

11-11031 2изд.

ДУБЛЕТ

Н. П. Битюцкий



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

20-05296

2-е издание



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н. П. Битюцкий

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ
ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

2-е издание



ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ББК 28.57
Б66

Рецензенты:

д-р с.-х. наук, проф. Г. А. Воробейков
(Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена);
д-р биол. наук, проф. А. А. Паутов
(С.-Петербургский государственный университет)

Битюцкий Н. П.

Б66 Микроэлементы высших растений. 2-е изд. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2020. — 368 с.
ISBN 978-5-288-06048-9

Первое издание вышло в 2011 г. при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). В монографии содержится информация о физиолого-биохимических функциях микроэлементов, необходимых или полезных растениям. Подробно освещены достижения в области молекулярной биологии по вопросам поглощения микроэлементов корнями, а также ближнего и дальнего транспорта микроэлементов в растениях. На молекулярном, клеточном и организменном уровнях рассмотрены физиологические и экологические основы устойчивости и адаптации растений к условиям дефицита и избытка микроэлементов. Отражены основные направления фиторемедиации — использования зеленых растений для извлечения тяжелых металлов или других химических элементов из загрязненных ими почв и природных вод. Приведены сведения о биотехнологиях обогащения микроэлементами культурных растений и продукции растениеводства, применяемых для повышения урожая растений и улучшения здоровья человека.

Книга может быть полезна научным работникам, студентам биолого-почвенных факультетов университетов, а также всем интересующимся проблемами биологии растений.

ББК 28.57

ISBN 978-5-288-06048-9

© Н. П. Битюцкий, 2010
© Санкт-Петербургский
государственный
университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	7
2. ФОРМЫ И ФУНКЦИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РАСТЕНИЯХ	12
2.1. ЖЕЛЕЗО	—
2.2. МАРГАНЕЦ	26
2.3. ЦИНК	28
2.4. МЕДЬ	34
2.5. МОЛИБДЕН	37
2.6. НИКЕЛЬ	45
2.7. БОР	47
2.8. ХЛОР	54
2.9. КОБАЛЬТ	55
2.10. СЕЛЕН	58
3. ПОГЛОЩЕНИЕ И ТРАНСПОРТ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ	62
3.1. ПОГЛОЩЕНИЕ	—
3.1.1. Общая характеристика поглотительных систем	—
3.1.2. Поглощение отдельных микроэлементов	67
3.1.2.1. Железо	—
3.1.2.2. Марганец	71
3.1.2.3. Цинк	72
3.1.2.4. Медь	—
3.1.2.5. Молибден	73
3.1.2.6. Никель	74
3.1.2.7. Бор	—
3.1.2.8. Хлор	—
3.1.2.9. Кобальт	75
3.1.2.10. Селен	—
3.2. ТРАНСПОРТ	76
3.2.1. Транспортные формы	—
3.2.2. Радиальный транспорт в корне	77
3.2.3. Транспорт по ксилеме	78
3.2.4. Транспорт по флоэме	82
3.2.5. Обмен между ксилемой и флоэмой	84
3.2.6. Транспорт внутри клеток	85
3.2.7. Взаимодействие ионов	87

4. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В СЕМЕНАХ.....	91
4.1. ФОРМИРУЮЩИЕСЯ СЕМЕНА	—
4.2. ЗРЕЛЫЕ СЕМЕНА.....	96
4.2.1. Общее содержание.....	—
4.2.2. Распределение.....	101
4.2.3. Формы.....	103
4.3. ПРОРАСТАЮЩИЕ СЕМЕНА.....	106
4.3.1. Динамика.....	—
4.3.2. Механизмы мобилизации.....	112
5. ДЕФИЦИТ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ	121
5.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАРУШЕНИЯ У РАСТЕНИЙ И ВИЗУАЛЬНЫЕ СИМПТОМЫ.....	—
5.1.1. Железо.....	—
5.1.2. Марганец.....	123
5.1.3. Цинк.....	124
5.1.4. Медь.....	125
5.1.5. Молибден.....	126
5.1.6. Никель.....	128
5.1.7. Бор.....	—
5.1.8. Хлор.....	129
5.1.9. Кобальт.....	130
5.1.10. Селен.....	—
5.2. ПРИЧИНЫ ДЕФИЦИТА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ.....	131
5.2.1. Доступность микроэлементов в почве.....	—
5.2.1.1. Влияние свойств почвы.....	132
5.2.1.2. Подвижность отдельных микроэлементов.....	151
5.2.2. Физиологические причины.....	162
5.3. ДИАГНОСТИКА.....	168
5.3.1. Анализ образцов почв.....	—
5.3.2. Анализ индикаторных органов растений.....	171
6. УСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ К ДЕФИЦИТУ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ.....	177
6.1. АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ РАСТЕНИЙ.....	—
6.1.1. Реакции, приуроченные к корням.....	—
6.1.1.1. Специфические реакции.....	—
Дефицит железа.....	—
Дефицит других микроэлементов.....	186
6.1.1.2. Неспецифические реакции.....	187
Корневые слизи.....	—
Низкомолекулярные корневые выделения.....	188
6.1.2. Реакции, приуроченные к побегу.....	190
6.1.2.1. Дефицит железа.....	—
6.1.2.2. Дефицит других микроэлементов.....	191
6.1.3. Реакции в семенах.....	192
6.2. ЭВОЛЮЦИЯ МЕХАНИЗМОВ АДАПТАЦИИ РАСТЕНИЙ К ДЕФИЦИТУ ЖЕЛЕЗА.....	194
6.3. ВИДОВАЯ И ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ.....	196
6.3.1. Признаки эффективных растений.....	—
6.3.1.1. Fe-эффективность.....	197
6.3.1.2. Zn-эффективность.....	199
6.3.1.3. Mn-эффективность.....	200

6.3.2. Сравнительная эффективность злаков и двудольных растений.....	201
6.3.3. Диагностика эффективности злаков	204
7. ИЗБЫТОК МИКРОЭЛЕМЕНТОВ	208
7.1. КРИТИЧЕСКИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ	—
7.2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАРУШЕНИЯ В РАСТЕНИЯХ.....	215
7.2.1. Общие нарушения.....	—
7.2.2. Нарушения при избытке отдельных микроэлементов	217
7.2.2.1. Железо.....	—
7.2.2.2. Марганец.....	218
7.2.2.3. Цинк	—
7.2.2.4. Медь.....	219
7.2.2.5. Молибден	—
7.2.2.6. Никель	220
7.2.2.7. Бор.....	—
7.2.2.8. Хлор.....	—
7.2.2.9. Кобальт	221
7.2.2.10. Селен.....	—
7.2.3. Нарушения, вызванные косвенными причинами	222
7.3. МЕХАНИЗМЫ УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ.....	—
7.3.1. Избегание.....	—
7.3.2. Исключение.....	223
7.3.3. Иммобилизация	224
7.3.3.1. Клеточная стенка	225
7.3.3.2. Компартиментация внутри клеток.....	—
7.3.3.3. Органические кислоты	226
7.3.3.4. Аминокислоты и их производные.....	227
7.3.4. Выделение.....	232
7.3.5. Ферментативные изменения.....	234
7.4. РАСТЕНИЯ-ГИПЕРАККУМУЛЯТОРЫ	—
7.4.1. Виды растений.....	—
7.4.2. Транспортные системы	236
7.4.3. Биологическое значение гипераккумуляции	237
7.5. ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ.....	238
7.5.1. Фитоэкстракция	239
7.5.1.1. Естественная фитоэкстракция.....	—
7.5.1.2. Индуцированная фитоэкстракция	243
7.5.2. Фитостабилизация	245
7.5.3. Перевод загрязняющих веществ в летучие формы с помощью растений.....	246
7.5.4. Ризофильтрация.....	—
7.5.5. Искусственно заболоченные территории	—
8. ОБОГАЩЕНИЕ РАСТЕНИЙ МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ	248
8.1. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА.....	—
8.2. УДОБРЕНИЯ С МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ	255
8.2.1. Железосодержащие удобрения.....	256
8.2.2. Марганецсодержащие удобрения.....	259
8.2.3. Цинксодержащие удобрения	260
8.2.4. Медьсодержащие удобрения.....	—
8.2.5. Молибденсодержащие удобрения	261

8.2.6. Борсодержащие удобрения.....	262
8.2.7. Кобальтсодержащие удобрения.....	263
8.2.8. Селенсодержащие удобрения	—
8.2.9. Комплексные удобрения.....	264
8.2.10. Специальные удобрения.....	—
8.2.11. Микроэлементы-примеси.....	266
8.3. ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ С МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ.....	268
8.3.1. Внесение в почву (питательные растворы).....	—
8.3.1.1. Комплексоны и комплексонаты.....	—
Устойчивость.....	269
Сорбция почвой	272
Взаимодействие с корнями растений.....	275
8.3.1.2. Другие микро- и макроудобрения.....	280
8.3.2. Предпосевная обработка семян.....	281
8.3.3. Некорневые подкормки.....	282
8.3.3.1. Проницаемость листьев.....	—
8.3.3.2. Подкормки железом	285
Эффективность.....	—
Фотохимические эффекты	286
8.3.3.3. Подкормки другими микроэлементами	293
8.4. БИОТЕХНОЛОГИИ	294
ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ ОСНОВНЫХ ВИЗУАЛЬНЫХ СИМПТОМОВ ДЕФИЦИТА МАКРО- И МИКРО- ЭЛЕМЕНТОВ У РАСТЕНИЙ	299
ЛИТЕРАТУРА	302