

## ЭКОСИСТЕМНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ПАТОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕСНЫХ И ОЗЕЛЕНИТЕЛЬНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ

доктор биологических наук, профессор **Ю. Ф. Арефьев**<sup>1</sup>

доктор биологических наук, профессор **П. Д. Венгеров**<sup>2</sup>

**А. Е. Потапова**<sup>1</sup>

**Д. М. Дмитриенко**<sup>1</sup>

**С. В. Студенников**<sup>1</sup>

**А. А. Скрипченко**<sup>1</sup>

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет», г. Воронеж, Российская Федерация

Традиционные способы защиты лесных и озеленительных насаждений от патогенных организмов посредством химических и биологических пестицидов недостаточно эффективны и не соответствуют современным экологическим и социальным требованиям. Актуальна проблема разработки эффективной защиты насаждений древесных пород без применения пестицидов. Цель приведенных исследований – регуляция патогенных процессов в лесных и озеленительных экосистемах на основе экосистемной регуляции патогенных процессов. На основе эколого-генетических исследований разработана модель высоко гетерогенных мозаичных насаждений древесных пород, активизирующая естественные адаптивные процессы в лесных и озеленительных экосистемах. В результате в насаждениях развиваются процессы автоматической регуляции патогенеза, удерживающие плотность патогенных популяций на практически допустимом уровне. Биотическая авторегуляция, понимаемая как внутренний адаптивный процесс биологических систем, способствующий возврату нарушенных биосистем к устойчивому развитию, является одной из важнейших свойств биологических, в частности лесных, систем. Апробация результатов исследований проводилась в условиях юга Среднерусской лесостепи.

**Ключевые слова:** патогенез, защита леса, озеленительные насаждения, пестициды, гетерогенность, модель, апробация.

## ECOSYSTEM REGULATION OF PATHOGENIC PROCESSES IN FORESTS AND GREEN PLANTINGS

DSc (Biology), Professor **Yu. F. Arefev**<sup>1</sup>

DSc (Biology), Professor **P. D. Vengerov**<sup>2</sup>

**A. E. Potapova**<sup>1</sup>

**D. M. Dmitrienko**<sup>1</sup>

**S. V. Studennikov**<sup>1</sup>

**A. A. Skripchenko**<sup>1</sup>

1 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation

2 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Pedagogical University», Voronezh, Russian Federation

### Abstract

Traditional methods of protecting forest and greening plantings from pathogenic organisms by means of chemical and biological pesticides are not sufficiently effective and do not meet modern environmental and social requirements. A pressing problem is the development of effective protection of plantations of tree species without the use of pesticides. The purpose of the above studies is regulation of pathogenic processes in

forest and greening ecosystems based on the ecosystem regulation of pathogenic processes. On the basis of ecological and genetic research, a model of highly heterogeneous mosaic plantings of tree species has been developed, activating natural adaptive processes in forest and landscapers ecosystems. As a result, the processes of automatic regulation of pathogenesis develop in the plantations, keeping the density of pathogenic populations at a practically acceptable level. Biotic autoregulation, understood as an internal adaptive process of biological systems that promotes the return of disturbed biosystems to sustainable development, is one of the most important properties of biological and, in particular, forest systems. Approbation of research results has been carried out in the south of the Central Russian forest-steppe.

**Keywords:** pathogenesis, forest protection, greenery, pesticides, heterogeneity, model, approbation..

Патогенез растений находится под влиянием треугольника: хозяйных растений, патогенных организмов и окружающей среды [1]. В проведенных исследованиях в качестве хозяйных растений доминировали дуб черешчатый (*Quercus robur*) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), в качестве патогенных организмов доминировали мучнистая роса (*Erisiphe alphitoides*) и корневая губка (*Heterobasidion annosum*). Среди параметров окружающей среды изучалось влияние гетерогенности насаждений на их патосостояние (состояние здоровья). Фактор гетерогенности был эффективен в снижении активности исследуемых патогенов через уменьшение их приспособленности (*fitness*). Гетерогенность насаждений формируется на основе специфической композиции древесных пород и структуры насаждений [2]. Сформированные таким образом гетерогенные мозаичные насаждения древесных пород проявляют способность к естественной автоматической регуляции патологических процессов (патогенеза). Нелинейные системы, к которым относятся и лесные экосистемы, могут рассматриваться с позиций адаптивности к изменчивым условиям внешней среды и автоматического управления биосистемой [3, 4].

В качестве естественных адаптивных механизмов экосистемной регуляции патологических процессов в лесных и озеленительных насаждениях древесных пород изучались конкуренция, естественный отбор и инбридинг.

Методология исследований основана на сравнительной оценке жизнеспособности и естественной регенерации гомогенных и высоко гетерогенных насаждений. Основные формулы, использованные для количественных оценок [5]:

$$IH = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

где  $IH$  – индекс гетерогенности,

$i$  – элементы гетерогенности,

$p_i$  – вероятность элементов гетерогенности,

$n$  – число групп исследуемых элементов.

$$D = \frac{\sum(an)}{N} 100 \%, \quad (2)$$

где  $D$  – развитие болезни, %,

$a$  – число учтенных растений соответствующего балла,

$b$  – балл учтенного растения,

$N$  – общее количество учтенных растений.

$$ID_{ph} = \frac{d_1 - d_2}{d_1}, \quad (3)$$

где  $ID_{ph}$  – фенотипический индекс инбридинговой депрессии,

$d_1$  – развитие болезни в открытых насаждениях,

$d_2$  – развитие болезни в экологически изолированных насаждениях.

Лабораторные исследования проводились по стандартным методикам [5, 6, 7], натурные обследования выполнены с учетом микологических и лесоустроительных рекомендаций [8, 9].

*Модельные объекты:* аскомицет *E. alphitoides* (мучнистая роса дуба) и базидиомицет *H. annosum* (корневая губка). Оба патогена являются широко распространенными и экономически значимыми.

Шкала оценки жизнеспособности (*viability*) деревьев и насаждений: 5 – здоровые деревья (без симптомов инфекционных болезней и механических повреждений), 4 – ослабленные деревья (крона изрежена на 10-15 % и (или) тусклая), 3 – деревья больные 1-й степени (возможно восстановление здоровья), 2 – деревья больные 2-й степени (восстановление здоровья маловероятно), 1 – отмирающие деревья (доминируют отмершие ветви, зеленые элементы кроны незначительны), 0 – от-

мершие деревья (признаков жизни нет).

Исследования проводились в насаждениях Учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ, Воронежского биосферного заповедника, Воронежского, Калачеевского, Воронцовского лесничеств (Шипов лес) в период 2008-2017 гг. Экспериментальные насаждения отбирались преимущественно в условиях произрастания  $C_2$ ,  $B_2$ ,  $D_2$ . Возраст насаждений – 10-60 лет в зависимости от характера исследований.

Оценка существенности разности выборочных средних проводилась по  $t$ -критерию при 5 %-м уровне значимости.

### Результаты и их обсуждение

Ключевые результаты проведенных исследований изложены в п. 1-3.

1. Биотическая конкуренция как первичный фактор долговременных изменений в экосистемах древесных пород

В результате межвидовой и внутривидовой конкуренции в лесных экосистемах выживают наиболее приспособленные особи, изменяется рост и развитие древесных растений, формируются условия для естественной регенерации насаждений. Первым этапом в исследовании этого процесса является определение минимальной площади, на которой индекс гетерогенности насаждений стабилизируется (рис. 1).

Минимальная площадь исследуемого насаждения, на которой индекс гетерогенности ( $HH$ ) исследуемого насаждения стабилизируется, равна 0,25 га (рис. 1). Величина этой площади может быть принята в качестве базовой для статистических выборок при проведении экосистемных исследований, в частности при оценке индексов гетерогенности насаждений (табл. 1). Общая гетерогенность спонтанно (в результате естественного зарастания) образованных насаждений в очаге корневой губки (*H. annosum*) более чем в 4 раза выше по сравнению с гетерогенностью монокультур сосны (табл. 1). Доминирующим механизмом спонтанного формирования насаждений является межвидовая конкуренция, как первичный фактор долговременных изменений в экосистеме. В результате преобладали листовенные породы. Спонтанно сформированные в очагах корневой губки высоко гетерогенные насаждения способны к длительному развитию в условиях изменяющейся среды.

Принцип спонтанного развития (*Spontaneous development*) насаждений предполагает естественную регенерацию древесных пород, активацию адаптивных экосистемных механизмов, минимизацию антропогенных факторов в жизни не только лесных, но и озеленительных экосистем. Спонтанный процесс происходит при минимальных внешних

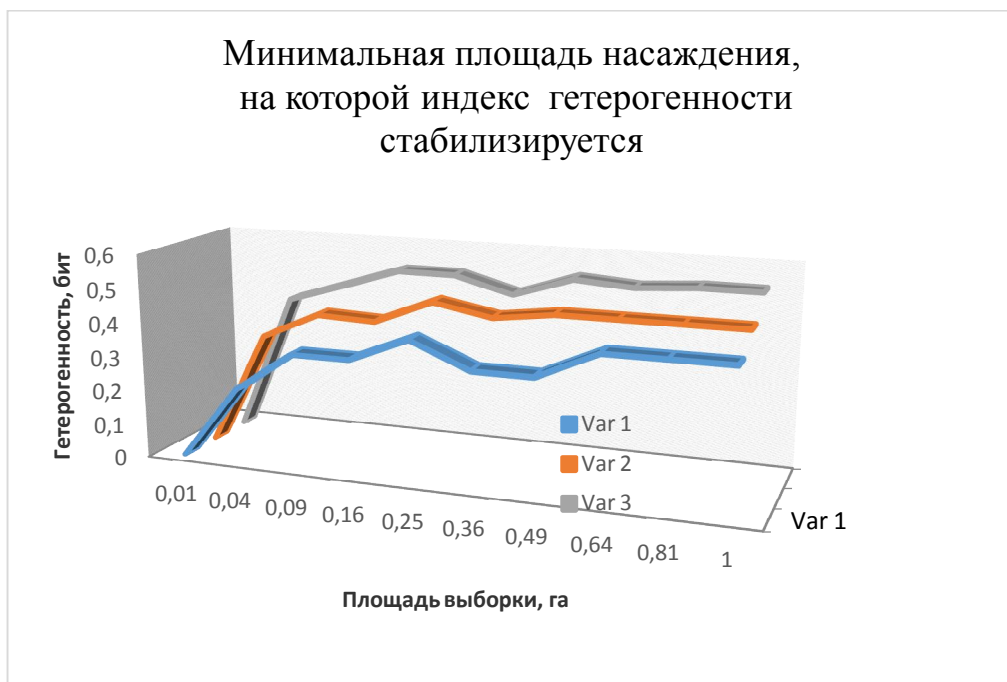


Рис. 1. Динамика индекса гетерогенности насаждения в зависимости от величины выборки

Гетерогенность спонтанно сформированных насаждений в очаге корневой губки (*H. annosum*)  
и в монокультурах сосны (*P. sylvestris*)

Насаждения в очаге корневой губки	Комплексы растений				Общая гетерогенность, бит
	Древо-стой	Под-рост	Под-лесок	Травяной покров	
Спонтанно сформированные насаждения	1,68	1,84	1,91	1,36	6,97
Монокультуры сосны	0,72	0	0	0,92	1,64

затратах (*input*) и использует преимущественно внутренние энергетические возможности. Определяющее значение имеет начальное состояние защищаемого объекта.

2. Естественный отбор как ключевой механизм адаптации биологических популяций через смену генераций.

Поиск ключевых механизмов адаптации в лесных и озеленительных экосистемах древесных пород основан на знании механизмов автохтонных или естественных лесов в относительно сходных экологических условиях. Но задача не сводится к копированию лесных экосистем прошлых эпох. Необходимо понимание стратегий и механизмов спонтанного функционирования природных механизмов биотической регуляции сообществ древесных пород. Одним из важнейших механизмов формирования природных экосистем является естественный отбор по фенотипу. Значение генетической дифференциации не всегда явно [3].

Данный вопрос изучался на примере развития мучнистой росы (*E. alphitoides*) в условиях спонтанно сформированных насаждений дуба черешчатого и в дубовых моно-культурах в Шиповом лесу (табл. 2).

В результате длительного естественного отбора в дубовых насаждениях сформировалась раса, обладающая значительной устойчивостью к мучнистой росе. Морфологически незначительно отличается от среднепопуляционных признаков, но может быть использована для искусственной селекции дуба черешчатого на биорезистентность.

Естественный отбор (*natural selection*), действуя на наследуемые признаки и свойства организмов, способствует выживанию наиболее приспособленных (*most adapted*) особей. Адаптивность даёт популяциям шанс на выживание в постоянно ме-

няющейся окружающей среде. По существу, фенотипическая селекция формирует устойчивые экосистемы древесных пород через смену генераций. Естественный отбор основан на дифференциации выживаемости и репродукции популяций в исследуемых насаждениях.

В зависимости от характера насаждений доминирует в них направленный, дизруптивный (разрывающий) или стабилизирующий естественный отбор.

Направленный естественный отбор, способствующий выживанию более устойчивых к мучнистой росе генотипов дуба черешчатого в лесных и озеленительных экосистемах, может стать эффективным фактором автоматической регуляции патогенеза.

3. Инбридинг как регулятор патогенеза в экосистемах

Инбридинг, являясь результатом сексуального размножения близкородственных особей, обычен в дикой природе и широко используется в селекционной работе. Сущность инбридинга в повышении гомозиготности потомств, что может снижать приспособленность особей, в частности патогенных для древесных растений организмов.

Определялся фенотипический эффект инбридинговой депрессии патогена *E. alphitoides* на экологически изолированных участках площадью ≈ 0,25 га дуба черешчатого. Экологическая изоляция исследуемых участков достигалась мозаичной структурой насаждений. Определялись параметры развития патогена (табл. 3).

Развитие мучнистой росы дуба в экологически изолированных насаждениях более чем в три раза меньше, чем в открытых насаждениях. Данный феномен показывает, что группа патогена в пределах

Таблица 2

Развитие мучнистой росы (*E. alphitoides*) на листьях дуба черешчатого в дубравах естественного происхождения и в монокультурах

Насаждения	Развитие <i>E. alphitoides</i> , %
Дубовые насаждения естественного происхождения	12,7 ± 1,8
Монокультуры дуба черешчатого	83,6 ± 12,3

Таблица 3

Развитие мучнистой росы на листьях дуба черешчатого в открытых и экологически изолированных насаждениях

Насаждения	Развитие болезни, %	Размер конидий, мкм		Параметры клейстотелий	
		Длина	Ширина	Диаметр, мкм	Плотность, n/cm <sup>2</sup>
Открытые насаждения	78	32	18	99	64
Экологически изолированные насаждения	16	24	13	74	8

ограниченного участка ( $\approx 0,25$  га) ослаблена. Об этом же свидетельствуют фрагменты морфологических параметров и фенотипический индекс инбридинговой депрессии ( $ID_{ph} = 0$ ).

Ослабление инфекционного пресса мучнистой росы способствует естественной регенерации дуба в высоко гетерогенных мозаичных насаждениях.

Мозаичная структура экосистем способствует образованию микоризы в защищаемых насаждениях. Среди микоризных грибов доминируют в сосново-берёзовых биогруппах мухоморы (*Amanita muscaria*, *A. panterina*, *A. virosa*), сыроежки (*Russula puellaris*, *R. xerampelina*), в сосновых биогруппах доминируют представители семейства

Gomphidiaceae (*Suillus granularius*, *S. bovinus*, *S. variegatus*, *S. luteus*).

В рядовых монокультурах эти виды грибов встречались спорадически, но плотными группами. Поражаемость насекомыми таких групп грибов всегда очень высокая – 60-95 %. До возраста спороношения такие грибы обычно не доживают.

### Прикладной аспект результатов исследований

В качестве примера приводится схема мозаичного сосново-дубово-берёзового насаждения (рис. 2). Площадь каждого квадрата насаждений  $\approx 0,25$  га. Каждый квадрат с определённой древесной породой был экологическим барьером для смежного квадрата с другой древесной породой.

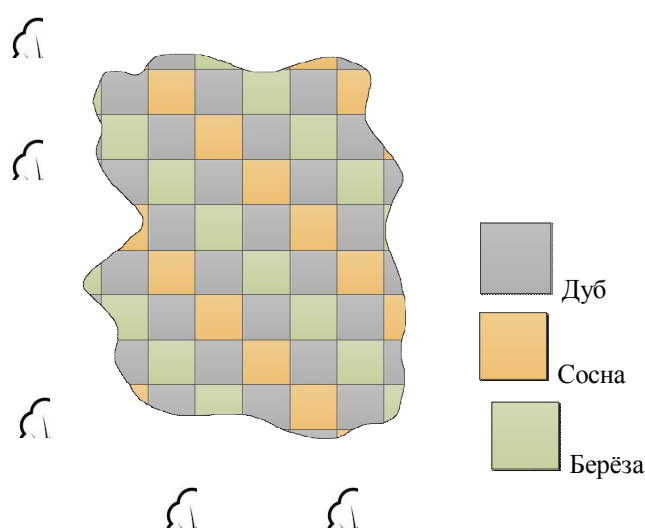


Рис. 2. Схема мозаичного сосново-дубово-берёзового насаждения

## Библиографический список

1. Ван Дер Планк, Дж. Э. Основные принципы анализа экосистем [Текст] / Дж. Э. Ван Дер Планк // Стратегия борьбы с вредителями, болезнями растений и сорняками в будущем. – 1977. – С. 110-138.
2. Теория автоматического управления [Текст]. В 2 ч. Ч. 2 / под ред. А. А. Воронова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 504 с.
3. Вавилов, Н. И. Природа явлений иммунитета у растений [Текст] / Н. И. Вавилов // Избранные труды. – М.-Л., 1964. – Т. IV. – С. 161-266.
4. Acek, S. V. Minimum area of forests left to spontaneous development in protected areas [Text] / S. V. Acek // Journal of forest science. – 2003. – Vol. 49. – No. (8). – P. 349-358.
5. Arefjev, Y. F. Free Choice of the Nature in the Changing World [Text] / Y. F. Arefjev // Universal Journal of Geoscience. – 2017. – Vol. 5(5). – P. 117-137.
6. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication [Text] / C. E. Shannon // The Bell System Technical Journal, 27. – 1948. – P. 379-423, 623-656.
7. Kiraly, Z. Methods in plant pathology [Text] / Z. Kiraly. – Akad. Kiado Budapest, 1974. – 509 p.
8. Webster, J. Introduction to Fungi [Text] / J. Webster. – Cambridge university press, New York, 1980. – 669 p.
9. Kurth, H. Forsteinrichtung [Text] / H. Kurth. – Deutscher Landschaftsverlag, Berlin GmbH, 1993. – 592 p.

## References

1. Van der Planck J. E. *Osnovnye principy analiza jekosistem* [The basic principles of ecosystem analysis] *Strategija bor'by s vrediteljami, boleznyami rastenij i sornjakami v budushhem* [Strategy for the control of pests, plant diseases and weeds in the future]. 1977, pp. 110-138. (In Russian).
2. Voronov A. A. *Teorija avtomaticheskogo upravlenija* [Theory of automatic control]. Moscow, 1986, Part 2, 504 p. (In Russian).
3. Vavilov N. I. *Priroda javlenij immuniteta u rastenij* [The Nature of Immunity Phenomena in Plants] *Izbrannye trudy* [Selected Works]. Moscow.-Leningrad, 1964, Vol. 4, pp. 161-266. (In Russian).
4. Acek S. V. Minimum area of forests left to spontaneous development in protected areas. *Journal of forest science*, 49, 2003 (8), pp. 349-358.
5. Arefjev Y. F. Free Choice of the Nature in the Changing World *Universal Journal of Geoscience*, 2017, Vol. 5(5), pp. 117-137.
6. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27 – 1948, pp. 379-423, 623-656.
7. Kiraly Z. *Methods in plant pathology*. Akad. Kiado Budapest, 1974, 509 p.
8. Webster J. *Introduction to Fungi*. Cambridge university press, New York, 1980, 669 p.
9. Kurth H. *Forsteinrichtung*. Deutscher Landschaftsverlag, Berlin GmbH, 1993, 592 p.

## Сведения об авторах

*Арефьев Юрий Фёдорович* – профессор кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор биологических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: arefjev@voronezh.net.

*Венгеров Петр Дмитриевич* – профессор кафедры биологии растений и животных ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет», доктор биологических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: forest.vrn@gmail.com.

*Потапова Анна Евгеньевна* – магистрант 2-го года обучения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: smeharik-95@mail.ru.

*Дмитриенко Дмитрий Михайлович* – магистрант 2-го года обучения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация;

e-mail: dmitry.dmitrienko36@yandex.ru.

*Студенников Сергей Владимирович* – магистрант 2-го года обучения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Studennikov1995@yandex.ru.

*Скрипченко Алексей Александрович* – магистрант 2-го года обучения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: skripchenko.aleksej@yandex.ru.

### Information about authors

*Arefev Yuri Fedorovich* – Professor, Department of ecology, forest protection and forest hunting management of FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc (Biology), Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: arefjev@voronezh.net

*Vengerov Petr Dmitrievich* – Professor Department of plant and animal biology of FSBEI HE «Voronezh State Pedagogical University», DSc (Biology), Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: forest.vrn@gmail.com.

*Potapova Anna Evgenievna* – 2nd year masters student, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: smeharik-95@mail.ru.

*Dmitrienko Dmitry Mikhailovich* – 2nd year masters student, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: dmitry.dmitrienko36@yandex.ru.

*Studennikov Sergey Vladimirovich* – 2nd year masters student, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: Studennikov1995@yandex.ru.

*Skripchenko Alexey Alexandrovich* – 2nd year masters student, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: skripchenko.aleksej@yandex.ru.