



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

М. Г. Опекунова

# БИОИНДИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

БИОИНДИКАТОР АЗОТ  
АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ  
ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ  
НЕФТЬ ФИТОИНДИКАЦИЯ  
СИНТЕТИЧЕСКИЕ  
ПОВЕРХНОСТНО  
БИОМАРКЕРЫ АКТИВНЫЕ  
ВЕЩЕСТВА  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ  
ЛИТОИНДИКАТОРЫ  
КАЛЬЦИЙ  
ФЕНОЛЫ  
КАЛИЙ  
ФОСФОР  
ЭВТРОФИРОВАНИЕ ДОЕМОВ  
ОБЪЕКТ СОСТАВ ПОЧВ  
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМ  
ИНДИКАЦИИ  
СВЕТОВЫЕ УСЛОВИЯ  
ВОЗДЕЙСТВИЕ ЖАРОВ  
ПЕСТИЦИДЫ  
ПАСТБИЩНАЯ ТРЕССИЯ  
БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД  
РАДИАЦИОННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ЭКОЛОГИЯ  
И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ST. PETERSBURG STATE UNIVERSITY

M. G. Opekunova

**BIOINDICATION OF  
POLLUTION**

This work was supported by grant from  
Norwegian Ministry of Foreign Affairs  
(project CPRU-2011/10074 Nor-Russ Environment)



ST. PETERSBURG UNIVERSITY PRESS

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

М. Г. Опекунова

# БИОИНДИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*2-е издание*



ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ББК 28.080.1  
О-60

Рецензенты: канд. биол. наук *И. В. Дроздова* (Ботанический ин-т им. В. Л. Комарова РАН);  
д-р биол. наук, проф. *Е. А. Курашов* (С.-Петербург. гос. ун-т)

*Печатается по решению  
Учебно-методической комиссии Института наук о Земле  
Санкт-Петербургского государственного университета*

Опекунова М. Г.

**О-60 Биоиндикация загрязнений:** учеб. пособие. — СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2016. — 300 с.

ISBN 978-5-288-05674-1

В учебном пособии изложены современные подходы к использованию биоиндикационного метода при оценке экологического состояния окружающей среды. Рассмотрены общие теоретические положения биоиндикации и взаимосвязь изменения параметров развития организмов и их сообществ с экологическими факторами. Представлены возможности и особенности биоиндикации ландшафтно-деструкционных и параметрических нарушений. Большое внимание уделено вопросам биоиндикации эмиссионных воздействий, рассмотрены биоиндикационные признаки загрязнения атмосферного воздуха, эвтрофикации водоемов, засоления почв, загрязнения окружающей среды биогенными элементами, тяжелыми металлами, нефтепродуктами, хлорорганическими соединениями и другими веществами.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся на дневном, вечернем и заочном отделениях по специальностям «География», «Геоэкология», «Природопользование» и направлению «Экология и природопользование».

Библиогр. 102. Табл. 74. Ил. 49 ч/б; 11 цв.

**ББК 28.080.1**

The first edition of the textbook was published in 2004. The second edition includes corrections and additions based on the studies conducted recently in the field of bioindication of pollution. The textbook outlines current approaches to the application of bioindication method for examining of the state of environment. There general theoretical principles of bioindication and the correlation between the parameters of modified organisms and their communities and environmental factors have been considered. Possibilities and features of bioindication of landscape-destructive and parametric disturbances have also been presented. Much attention has been paid to problems of bioindication emissive impacts. Bioindicative signs of air pollution, eutrophication, salinization, pollution by nutrients, heavy metals, oil products, organochlorine compounds and other pollutants have been studied as well.

The textbook is intended for students of natural faculties of universities, majoring in "Geography", "Geocology", "Nature management" and for those who specialised in "Ecology and nature management" working for BS or MS.

Издание осуществлено при финансовой поддержке гранта 18.20.1411.2012  
Nor-Russ Environment (Норвегия)

ISBN 978-5-288-05674-1

© Санкт-Петербургский  
государственный  
университет, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений.....	7
Введение.....	8
Глава 1. Краткий исторический очерк развития биоиндикации.....	12
Глава 2. Биоиндикатор и объект индикации.....	21
2.1. Теоретические основы биоиндикации.....	—
2.2. Понятие «биоиндикатор».....	29
2.3. Чувствительность и достоверность биоиндикаторов.....	52
2.4. Математические методы в биоиндикационных исследованиях.....	54
2.5. Основные принципы применения биоиндикации.....	63
2.6. Методы биоиндикационных исследований.....	65
2.6.1. Биогеохимический подход в биоиндикационных исследованиях.....	66
2.6.2. Методы биомаркеров.....	71
2.6.3. Методы фитоиндикации экологического состояния природной среды.....	77
2.6.4. Методы биотестирования.....	91
2.7. Общие требования к проведению фитоиндикационных исследований.....	100
Глава 3. Виды антропогенных воздействий.....	102
Глава 4. Биоиндикация ландшафтно-деструктивных и параметрических изменений.....	105
4.1. Изменение водного режима территории.....	—
4.2. Воздействие пожаров.....	112
4.3. Изменение световых условий.....	116
4.4. Изменение температурного режима.....	130
4.5. Рекреационная и пастбищная дигрессии.....	135
4.6. Радиационное загрязнение.....	144
Глава 5. Биоиндикация эмиссионных антропогенных воздействий.....	167
5.1. Загрязнение атмосферного воздуха.....	—
5.2. Биоиндикация состояния почвенного покрова.....	185
5.2.1. Изменение кислотности почв.....	187
5.2.2. Механический состав почв. Литоиндикаторы.....	—
5.2.3. Почвенное плодородие.....	193
5.2.4. Засоленность почв.....	195
5.2.5. Биоиндикация типов почв.....	198
5.3. Биоиндикация загрязнения биогенными элементами.....	198
5.3.1. Азот.....	200
5.3.2. Фосфор.....	207
5.3.3. Калий.....	212
5.3.4. Кальций.....	214
5.3.5. Биоиндикация эвтрофирования водоемов.....	218
5.4. Биоиндикация загрязнения тяжелыми металлами.....	227
5.5. Биоиндикация загрязнения нефтью и нефтепродуктами.....	249
5.6. Биоиндикация загрязнения полициклическими ароматическими углеводородами.....	259

5.7. Биоиндикация загрязнения фенолами .....	266
5.8. Биоиндикация загрязнения хлорорганическими соединениями .....	270
5.8.1. Загрязнение пестицидами .....	—
5.8.2. Загрязнение полихлорированными бифенилами .....	278
5.8.3. Загрязнение полихлорированными дибензодиоксинами и полихлорированными дибензофуранами .....	280
5.9. Биоиндикация загрязнения синтетическими поверхностно-активными веществами .....	283
Заключение .....	287
Рекомендуемая литература .....	289
M. G. Opekunova. Bioindication of Pollution. Summary .....	293
Introduction .....	—
Conclusion .....	296
Contents .....	298

## ВВЕДЕНИЕ

Охрана окружающей среды и контроль над уровнем ее загрязнения требуют привлечения эффективных и недорогостоящих методов изучения природных комплексов. В настоящее время разработаны различные подходы к оценке экологического состояния окружающей среды, среди которых одним из перспективных направлений является биоиндикация загрязнений, основанная на изучении различных биологических, физиологических, анатомических и других отклонений в развитии организмов, а также их сообществ, возникающих под действием внешних факторов. Она включает в себя ряд относительно простых, дешевых и информативных методов оценки экологического состояния окружающей среды, базирующихся на изучении реакций организмов, возникающих в ответ на антропогенное воздействие. Биоиндикация загрязнений является составной частью общей биоиндикации — отрасли биологической науки, которая изучает признаки биоты, характеризующие компоненты природной среды и их особенности. Она возникла как метод познания природы, направленный на изучение взаимосвязей между ее живыми и неживыми компонентами. Само название «биоиндикация» происходит от латинского глагола *indicare* — «указывать», что подчеркивает ее прикладной характер. Исторически в биоиндикации наметился антропоцентрический подход. Однако сохранение оптимальных условий для жизнедеятельности человека возможно только при обеспечении естественного режима существования всей биоты и биосферы в целом. В связи с этим возрастает роль биоиндикационных исследований при решении вопросов охраны природы и рационального природопользования на экосистемном уровне.

В процессе онтогенеза у живых организмов выработались определенные требования к характеру местообитания: водному и световому обеспечению, минеральному питанию, температурному режиму и т. д. Изменения, происходящие в окружающей среде под влиянием человека, воздействуют на живые организмы, вызывая различные отклонения в их развитии. Сбросы и выбросы в окружающую среду различных химических соединений, изменение светового, водного и температурного режимов территорий, шумовое, радиационное загрязнение и другие виды воздействий накладываются друг на друга, приводя к суммарному эффекту, интенсивность которого можно оценить только по реакциям самих живых существ. Биоиндикаторы дают точную интегральную характеристику качества среды обитания и ее пригодности или непригодности (токсичности) для живого. При этом удается установить долгосрочные тенденции изменений биологических систем в отношении разнообразных и, что самое важное, большей частью одновременно действующих факторов, а также определить буферную способность этих систем в отношении указанных факторов. Необходимо отметить, что специфических реакций на антропогенное воздействие у живых организмов не существует. Приспособление к загрязнению окружающей

среды, возникающее в результате производственной и других видов деятельности человека, происходит в соответствии с выработанной стратегией адаптации к изменению (иногда катастрофическому) естественных экологических факторов. Поэтому биоиндикация загрязнений теснейшим образом связана с изучением экологических особенностей видов в природных условиях.

Считается, что для получения адекватной оценки экологического состояния окружающей среды необходимо проведение комплексных исследований на разных уровнях организации биосистем — субклеточном, клеточном, организменном, популяционном и биоценотическом. При этом особое внимание должно уделяться изучению влияния антропогенных воздействий на жизнедеятельность биосистем разных таксономических рангов, включая и человека. При диагностике качества окружающей среды используются параметры развития микроорганизмов, растений, почвенной мезофауны, птиц, представителей ихтиофауны, различных млекопитающих, в том числе человека (Алексеев, 1987; Алексеева-Попова, 1998; Ковальский, 1974; Ковда, 1976; Кривоуццкий и др., 1988; Критерии. . . 1992; Кулагин, 1974, 1985; Мовчан, 2004; Малхазова, 2001; Николаевский, 1979; Оборин и др., 1988; Черненкова, 2002; Ярмишко, 1997). Широко используются такие показатели, как заболеваемость различных возрастных групп, врожденные пороки развития, смертность и т. п.

В комплекс биоиндикационных методов экологической оценки состояния окружающей среды входят как геохимические, биогеохимические, так и биологические методы. Признание единства жизни и геохимической среды является важной предпосылкой понимания всех процессов и явлений, происходящих в системе «организмы — среда». При этом существенны исследования особенностей миграции и аккумуляции поллютантов в цепи горные породы — природные воды — почвы — растения — животные — человек, являющейся интегральным индикатором многолетних процессов загрязнения окружающей среды и чуткой составляющей экосистемы, реагирующей на изменение качества жизнеобеспечивающих сред.

В основе эколого-биогеохимической оценки состояния окружающей среды лежат анализ химического состава живых организмов и определение интенсивности аккумуляции поллютантов. Это позволяет осуществить специфическую индикацию антропогенных воздействий и проследить трансформацию загрязняющих веществ в окружающей среде. Химический состав биоты изменяется в соответствии с уровнем загрязнения среды и отражает состояние и свойства всех абиотических компонентов ландшафта — подстилающих горных пород, почв, грунтовых и поверхностных вод, атмосферного воздуха, — а также климатические особенности территории. Сравнение содержаний поллютантов в живых организмах фоновых и антропогенно нарушенных местообитаний дает качественную и количественную оценку характера загрязнения.

Однако следует учитывать, что концентрация химических элементов в живом веществе зависит от множества внутренних факторов, среди которых главную роль играют систематическое положение вида и его биологические особенности. Накопление поллютантов в тканях живых существ происходит избирательно и не всегда адекватно отвечает интенсивности загрязнения окружающей среды. Поэтому важную роль в эффективности методов играет подбор видов-индикаторов. Кроме того, проведение подобных исследований является относительно трудоемким, длительным и требует хорошо оснащенной аналитической базы.

При решении ряда прикладных задач природопользования часто применяются экспресс-методы экологической оценки состояния среды. К ним относятся прежде



всего морфологический, флористический и фитоценотический методы. Преимущество этих методов обусловлено относительной простотой натуральных исследований и сбора информации, возможностью определения суммарного воздействия всего комплекса факторов в конкретных условиях.

Биоиндикация позволяет оценить комплексное антропогенное воздействие как на природные объекты, так и на территории урбо- и агроландшафтов. Наряду с интенсивностью воздействия выявляются экологические последствия нарушений на разных уровнях организации биосистем. При этом можно использовать два подхода к оценке реакций организмов на воздействие окружающей среды. Первый предусматривает изучение реакций видов и их сообществ, распространенных на исследуемой территории, второй — изучение реакций тест-объектов, искусственно размещенных (интродуцированных) на данной территории или в испытываемой среде.

Большое внимание при проведении биоиндикации уделяется пространственно-временной изменчивости поведения загрязняющих веществ в различных географических районах. Согласно системе биогеохимического районирования, объединяющей понятия геохимических и биогеохимических провинций, геохимических ландшафтов и медицинской географии, миграция химических элементов в природе определяется как зональными, так и азональными факторами. Для каждой географической зоны свойствен определен тип потока вещества, корректируемый особенностями горных пород и рельефа. В регионах биосферы, имеющих географические признаки почвенно-климатических зон и их сочетаний, миграция вещества подчиняется прежде всего общезональным закономерностям. Внутри каждого региона, согласно В. В. Ковальскому (1979), по принципу географической непрерывности выделяются субрегионы и биогеохимические провинции биосферы, различающиеся концентрациями и соотношениями химических элементов, а также азональными типами миграции вещества в пределах рудных и техногенных аномалий, бессточных котловин и других проявлений азональной дифференциации ландшафтной оболочки. Антропогенное воздействие, имеющее свои специфические черты в каждой биогеохимической провинции, в каждом природном комплексе, изменяет качественные и количественные параметры круговорота веществ. Сравнительный анализ биоиндикационных признаков позволяет оценить комплексное состояние природной среды в той или иной биогеохимической провинции, а также потоки миграции при наложении техногенеза на природные особенности местообитаний.

Сила реакции живых организмов на стресс во многом зависит от интенсивности воздействия загрязнения. Для определения вероятности неблагоприятных последствий при антропогенном влиянии необходимо изучение экосистем с различной техногенной нагрузкой, представляющих собой единый ряд с нарастанием экологического стресса: ненарушенные (фоновые) природные экосистемы → ненарушенные природные экосистемы в районах геохимических аномалий → слаборазрушенные природные экосистемы под влиянием локальных источников загрязнения → антропогенно нарушенные экосистемы в районах техногенных аномалий → урбоэкосистемы в крупных городских агломерациях.

Рациональное природопользование и решение вопросов обеспечения экологической безопасности требуют от высшей школы подготовки специалистов, владеющих комплексом современных методов оценки состояния окружающей среды, среди которых биоиндикация занимает одно из ведущих положений. В связи с этим автор предпринял попытку систематизировать накопленные знания так, чтобы у студентов и специалистов, работающих в сфере экологии, было целостное представление

о возможностях использования тех или иных биоиндикационных подходов в различных областях охраны окружающей среды и рационального природопользования. Кроме того, необходимо было показать сильные стороны и проблемы биоиндикации, а также предостеречь исследователей от упрощенного понимания процессов взаимодействия общества и природы.

Во втором, переработанном и дополненном издании рассмотрены общие теоретические положения биоиндикации и взаимосвязь изменения параметров развития организмов и их сообществ с экологическими факторами. Продемонстрированы возможности и особенности биоиндикации ландшафтно-деструкционных и параметрических нарушений. Большое внимание уделено вопросам биоиндикации эмиссионных воздействий, представлены биоиндикационные признаки загрязнения атмосферного воздуха, эвтрофикации водоемов, засоления почв, загрязнения окружающей среды биогенными элементами, тяжелыми металлами, нефтепродуктами, хлорорганическими соединениями и другими загрязняющими веществами.

Учебное пособие предназначено для студентов, бакалавров и магистрантов естественных факультетов университетов, обучающихся по специальностям и направлениям «География», «Геоэкология», «Природопользование», «Экология и природопользование». Оно может быть интересно широкому кругу специалистов, работающих в области охраны природы и рационального природопользования.

## Глава 1. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ БИОИНДИКАЦИИ

Становление биоиндикации шло параллельно с развитием биологической науки. В сохранившихся до нашего времени работах античных философов, писателей, агрономов содержатся различные сведения о возможности использования состояния растительного покрова в практических целях. Так, в трудах Катона Старшего (234–149 гг. до н. э.) есть указания на то, что густота травостоя до перепашки помогает выбирать участки, пригодные для посева культур бобовых.

В I в. н. э. римский писатель и агроном Ю. Колумелла подчеркивал, что рачительному хозяину подобает по листве деревьев, по травам или по уже поспевшим плодам иметь возможность здраво судить о свойствах почвы и знать, что может хорошо на ней расти. Описывая выбор места для посадок винограда, он предлагал выбирать участки с учетом тех диких растений, которые на них растут.

Римский инженер Витрувий (I в. до н. э.) выделял на следующие признаки присутствия воды в земных породах: там произрастают тонкий камыш, тростник, тальник, ольха, витекс, прутняк, плющ и другие, обладающие тем свойством, что не могут зародиться без влаги.

У Вергилия в «Георгиках» (36–29 гг. до н. э.) имеются сведения о том, что каменность и расчлененный рельеф указывают на территории, пригодные для возделывания маслин; заросли папоротников типичны для земель, осваиваемых под виноградники. Он отмечал также, что разные растения требуют разных местообитаний: каштан почву любит легкую, но не песчаную, особенно влажные супеси или угольную землю, или также туфовую муку. Каштан отказывается расти на хряще, красной глине или какой бы то ни было слишком прохладной земле. Ивы сажают во влажном месте, а тростник любит еще более водянистую почву, чем ива.

В высказываниях римского ученого и писателя Плиния Старшего (23 или 24–79 гг.) содержатся предостережения относительно слишком упрощенного представления о связи почв и растительности. Он пишет, что не всегда высокие деревья или пышные луга и высокие травы служат признаком плодородия почвы. Среди нескольких признаков плодородия почвы он указывает, в частности, на увеличение толщины стеблей злаков.

В XVII–XVIII вв. изучение географии растений приносит новые научные сведения о связи растительности с особенностями местообитаний. Большое значение имели работы А. Гумбольдта, обосновавшего зонально-климатическое распределение растительности. Ботанико-географические данные послужили А. Гризебаху основой для первой классификации и составления на ее основе карт климатов, опубликованных в 1872 г. В Германии труды лесоводов Т. Гартига и Г. Котта были направлены на разработку методов бонитировки лесных и сельскохозяйственных угодий.

В XIX в. изучение географии растений стало приобретать индикационный характер. Так, в Северном Тироле Ф. Унгер (1838) разделил растения на кальцефилы и силицифилы. По степени приуроченности растений к почвам он выделил три группы: почвобезразличные, почвопредпочитающие, почвопостоянные. Две последние груп-

пы растений он назвал «почвенными показателями». Изучение кальцефильности и силицифильности явилось «пробным камнем» в области растительных индикаторов почв и горных пород. Первые схемы растений — индикаторов горных пород были составлены А. П. Карпинским в 1841 г. Им же были высказаны идеи о необходимости серьезного изучения причин отклонения ряда видов от их обычной геологической приуроченности, выделено новое направление учения о комплексных индикаторах — растительных сообществах. Эта работа А. П. Карпинского была забыта, и вспомнили о ней в 1938 г., спустя 100 лет, благодаря С. Ю. Липшицу (Русские ботаники, т. IV). В отличие от А. П. Карпинского П. А. Ососков применил геоиндикацию на практике и использовал геоботанические наблюдения в собственных геолого-съёмочных работах в Засурье и Поволжье. С 1909 по 1913 г. Ососков опубликовал ряд статей, объединённых общим названием «Зависимость лесной растительности от геологического состава коренных пород». В работе широко использовались геоботанические признаки, видовой состав насаждений, соотношение обилия различных древесных пород, состояние отдельных видов и их облик. Аналогичные исследования почти в то же время (1904 г.) были проведены геологом Н. К. Высоцким на Северном Урале.

Индикационные основы геоботаники наиболее полно представили в своих работах А. Н. Краснов (1888) и Р. И. Аболин (1910). Краснов развивал учение о формациях как организованных группах растений, приуроченных к определенным, подходящим для них почвам и климату. Растительные формации, согласно Краснову, характеризуются свойственными им факторами среды: рельефом, почвами, их водным режимом, уровнем грунтовых вод, экологическим типом основных компонентов и т. д. Исследования Аболина представляют интерес трактовкой болота как единого природного целого, объединяющего органически взаимодействующие климат, рельеф, грунт, почву, животных и растительность. Однако основоположником учения о растительных индикаторах почв все же следует считать Ф. И. Рупрехта (1866). Он утверждал, что лес никогда не образует чернозема, а показателями чернозема служат степные формации. В Америке первым исследователем почв с использованием растительных индикаторов был Е. Хильгард (1860). Позже В. В. Докучаев сформулировал закон постоянства соотношений между почвой и обитающими на ней растительными организмами, подчеркнув их единство как во времени, так и в пространстве.

Первые десятилетия XX в. ознаменовались широким использованием биоиндикаторов при изучении сельскохозяйственных угодий, климата, микроклимата, палеоклимата, гидрогеологических условий, горных пород и поиске полезных ископаемых. Основополагающими работами следует считать труды Ф. Клементса, Л. Г. Раменского, В. Н. Сукачева, Б. В. Виноградова, Н. А. Отоцкого. В это же время В. Л. Омелянский (1924) привлек внимание исследователей к микроорганизмам как тонким индикаторам свойств субстрата, на котором они размножаются. Особое значение имели труды Раменского, Д. Н. Цыганова, Х. Элленберга, А. Крюденера, Н. Тюксена по составлению шкал для оценки почв лугов, лесов, залежей. Продуктивным оказалось применение биоиндикации при исследовании ареалов грунтовых вод. Основоположниками этого метода с использованием аэроснимков были С. В. Викторов и Е. А. Востокова.

Одним из направлений исследований в эти годы стало изучение послепожарных восстановительных сукцессий (Пушкина, 1938, 1960; Корчагин, 1954, 1968; Репиевский, 1961 и др.).

Учение о тяжелых металлах (ТМ), возникшее более ста лет тому назад, явилось основой при биоиндикационных исследованиях загрязнений. Одним из основателей его является К. А. Тимирязев, который в 1872 г. впервые установил положительное действие Zn на рост и развитие растений. Изучение содержания ТМ в объектах биосферы, их физиологической роли и влияния на урожай сельскохозяйственных культур начинается только спустя более полувека. Разработка основ учения о ТМ в нашей стране связана с именами В. И. Вернадского, А. П. Виноградова, Е. В. Бобко, М. Я. Школьника, Я. В. Пейве, Д. П. Малюги, П. А. Власюка, В. А. Ковды, М. В. Каталымова, В. В. Ковальского. Дальнейшее развитие оно получило в трудах Н. Г. Зырина, М. А. Глазовской, И. Г. Важенина, В. В. Добровольского, Б. Я. Ягодина, К. В. Веригиной, Ю. А. Добрицкой, В. Б. Ильина и других исследователей.

Учение В. И. Вернадского о биосфере, ноосфере, биогеохимии явилось основой биогеохимического направления в геологии. Изучение химического состава живого вещества и связи его с химизмом окружающей среды положили начало биогеохимическому методу поисков полезных ископаемых и геохимической экологии. Проблема биохимической роли микроэлементов была впервые поставлена Вернадским в 1926 г. на Всесоюзном геологическом съезде. Им было четко сформулировано несколько обобщений о роли организмов в химических процессах Земли, что заложило основы нового научного направления, лежащего на стыке биологии, геологии и химии, — биогеохимии. Накопившийся фактический материал позволил Вернадскому, А. П. Виноградову и другим исследователям к концу 1930-х годов сделать вывод, что в живых организмах содержатся в определенных количествах все химические элементы. До последнего времени основное практическое применение биогеохимии было связано с биогеохимическим методом поисков месторождений полезных ископаемых. Суть этого метода заключается в выявлении участков повышенных концентраций рудообразующих элементов в почвах и растениях. В биогеохимии они рассматриваются как вторичные ореолы рассеяния рудной минерализации. Участки повышенных концентраций металлов в растениях и верхнем горизонте почвы — биогеохимические аномалии — дают основание предполагать, что на глубине присутствуют залежи руд.

Применение биогеохимического метода для поисков полезных ископаемых в сложных климатических и геологических условиях в труднопроходимых районах или на территориях, перекрытых рыхлыми аллохтонными отложениями, облегчает обнаружение месторождений. Биогеохимические исследования сыграли важную роль в открытии многих месторождений руд цветных и редких металлов, а также других полезных ископаемых. Известны биогеохимические аномалии ТМ, возникшие благодаря выходу на поверхность горных пород с повышенной концентрацией металлов, а также подземных вод с высоким содержанием микроэлементов. Новым направлением биогеохимии в 1950–1970 гг. стала геохимическая экология, получившая широкое развитие в работах В. В. Ковальского и его учеников. Эта наука изучает особенности химического состава живых организмов и влияние естественных и техногенных процессов на его изменение.

Развитие природоохранной индикации началось сравнительно недавно. Так, шкалы Л. Г. Раменского, Х. Элленберга содержат оценку пастбищной дигрессии угодий. Элленберг, кроме того, обосновал градации территории по интенсивности воздействия отдельных загрязняющих веществ. Важным этапом в становлении природоохранной направленности биоиндикации стали работы С. В. Викторова по дешифрированию снимков в аридных районах, составление карты охраны окружающей

среды под руководством Е. А. Востоковой, обоснование коллективом сотрудников под руководством Е. С. Мельникова геокриологического прогноза.

Влиянию выпаса на травостой посвящены многочисленные работы, среди которых прежде всего следует отметить исследования М. С. Шалыта (1938), Н. Т. Нечаевой (1954), А. П. Шенникова (1964), Т. А. Работнова (1969, 1984, 1993), И. В. Ларина (1952, 1969, 1990). Изучены динамические смены фитоценозов, особенности видового разнообразия, состав рудеральной флоры (Абрамчук, Горчаковский, 1980; Воронов, 1984; Ершова, 1986; Карташева, Терехова, 1992; Ершова, Лапшина, 1994; Южаков, Шатохина, 1994 и др.). Одним из актуальных вопросов в середине 1970-х годов стало изучение изменения морфологических параметров травостоя и биопродуктивности пастбищ (Базилевич, Семенюк, 1983; Нечаева и др., 1978; Виноградов, Курочкина, 1981 и др.).

В начале 1960-х годов сформировалось понятие рекреационной дигрессии. В. С. Преображенский тщательно изучил изменения природной среды в местах массового отдыха и выделил основные стадии деградации экосистем, применив комплексный подход, включающий анализ состояния почв и растительности. Основное внимание было уделено физическим, физико-химическим, а также микробиологическим и биохимическим параметрам почв, смене доминантов, изменению видового разнообразия и морфологических характеристик древесного, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов.

Конец XX в. ознаменовался резким усилением внимания к решению экологических задач и своего рода «экологизацией» всех наук. Значительно увеличилось количество научных исследований в области охраны окружающей среды и рационального природопользования. В настоящее время установлены и широко используются группы видов — индикаторов различных антропогенных воздействий. Большое внимание уделяется проблеме эвтрофирования водных объектов (Хирсанов, 1993; Муравьев, 2000 и др.) и химическому загрязнению почв (Сагет, 1980, 1986; Скарлыгина-Уфимцева, 1980; Степанов, 1988; Черненкоова, 2002 и др.). Изучаются влияние на биоту рекреационной нагрузки (Виноградов, 1964; Казанская, 1972, Грибовская, 1981; Иванов, 1983 и др.), загрязнения воздуха (Илькун, 1971, 1978; Sundstrom, Hallgren, 1973; Кулагин, 1974, 1985; Десслер, 1981; Pearson, Henriksson, 1981; Трасс, 1983; Goyal, Seaward, 1983; Ronen et al., 1983; Malhotra, Khain, 1983; Beckett, Brown, 1983; Deruelle, Petit, 1983; Артамонов, 1986; Alebic-Juretic, Arko-Pijevac, 1989; Алексеев, 1990; Николаевский, Николаевская, 1995; Ярмишко, 1997; Григорьев, Богучельников, 1997 и др.) и особенности послепожарных сукцессий (Горшков и др., 1998; Баккал, 1999; Ушатин, 2001; Кулешова, 2002 и др.). Обобщение обширного литературного материала представлено в монографии «Биоиндикация загрязнений наземных экосистем», вышедшей под редакцией Р. Шуберта и переведенной на русский язык в 1988 г., в работах К. С. Бурдина «Основы биологического мониторинга» (1985), А. Г. Карташева «Биоиндикация экологического состояния окружающей среды» (1999), в шеститомнике В. В. Иванова «Экологическая геохимия элементов» (1994–1997) и т. д. Учебники Б. В. Виноградова «Растительные индикаторы и их использование при изучении природных ресурсов», И. С. Гудилина и И. С. Комарова (1978) по основам геоиндикации и С. В. Викторова и А. Г. Чикишева «Ландшафтная индикация» (1985) содержат главы по индикации некоторых видов антропогенных воздействий.

Немалое число работ посвящено воздействию на живые организмы радионуклидов (Кривоуццкий, 1983, 1985, 1991; Покаржевский, 1985; Тихомиров и др., 1988

и др.), а также загрязняющих веществ, недавно выделенных в группы приоритетных поллютантов, в том числе ксенобиотиков. В их число входят хлорорганические соединения (полихлорированные бифенилы (ПХБ), дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ), гексахлорциклогексан (ГХЦГ), диоксины, фураны и т. д.), полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), фенолы и др. Одним из первых направлений изучения воздействия ксенобиотиков на живые организмы было выявление их канцерогенной активности (Шабад, 1973; Слепян, 1973, 1979 и др.).

К настоящему времени в биоиндикационных исследованиях мониторингового типа наметились направления, основывающиеся на приоритетном использовании различных групп живых организмов: микроорганизмов, водорослей, растений, животных и т. д.

Широкое развитие получила фитоиндикация загрязнений — применение растений и их сообществ в мониторинговых исследованиях (Бурдин, 1985; Ильин, 1985, 1991; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Парибок, Алексева-Попова, 1983; Лянгузова, 1990; Опекунова, 1994; Ярмишко, 1997; Уфимцева, 2000; Черненкова, 2002; Лукина, Никонов, Фронтасьева, 2004; Неверова, 2004; Кулагин, Шагиева, 2005; Жиров, 2007; Бузмаков, 2010; Москаленко, 2010 и др.). Одно из ведущих мест занимает изучение древесных растений — дендроиндикация. Деревья применяются в качестве биоиндикаторов различного рода антропогенных воздействий. Хорошо изучен химический состав и особенности накопления поллютантов в условиях антропогенного загрязнения (Кулагин, 1974, 1985; Раменская, 1974; Добровольский, 1983; Парибок и др., 1983, 1989; Маховская и др., 1984; Лянгузова, 1990; Демьянов, 1990, 1992; Касимов, 1995; Markert et al., 1999; Опекунова, Усманова, 2000; Черненкова, 2002; Poikolainen et al., 2004; Никонов и др., 2004; Кошелева и др., 2005; Баргальи, 2005; Жиров и др., 2007; Лянгузова, 2010 и др.). Значительное внимание уделяется изменению морфологических параметров растений в условиях естественных геохимических аномалий и использованию их для экспресс-оценки загрязнений (Петрунина, 1965; 1971; Скарлыгина-Уфимцева, 1976; Слепян и др., 1978, 1980; Ковальский и др., 1981; Антонова, 1983; Уфимцева, Терехина, 2000; Опекунова, Алексева-Попова, 2001; Черненкова, 2002; Опекунова, Мовчан, 2003; Федорова, 2005; Ярмишко, 2007; Быков, 2007 и др.). Особенности строения, структуры и динамики древесных сообществ используются при оценке ландшафтно-деструктивных нарушений. Изменение величины рН коры деревьев применяется как показатель интенсивности выпадения кислотных дождей (Горшков, 1987, 1990; Опекунова, 1995; Михайлова, 1996; Вольфовская, 1999; Константинова, 2001; Marko-Worlowska, 2011 и др.).

В мировой практике биологического мониторинга применяются различные древесные породы: граб *Carpinus betulus* L., ясень *Fraxinus excelsior* L. (Aksoy, Demirezen, 2006), липа *Tilia cordata* L. (Уфимцева, Терехина, 2005), дуб *Quercus robur* (Grodzińska, 1971; Kosiska, Tulik, 2011), клен *Acer pseudoplatanus* L. (André et al., 2006; Steindor et al., 2011), вишня *Prunus serrula* L. (Schelle et al., 2008), кипарис *Cupressus sempervirens* L. (El-Hazan, 2002; Batarseh et al., 2008 и др.), тополь черный *Populus nigra* L. (Berlizov и др., 2007, 2008; Sawidis et al., 2011), дуб *Quercus ilex* Male (Santamaria, Martin, 1997), платан *Platanus hybrida* Brot. (Machado et al., 2006; Sawidis et al., 2011), манго *Mangifera indica* L. (Subsri, Saipunkaew, 2002; Salami, Oyere, 2010), эвкалипты *Eucalyptus* sp. (Salami et al., 2005) и др. В литературе приводятся многочисленные результаты биомониторинга загрязнения по сосне обыкновенной *Pinus sylvestris* (Ярмишко, 1997; Laaksovirta et al., 1976; Stöcker, Huhn, 1994; Huhn et

al., 1995; Schulz et al., 1997, 1999, 2000; Kosiska T., Tulik, 2011 и др.). В биоиндикационных исследованиях на территории России используются также ель европейская *Picea abies* (L.) Karst., ель сибирская *P. obovata* Ledeb.; береза повислая *Betula pendula* Roth, береза пушистая *B. pubescens* Ehrh.; липа *Tilia cordata*; дуб *Quercus robur* L.; тополи *Populus balsamifera* L., *P. nigra*.

С конца 1960-х годов в Скандинавских странах начали широко использовать мхи в качестве биомониторов при изучении загрязнения наземных экосистем ТМ (Rühling, Tyler, 1968, 1970). С тех пор проводятся многочисленные исследования по изучению мохового покрова территорий, подвергшихся антропогенному загрязнению (Ellison et al., 1976; Grodzinska, 1978; Maschke, 1981; Engelke, 1984; Steinnes, 1977, 1984; Ross, 1990; Markert et al., 1999; Wappelhorst et al., 1999; Berg, Steinnes, 2011). Во мхах определяют концентрацию ТМ (LeBlanc, 1961; Barkman, 1969; Taoda, 1972; Peicea, 1973; Nash, Nash 1974; Lauritzen, 1975; Nakamura, 1976; Тамм, Каннукене 1978; Гамбарян, Черданцева, 1979; Ando, 1980; Sergio, Bento-Pereira, 1981; Richardson, 1981; Rao, 1982; Bargagli et al., 1995 и др.), пестицидов, радиоактивных элементов (Thomas, 1986; Guillitte et al., 1990; Berg et al., 1995 и др.), ПАУ и хлорорганических соединений (ХОС) (Thomas, 1986 и др.).

Большое значение стало придаваться диагностике качества окружающей среды в селитебных зонах (Мазинг, 1984; Горышина, 1991; Фролов, 1998; Касимов, 1995). Еще в середине XIX в. появились работы, указывающие на возможность применения лишайников при оценке загрязнения атмосферного воздуха. Так, Л. Х. Гриндон в своей работе «Флора Манчестера», опубликованной в 1859 г., отмечал значительное сокращение числа лишайников из-за вырубki старых лесов и притока фабричного дыма. Исследования негативного влияния городской среды на их рост и развитие были проведены У. Нилангером в 1866 г. в Люксембурге. Затем в 1879 г. У. Джонсон отметил отсутствие листоватых и кустистых лишайников в лесах Гибсайда, расположенных в 8 км к западу от Ньюкасла. По наблюдениям Дж. Кромби, к 1885 г. сократилось число видов лишайников около Лондона и в результате урбанизации происходило их массовое вымирание по всей Англии. Ф. Арнольд (1900) при изучении лишайниковой флоры Мюнхена экспериментально с помощью трансплантации подтвердил ингибирующее действие смога и загрязненного воздуха на лишайники. В период с 1924 по 1950 г. проводилось изучение распределения лишайников в Осло, Стокгольме, Хельсинки, Цюрихе, Кракове. Лихеноиндикационная съемка была проведена на территории многих крупных городов: Казани (Голубкова, Мальшева, 1978), Харькова (Байрак, 1988), Лондона (Hawksworth, McManus, 1989), Львова (Кучерявый и др., 1990), Парижа (Letrouit-Galinou et al., 1992), Нью-Йорка (Delindick, 1994), Москвы (Бязров, 1994), Санкт-Петербурга (Мальшева, 1998, 2007) и др.

В дальнейшем использование лишайников в качестве индикаторов стало применяться не только в городах, но и вблизи локальных источников техногенного загрязнения (Трасс, 1983; Goyal, Seaward, 1983; Ronen et al., 1983; Malhotra, Khain, 1983; Beckett, Brown, 1983; Sundstrom, Hallgren, 1973; Deruelle, Petit, 1983; Pearson, Henriksson, 1981; Мальшева, 1998; 2007; Smith, Baker, 2003; Бязров, 2004; Larsen et al., 2007; Baptista et al., 2008; Fuga et al., 2008; Aslan et al., 2011). Стали не только изучаться параметры структуры и строения естественного лишайникового покрова путем так называемого пассивного биомониторинга, но и использоваться индикаторные виды лишайников для активного биомониторинга, предусматривающего размещение лишайниковых ловушек на тестируемой территории (Rabe, 1982 и др.).



Физиологическая, анатомическая, биохимическая и трофическая близость человеку мелких млекопитающих позволила рассматривать их в качестве объекта индикации состояния среды для оценки экологического риска. Проводились многочисленные исследования изменения химического состава органов и тканей грызунов (полевок рода *Microtus*, рода *Clethrionomus*, буроzubок и др.) под влиянием антропогенного загрязнения (Williamson, Evans, 1972; Jefferies, French, 1972; Getz et al., 1977; Roberts, Johnson, 1978; Безель и др., 1984, 1985, 1986; Hunter et al., 1987; Pankakoski et al., 1992; Мухачева, Безель, 1995; Безель, Бельский, 2006 и др.). В качестве индикаторов стрессовых воздействий изучены нарушения репродуктивных функций, динамика численности и изменения структуры популяций и видового разнообразия мелких млекопитающих (Тестов, 1993; Лукьянова и др., 1994; Мухачева, Лукьянов, 1997; Безель и др., 1998; Рождественская, 1999; Шилова, 1999 и др.). Однако, несмотря на все преимущества, применение грызунов для решения вопросов экологического мониторинга состояния ПТК (экосистемного мониторинга) не столь эффективно в связи с трудоемкостью учета, полиморфизмом видов, изменением численности зверьков по местообитаниям и т. д. (Тертицкий, Покровская, 1991 и др.).

Относительно давние традиции в мониторинге состояния природной среды имеет использование птиц. Для оценки техногенного воздействия применяют показатели разных структурно-функциональных уровней. Наиболее изучены изменение химического состава оперения и отдельных органов (Frank, 1986; Scheuhammer, 1987; Pedersen, Myklebust, 1991; Nyholm, 1994, 1995; Eeva, Lehikoinen, 1995; Лебедева, 1999) и отклонения в репродуктивных показателях птиц (Мянд, 1988; Венгеров, 1991; Eeva, 1996; Бельский, 1997 и др.). Установлено снижение численности, уменьшение видового разнообразия и структуры населения птиц при усилении антропогенного воздействия (Flousek, 1989; Lemberk, 1989; Гилязов, Катаев, 1990; Muckel, 1992; Gramsz, 1993; Бельский, Ляхов, 1996; Бельский, Безель, 2004 и др.). Показано, что при мониторинге состояния природной среды эти индикаторы могут использоваться лишь в ограниченном объеме. К недостаткам метода следует отнести пространственную неоднородность распространения птиц, поливариантность их реакций при нарастании техногенной нагрузки, сезонные миграции и географическую изменчивость населения птиц в течение года (Покровская, 1990; Тертицкий, 1990; Вартапетов, Юдкин, 1998 и др.).

К настоящему времени накоплен обширный материал по изменению микробиологической активности почв под влиянием техногенеза (Аристовская, 1980; Кожевин и др., 1980; Умаров, 1986; Звягинцев, 1987; Зенова и др., 1996; Полянская, 1996; Giller et al., 1998; Kelly et al., 1999; Евдокимова, Мозгова, 2001; Девятова, 2005; Назарько, 2007; Фёдоров, 2007; Пименов, Морозова, 2011 и др.). Биоиндикация загрязнения наземных ПТК с применением микроорганизмов традиционно основывается на исследованиях почвенной микробиоты: бактерий, актиномицетов, дрожжевых грибов и др. Основными индикаторными показателями признаны: общая микробная биомасса и продуктивность, групповое и видовое разнообразие, соотношение основных групп микроорганизмов, состав и структура микроценозов, интенсивность почвенного дыхания, активность разложения целлюлозы, нитратонакопление, активность почвенных ферментов, микробные «пейзажи» и т. д. В последние годы в микробиологической индикации формируется биогеоэкологический подход, включающий изучение микробных сообществ всех ярусов экосистемы (Мишустин, 1975; Самбунова, 1977; Бабьева, 1984; Звягинцев и др., 1991; Добровольская и др., 2004;

Напрасникова, 2004; Нечаева и др., 2010). Успешно развивается метод капиллярной микроскопии, позволяющий определить характер формирующихся микробных обрастаний и оценить основные свойства почв, особенности протекающих в них процессов и изменения условий почвенной среды под влиянием техногенной нагрузки (Перфильев, Габэ, 1964; Аристовская и др., 1967; Сорокин, 1975; Щапова, 1994; Василенко, Кутовая, 2003 и др.).

Для проведения биомониторинга экологического состояния ПТК предлагается использование насекомых (Богачёва, 1992; Ивлиев, 2001; Омаров и др., 2008), земноводных, представителей почвенной мезофауны (Криволицкий, 1999; Леонтьева, 1995 и др.), млекопитающих (Тертицкий, Покровская, 1991; Бурдин, 1985) и т. д. Но, несмотря на относительно давний опыт применения этих методик, они не вошли в практику биоиндикации загрязнения окружающей среды, поскольку достаточно трудоемки и требуют больших временных затрат для получения репрезентативной информации. Состояние этих биоиндикаторов зависит от физико-географических факторов, трофических связей, структуры и состава консорциев. Так, исследования, выполненные на севере Западной Сибири в местах разработки газовых и нефтяных месторождений (Вартапетов, Юдкин, 1998), показали увеличение численности птиц, преимущественно околородных и водоплавающих, а также полевок, кормящихся вегетативными частями и семенами растений, и земноводных. В то же время было отмечено снижение численности лесных грызунов и крупных, хищных, охотничье-промысловых птиц.

В настоящее время для оценки техногенной трансформации ландшафтов широко используются морфологические параметры живых организмов, в том числе определение величины флуктуирующей асимметрии как критерия стабильности развития особи. Исследование симметрии / асимметрии ведется на различных уровнях организации жизни — от молекулярного до популяционного. Изучаются различные таксономические группы (растения, насекомые, млекопитающие и др.), рассматриваются как организмы в целом, так и их отдельные органы и структуры (симметрия черепа, мышц, листовой пластинки и т. д.). В 2000 г. В. М. Захаровым с соавторами было подготовлено методическое пособие для оценки состояния природных популяций по стабильности развития, которое в 2003 г. было утверждено и рекомендовано Министерством природных ресурсов Российской Федерации (МПР РФ) для использования в заповедниках РФ.

Диагностика качества окружающей среды по состоянию здоровья населения является составной частью экологии человека (Образцов, 1998; Худолей и др., 1998; Малхазова, 2001; Мовчан, 2004 и др.). Для оценки условий проживания используются средняя продолжительность жизни, показатели заболеваемости, смертности и др. Метод применим для селитебных территорий, но для решения задач экосистемного мониторинга, а также оценки качества окружающей среды в районах с низкой плотностью населения использование его нецелесообразно.

Большое значение в связи с этим имеет развитие экологической токсикологии (экоэкологии), изучающей токсические эффекты действия химических веществ на живые организмы, а также устойчивость и функционирование биосистем надорганизменного уровня в условиях их токсического загрязнения.

Одновременно с изучением биологических объектов в природных условиях развивалось новое направление в исследовании качества жизнеобеспечивающих сред (воды, воздуха, почвы) — биотестирование. Интенсивное развитие методов биотестирования началось с 1950-х годов. В последние 20–25 лет методы биологического

контроля качества вод стали законодательно применяться в ФРГ (Peltier, 1987), широко использоваться государственными органами контроля в области охраны окружающей среды в США (Tebo, 1987), Франции (Villeneuve, 1980), Англии и Уэльсе (Научные основы... 1981).

С 1986 г. методы биотестирования для контроля экологического состояния окружающей среды внедряются и в России. В 1990 г. было подготовлено и утверждено Государственным комитетом СССР по охране природы «Методическое руководство по биотестированию воды» (РД 118–02–90). В этот документ вошли методики с использованием тест-объектов — представителей основных трофических звеньев водной экосистемы: водорослей, ракообразных и рыб. Позднее в целях государственного экологического контроля Минприроды России, а затем Госкомэкологией России были подготовлены и утверждены методики для определения токсичности воды с использованием в качестве тест-объектов инфузорий и ракообразных (ПНД ФТ 14.1:2:3:4.2–98; ПНД ФТ 14.1:2:3:4.3–99; ПНД ФТ 14.1:2:3:4.4–99), а также для определения токсичности вод, почв и донных отложений — методика биотестирования по ферментативной активности бактерий (ПНД ФТ 14.1:2:3:4.1–96; 16.2:2:3:1.2–96). В 2002 г. МПР РФ издано «Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов», включающее методики с использованием бактерий, инфузорий, водорослей, ракообразных и рыб.

Таким образом, в настоящее время биоиндикация загрязнений, основывающаяся на многовековом опыте использования методов биоиндикации в хозяйственной деятельности человека, находит все большее применение в области охраны окружающей среды и рационального природопользования.

## Глава 2. БИОИНДИКАТОР И ОБЪЕКТ ИНДИКАЦИИ

### 2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОИНДИКАЦИИ

Одной из центральных проблем геоэкологии является отработка адекватной системы наблюдений за состоянием природной и антропогенно трансформированной среды, которая обеспечивала бы эффективное слежение за изменениями ее параметров, репрезентативно представляя информацию об отклонениях от фонового состояния. Объектом геоэкологических исследований в широком смысле является окружающая среда, под которой в соответствии с Федеральным законом «Об охране окружающей среды» (2002) понимается совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов, а также антропогенных объектов. В законе даются следующие определения структурных единиц окружающей среды. Компонентами среды являются земля, недра, почвы, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, растительный, животный мир и иные организмы, а также озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство, обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле. Природные объекты представлены естественными экологическими системами (экосистемами), природными ландшафтами и составляющими их элементами, сохранившими свои природные свойства. Под природно-антропогенными объектами понимаются природные объекты, измененные в результате хозяйственной деятельности, а также объекты, созданные человеком, обладающие свойствами природного объекта и имеющие рекреационное и защитное значение. Антропогенный объект — это объект, созданный человеком для обеспечения его социальных потребностей и не обладающий свойствами природных объектов.

Для общего обозначения природных объектов, по мнению А. Г. Исаченко (1979), наиболее подходит термин «геосистема». В физической географии под природным географическим комплексом (геосистемой) понимается динамическая система взаимообусловленных географических компонентов, взаимосвязанных в своем пространственном размещении и развивающихся как части целого. Наряду с целостностью природные географические комплексы (геосистемы) характеризуются определенной вертикальной и горизонтальной структурой. Они обладают сезонной аспектностью, динамикой и устойчивостью и могут различаться по своему иерархическому уровню. Сущность взаимодействия компонентов геосистем состоит в связывающих их потоках вещества и энергии (Исаченко, 1979, 1985). Именно это сближает понятия «геосистема» и «экосистема». Под естественной экологической системой понимается объективно существующая часть природной среды, которая имеет пространственно-территориальные границы и в которой составляющие ее элементы — живые (растения, животные и другие организмы) и неживые — взаимодействуют как единое функциональное целое и связаны между собой обменом веществом и энергией.

Вопрос о соотношении экосистем и геосистем неоднократно обсуждался в литературе. Распространена точка зрения, согласно которой экосистемы (биогеоценозы) являются частным случаем геосистем. Д. Л. Арманд относит к экосистемам лишь те геосистемы, в которых существенную роль играют биоконпоненты. В. Б. Сочава (1978) считал, что неправомерно подчеркивать значение биоты и тем самым сти-

## CONTENTS

Introduction .....	8
Chapter 1. A brief historical sketch of the development of bioindication .....	12
Chapter 2. Bioindicators and object of indication .....	21
2.1. Theoretical basis of bioindication .....	–
2.2. The concept of bioindicators .....	29
2.3. The sensitivity and reliability of bioindicators .....	52
2.4. Mathematical methods in bioindicative investigations .....	54
2.5. Basic principles on the use of bioindication .....	63
2.6. Methods of bioindication investigations .....	65
2.6.1. Biogeochemical approach to bioindicative investigations .....	66
2.6.2. Methods of biomarkers .....	71
2.6.3. Methods of phytoindication of ecological state of the environment .....	77
2.6.4. Methods of biological testing .....	91
2.7. General requirements for conducting phytoindicative investigations .....	100
Chapter 3. Types of anthropogenic influences .....	102
Chapter 4. Bioindication of landscape-destructive and parametric changes .....	105
4.1. Changes in the water regime of the territory .....	–
4.2. The impact of fire .....	112
4.3. Changing the light conditions .....	116
4.4. Changing the temperature .....	130
4.5. Recreation and pasture digression .....	135
4.6. Radioactive contamination .....	144
Chapter 5. Bioindication of anthropogenic emissive impacts .....	167
5.1. Air pollution .....	–
5.2. Bioindication of state of soil cover .....	185
5.2.1. Changing the soil acidity .....	187
5.2.2. The texture of the soil .....	–
5.2.3. Soil fertility .....	193
5.2.4. Soil salinity .....	195
5.2.5. Bioindication of soil types .....	198
5.3. Bioindication of biogenic components of pollution .....	198
5.3.1. Nitrogen .....	200
5.3.2. Phosphorus .....	207
5.3.3. Potassium .....	212
5.3.4. Calcium .....	214
5.3.5. Bioindication of eutrophication of water bodies .....	218
5.4. Bioindication of heavy metal pollution .....	227
5.5. Bioindication of oil and oil products .....	249
5.6. Bioindication of contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons .....	259
5.7. Bioindication of phenols pollution .....	266
5.8. Bioindication of contamination by organochlorine compounds .....	270

5.8.1. Pesticid contamination .....	-
5.8.2. Contamination by polychlorinated biphenyls .....	278
5.8.3. Pollution by polychlorinated dibenzodioxins and polychlorinated dibenzofurans .....	280
5.9. Bioindication of pollution by synthetic surfactants .....	283
Conclusion .....	287
References .....	289

Учебное издание

*Марина Германовна Опекунова*

## **БИОИНДИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ**

*Учебное пособие*

2-е издание

Редактор *Г. Б. Ерусалимский*

Компьютерная верстка *Ю. Ю. Тауриной*

Корректор *Е. В. Величкина*

Подписано в печать 21.06.2016. Формат 70 × 100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 24,3 + вкл. 0,65. Тираж 200 экз. (1-й завод). Заказ № 124.

Издательство СПбГУ.

199004, С.-Петербург, В. О., 6-я линия, 11

Тел./факс (812) 328-44-22

[publishing@spbu.ru](mailto:publishing@spbu.ru)

[publishing.spbu.ru](http://publishing.spbu.ru)

Типография Издательства СПбГУ.

199061, С.-Петербург, Средний пр., 41

Книги Издательства СПбГУ можно приобрести

в Доме университетской книги

Менделеевская линия, д. 5

тел.: +7(812) 329 24 71

часы работы 10.00-20.00 пн. - сб.,

а также в интернет-магазине [OZON.ru](http://OZON.ru)