г.М.: Географический ф-т МГУ, 2012. С. 242-244.

29. *Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю.* Трансформация почв севера Западной Сибири под влиянием нефтегазодобычи // Материалы докладов VI съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Кн. 2. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 2012. 121-123.

30. *Опекунова М. Г., Захарян Л.С.* Тяжелые металлы в системе почва-растение как показатель загрязнения окружающей среды в Санкт-Петербурге // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. № 1, 2012 (январь-март). С.40-46.