

Научная статья/Research Article

УДК 579.64

DOI: 10.36718/1819-4036-2024-4-36-45

Сергей Витальевич Хижняк¹, Полина Александровна Аболенцева²,
Софья Владимировна Овсянкина^{3✉}, Анатолий Николаевич Халипский⁴,
Ангелина Николаевна Литовченко⁵, Ирина Сергеевна Коротченко⁶,
Олеся Владиславовна Злотникова⁷, Ольга Владимировна Романова⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8}Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

¹skhizhnyak@yandex.ru

²polina18.ti@gmail.com

³sofi-kras@mail.ru

⁴halipskiy@mail.ru

⁵kevin.nayt@mail.ru

⁶kisaspi@mail.ru

⁷zlotnik-ecol@list.ru

⁸romikanus71@mail.ru

МНОГОМЕРНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРИ ВЫБОРЕ ШТАММОВ-АНТАГОНИСТОВ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ ОТ БОЛЕЗНЕЙ

Цель исследования – демонстрация возможностей многомерных статистических методов для сокращения трудоемкости выбора штаммов-антагонистов для биологической защиты сельскохозяйственных растений от болезней на примере поиска штаммов-антагонистов против грибных болезней рапса (*Brassica napus*). Методом встречных культур была изучена антибиотическая активность 9 штаммов *Bacillus* spp. и 1 штамма *Streptomyces hygrosopicus* в отношении 9 штаммов *Fusarium* spp., 2 штаммов *Alternaria* spp. и 2 штаммов *Sclerotinia sclerotiorum*, являющихся возбудителями грибных болезней рапса. В качестве показателя использована ширина зоны подавления роста. Методами дискриминантного анализа установлено, что штаммы бактерий-антагонистов статистически значимо ($p < 0,001$) различаются по спектру антибиотической активности в отношении фитопатогенных грибов, а штаммы фитопатогенных грибов, в свою очередь, статистически значимо ($p < 0,001$) различаются по спектру чувствительности к штаммам бактерий-антагонистов. Была построена матрица корреляций между чувствительностью разных штаммов фитопатогенных грибов к набору штаммов-антагонистов. Факторный анализ этой матрицы корреляций показал, что варьирование набора изученных штаммов фитопатогенных грибов по чувствительности к набору штаммов-антагонистов на 80,3 % объясняется действием двух факторов с собственными значениями выше 1. На основе факторных нагрузок был сделан вывод, что фактор 1 представляет собой антибиотические вещества, активные в отношении *Fusarium* spp., а фактор 2 – антибиотические вещества, активные в отношении *Alternaria* spp. и *S. sclerotiorum*. Это позволило сократить число тест-культур для поиска будущих антагонистов до 2 штаммов фитопатогенных грибов, имеющих максимальные факторные нагрузки соответственно по фактору 1 и фактору 2. Это также позволило оптимизировать комбинирование штаммов-антагонистов для создания будущих био-препаратов, комбинируя штаммы с максимальным значением фактора 1 со штаммами с максимальным значением фактора 2.

Ключевые слова: *Brassica napus*, грибные болезни, *Fusarium* spp., *Alternaria* spp., *Sclerotinia sclerotiorum*, биологическая защита, штаммы-антагонисты

© Хижняк С.В., Аболенцева П.А., Овсянкина С.В., Халипский А.Н., Литовченко А.Н., Коротченко И.С., Злотникова О.В., Романова О.В., 2024

Вестник КрасГАУ. 2024. № 4. С. 36–45.

Bulliten KrasSAU. 2024;(4):36–45.

Для цитирования: Многомерные статистические методы как инструмент при выборе штаммов-антагонистов для биологической защиты растений от болезней / С.В. Хижняк [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2024. № 4. С. 36–45. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-4-36-45.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках выполнения научных исследований и разработок по проекту № 2023030309439 «Разработка биопрепарата для защиты рапса от грибных болезней и стимулирования роста рапса в почвенно-климатических условиях Красноярского края».

Sergey Vitalievich Khizhnyak¹, Polina Aleksandrovna Aboletseva²,
Sofya Vladimirovna Ovsyankina³✉, Anatoly Nikolaevich Khalipsky⁴,
Angelina Nikolaevna Litovchenko⁵, Irina Sergeevna Korotchenko⁶,
Olesya Vladislavovna Zlotnikova⁷, Olga Vladimirovna Romanova⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8}Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

¹skhizhnyak@yandex.ru

²polina18.ti@gmail.com

³sofi-kras@mail.ru

⁴halipskiy@mail.ru

⁵kevin.nayt@mail.ru

⁶kisaspi@mail.ru

⁷zlotnik-ecol@list.ru

⁸romikanus71@mail.ru

MULTIVARIATE STATISTICAL METHODS AS A TOOL IN THE SELECTION OF ANTAGONIST STRAINS FOR BIOLOGICAL CONTROL OF PLANT DISEASES

*The purpose of the study is to demonstrate the capabilities of multivariate statistical methods for reducing the labor intensity of selecting antagonist strains for biological protection of agricultural plants from diseases using the example of searching for antagonist strains against fungal diseases of rapeseed (*Brassica napus*). The antibiotic activity of 9 strains of *Bacillus* spp was studied using the counter culture method and 1 strain of *Streptomyces hygroscopicus* against 9 strains of *Fusarium* spp., 2 strains of *Alternaria* spp. and 2 strains of *Sclerotinia sclerotiorum*, which are causative agents of fungal diseases of rapeseed. The width of the growth inhibition zone was used as an indicator. Using discriminant analysis methods, it was established that strains of antagonist bacteria differ statistically significantly ($p < 0.001$) in the spectrum of antibiotic activity against phytopathogenic fungi, and strains of phytopathogenic fungi, in turn, differ statistically significantly ($p < 0.001$) in the spectrum of sensitivity to bacterial strains -antagonists. A matrix of correlations was constructed between the sensitivity of different strains of phytopathogenic fungi to a set of antagonist strains. Factor analysis of this correlation matrix showed that the variation in the set of studied strains of phytopathogenic fungi in sensitivity to a set of antagonist strains is 80.3 % explained by the action of two factors with eigenvalues above 1. Based on the factor loadings, it was concluded that factor 1 represents antibiotic substances active against *Fusarium* spp., and factor 2 represents antibiotic substances active against *Alternaria* spp. and *S. sclerotiorum*. This made it possible to reduce the number of test cultures for the search for future antagonists to 2 strains of phytopathogenic fungi, which have maximum factor loadings for factor 1 and factor 2, respectively. This also made it possible to optimize the combination of antagonist strains for the creation of future biological products, combining strains with the maximum value of factor 1 with strains with a maximum factor value of 2.*

Keywords: *Brassica napus*, fungal diseases, *Fusarium* spp., *Alternaria* spp., *Sclerotinia sclerotiorum*, biological protection, antagonist strains

For citation: Multivariate statistical methods as a tool in the selection of antagonist strains for biological control of plant diseases / S.V. Khizhnyak [et al.] // Bulliten KrasSAU. 2024;(4): 36–45 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-4-36-45.

Acknowledgments: the work has been financially supported by the Krasnoyarsk Regional State Autonomous Institution "Krasnoyarsk Regional Fund for the Support of Scientific and Scientific and Technical Activities" as part of research and development under project № 2023030309439 "Development of a biological product to protect rapeseed from fungal diseases and stimulate the growth of rapeseed in soil and climatic conditions of the Krasnoyarsk Region".

Введение. Одним из наиболее перспективных направлений в защите растений от болезней в настоящее время является биологический метод, основанный на интродукции в ризосферу или филлосферу штаммов, проявляющих антагонизм в отношении возбудителей болезней [1]. При сопоставимой с химическими препаратами цене и эффективности, биопрепараты на основе штаммов-антагонистов являются безопасными для окружающей среды и здоровья человека, а также снижают вероятность появления резистентности у фитопатогенных микроорганизмов. Главным препятствием к широкому распространению биологического метода в растениеводстве является крайне ограниченная номенклатура коммерческих биопрепаратов, связанная в первую очередь с недостаточным числом эффективных штаммов-антагонистов. В этой связи поиск таких штаммов, а также их комбинаций, является в высшей степени актуальной задачей [2]. Поскольку поиск штаммов-антагонистов для биологической защиты растений от болезней начинается с лабораторной оценки их антибиотической активности в отношении фитопатоген-

ных микроорганизмов, встает проблема выбора тест-культур для проведения такой оценки. Предназначенный для использования в биопрепарате штамм-антагонист должен защищать растение от широкого спектра таксономически различающихся возбудителей. Однако проверка потенциальных штаммов-антагонистов на всем наборе возбудителей болезней соответствующей сельскохозяйственной культуры является трудоемкой задачей.

Цель исследования – демонстрация возможностей многомерных статистических методов для сокращения трудоемкости выбора штаммов-антагонистов для биологической защиты сельскохозяйственных растений от болезней на примере поиска штаммов-антагонистов против грибных болезней рапса (*Brassica napus*).

Объекты и методы. Объектами исследования служили 9 штаммов р. *Bacillus* и 1 штамм р. *Streptomyces*, выделенные авторами из сельскохозяйственных почв Красноярского края и на этапе предварительных исследований проявивших антибиотическую активность в отношении грибов (табл. 1).

Таблица 1

Штаммы-антагонисты, использованные в работе

Штамм	Таксономическая принадлежность	Метод идентификации
RSA1	<i>Bacillus atrophaeus</i>	По нуклеотидной последовательности гена 16S рРНК
RSA8	<i>Bacillus atrophaeus</i>	MALDI-TOF масс-спектрометрия
RSA13	<i>Streptomyces hygroscopicus</i>	По нуклеотидной последовательности гена 16S рРНК
RSA16(1)	<i>Bacillus atrophaeus</i>	MALDI-TOF масс-спектрометрия
RSA16(2)	<i>Bacillus atrophaeus</i>	MALDI-TOF масс-спектрометрия
CX5	<i>Bacillus cereus</i>	MALDI-TOF масс-спектрометрия
АЛ3	<i>Bacillus cereus</i>	MALDI-TOF масс-спектрометрия
Pa1	<i>Bacillus</i> sp.	Культурально-морфологический
Pa2	<i>Bacillus</i> sp.	Культурально-морфологический
Pa3	<i>Bacillus</i> sp.	Культурально-морфологический

В качестве тест-культур использованы 9 различающихся по культурально-морфологическим признакам представителей р. *Fusarium* (штаммы P1, P2, P4, P6, P12, P13, P22(1), P22(2), P32), 2 представителя р. *Alternaria* (штамм P31 – *Alternaria* sp., P33 – *A. japonica*) и 2 представи-

теля вида *Sclerotinia sclerotiorum* (штаммы P17 и P23). Все тест-культуры выделены авторами из семян и пораженных грибными болезнями растений ярового рапса, возделываемого в Красноярском крае, и идентифицированы по культурально-морфологическим признакам.

Оценку антибиотической активности штаммов-антагонистов в отношении тест-культур проводили методом встречных культур по ширине зоны подавления роста в трехкратной повторности после 10 суток инкубирования при температуре 25 ± 1 °С. В качестве питательной среды использовали среду № 2 ГРМ (Сабуро) производства ФБУН ГНЦ ПМБ, разведенную в 2 раза и дополненную агаром до 20 г/л. Ранее нами было показано, что подобная среда хорошо поддерживает рост как бактериальных штаммов-антагонистов р.р. *Bacillus* и *Streptomyces*, так и фитопатогенных грибов [3].

Для анализа сходства реакции тест-культур на набор штаммов-антагонистов использовали корреляционный анализ с последующим факторным анализом матрицы корреляций. При выделении значимых факторов использовали критерий Кайзера [4], который является одним из самых популярных, если не самым популярным, в современной научной литературе [5]. Согласно этому критерию считаются значимыми и принимаются к рассмотрению факторы с собственным значением больше 1. Для сравнения тест-культур по чувствительности к штаммам-антагонистам использовали двухфакторный дисперсионный анализ, где в качестве факторов

выступали штамм антагониста и штамм тест-культуры. Для изучения влияния таксономической принадлежности тест-культур на их чувствительность к штаммам-антагонистам использовали однофакторный дисперсионный анализ, где в качестве фактора выступала родовая принадлежность тест-культуры, с последующим попарным сравнением чувствительности родов с помощью рекомендуемых в современной литературе *post-hoc* тестов Тьюки (Tukey HSD test) и Шеффе (Scheffe's S test) [6]. Для сравнения штаммов тест-культур по чувствительности к набору штаммов-антагонистов, а также для сравнения штаммов-антагонистов по спектру активности в отношении тест-культур использовали дискриминантный анализ.

Результаты и их обсуждение. В зависимости от штамма-антагониста и тест-культуры средние по повторностям зоны подавления роста фитопатогенных грибов варьировали от 0 до 28 мм. Следует отметить, что даже при отсутствии выраженной зоны подавления роста, при контакте со штаммами-антагонистами рост тест-культур прекращался. Таким образом, даже в случаях, если ширина зоны подавления была 0 мм, говорить об отсутствии антагонизма нельзя (рис. 1).

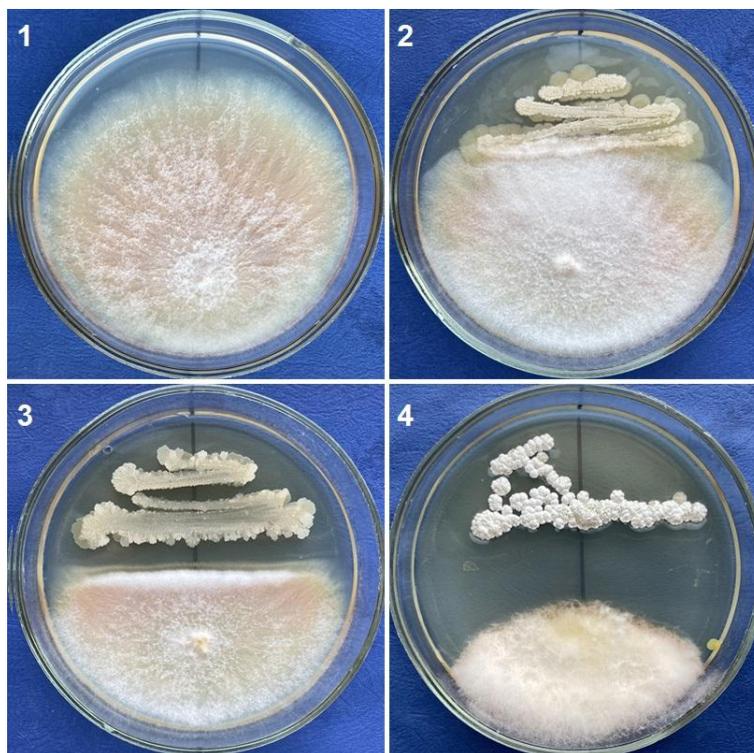


Рис. 1. Примеры зон подавления роста возбудителей грибных болезней рапса штаммами-антагонистами: 1 – контроль без антагонистов; 2 – штамм-антагонист Pa3; 3 – штамм-антагонист RSA1; 4 – штамм-антагонист RSA13; 1, 2, 3 – тест-культура P6 (*Fusarium* sp.), 4 – тест-культура P2 (*Fusarium* sp.)

Двухфакторный дисперсионный анализ подтвердил, что антагонистический эффект статистически значимо ($p < 0,001$) зависит как от штамма-антагониста, так и от индивидуальных особенностей штамма фитопатогенного гриба, используемого в качестве тест-культуры. Кроме этого, выявился статистически значимый ($p < 0,001$) эффект взаимодействия факторов «Штамм-антагонист × Штамм фитопатогена». При этом основны-

ми источниками варьирования размеров зоны подавления являются особенности штамма фитопатогенного гриба (соответствующий показатель силы влияния составляет 48,08 %). Показатель силы влияния фактора «Штамм-антагонист» составил 18,35 %, показатель силы влияния взаимодействия «Штамм-антагонист × Штамм фитопатогена» составил 27,66 % (табл. 2).

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа влияния штамма-антагониста и штамма фитопатогенного гриба на размер зоны подавления роста

Источник вариации	Показатель силы влияния, %	Статистическая значимость эффекта, p
Штамм-антагонист	18,35	0,000000
Штамм фитопатогена	48,08	0,000000
Штамм-антагонист × Штамм фитопатогена	27,66	0,000000
Случайное варьирование	5,90	

Эффект взаимодействия факторов «Штамм-антагонист × Штамм фитопатогена» проявился в том, что спектр антагонистической активности у разных штаммов-антагонистов различался. Так, например, штамм-антагонист СХ5 проявил высокую активность в отношении фитопатогенного штамма Р1 (зона подавления роста 8,0 мм), однако не показал существенного эффекта в отношении фитопатогенного штамма

Р17 (зона подавления роста 0,0 мм). В противоположность этому штамм-антагонист АЛ3 проявил высокую активность в отношении фитопатогенного штамма Р17 (зона подавления роста 8,0 мм), однако показал существенно более слабый эффект в отношении фитопатогенного штамма Р1 (зона подавления роста 5,3 мм) (табл. 3).

Таблица 3

Средние зоны подавления роста у различных штаммов фитопатогенных грибов в присутствии разных штаммов-антагонистов, мм

Штамм	RSA1	RSA8	RSA13	RSA16 (1)	RSA16 (2)	CX5	АЛ3	Pa1	Pa2	Pa3
P1	6,0	5,7	24,0	4,3	5,0	8,0	5,3	4,3	2,3	4,3
P2	4,7	4,3	25,0	4,0	5,7	3,0	3,7	3,3	0,0	0,0
P4	3,7	3,7	0,0	5,0	3,7	6,0	2,7	4,7	0,0	0,0
P6	4,3	4,3	8,7	3,7	4,0	3,0	3,0	4,0	0,0	0,0
P12	4,3	3,0	5,7	1,7	2,3	3,0	2,7	5,3	0,0	0,0
P13	4,3	2,7	16,0	3,7	4,0	3,7	3,0	5,7	0,0	0,0
P17	5,7	5,7	17,7	5,0	2,0	0,0	8,7	0,0	0,0	0,0
P22(1)	3,0	1,7	10,0	6,7	3,0	5,3	3,3	4,0	0,0	0,0
P22(2)	4,0	4,3	5,7	5,0	2,3	5,7	4,0	6,0	0,0	0,0
P23	6,7	5,3	2,7	4,0	2,0	0,0	8,0	0,0	0,0	1,7
P32	13,7	12,3	25,0	12,0	25,0	14,7	11,3	17,0	0,0	5,0
P31	11,3	25,0	19,3	12,3	24,3	8,3	28,0	8,0	22,0	25,0
P33	16,0	13,0	31,0	12,3	17,7	6,7	20,0	6,3	9,0	13,3

Наблюдаемые различия в спектрах антифунгальной активности изучаемых штаммов свидетельствуют о том, что антифунгальный эффект

штаммов-антагонистов обусловлен не одним антибиотическим веществом, а набором веществ, обладающих разным спектром антигриб-

ной активности. При этом, судя по различиям в спектрах антифунгальной активности штаммов-антагонистов и различиям в размерах зон подавления роста (см. табл. 3), состав упомянутого набора, равно как и интенсивность продукции разных компонентов этого набора, у разных штаммов различается.

В целом по вариантам штаммов-антагонистов и тест-культур наиболее чувствительными к действию антагонистов оказались представители р. *Alternaria*. Согласно всем post-hoc тестам, средняя по повторностям и штаммам-антагонистам зона подавления роста у *Alternaria* spp. ($16,45 \pm 1,51$ мм) была статистически значимо ($p < 0,001$) больше, чем у *Fusarium* spp. ($5,20 \pm 0,71$ мм) и у *S. sclerotiorum* ($3,75 \pm 1,51$ мм), в то

время как между *Fusarium* spp. и *S. sclerotiorum* статистически значимые различия по этому показателю отсутствовали.

Дискриминантный анализ подтвердил, что штаммы-антагонисты статистически значимо ($p < 0,001$) различаются по спектру антигрибной активности, а фитопатогены, в свою очередь, статистически значимо ($p < 0,001$) различаются по спектру чувствительности к штаммам-антагонистам. При этом наблюдается статистически значимая ($p < 0,001$) группировка штаммов фитопатогенов по спектру чувствительности к штаммам-антагонистам в соответствии с таксономической принадлежностью фитопатогенов (табл. 4, рис. 2).

Таблица 4

Статистическая значимость (p) различий между тест-культурами разной таксономической принадлежности по спектру чувствительности к штаммам-антагонистам по результатам дискриминантного анализа

	<i>Fusarium</i> spp.	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	<i>Alternaria</i> spp.
<i>Fusarium</i> spp.		0,000001	0,000000
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	0,000001		0,000000
<i>Alternaria</i> spp.	0,000000	0,000000	

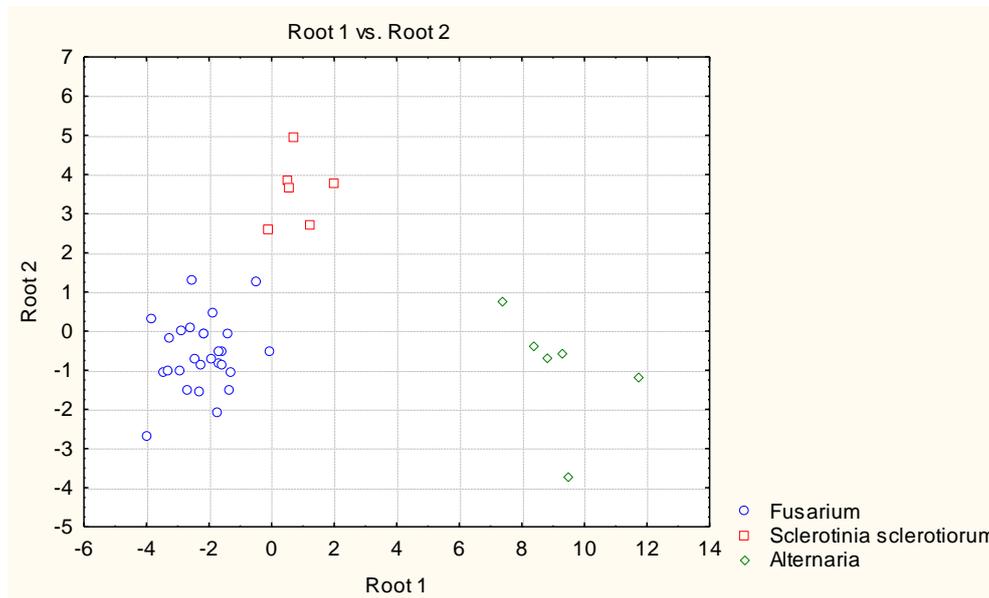


Рис. 2. Проекция штаммов фитопатогенов в соответствии с их таксономической принадлежностью на первые две канонические переменные по спектру чувствительности к штаммам-антагонистам; каждая точка соответствует отдельному измерению для отдельного штамма фитопатогена

Столь ярко выраженные различия как между штаммами фитопатогенных грибов по спектру чувствительности к штаммам-антагонистам, так

и между штаммами-антагонистами по спектру антибиотической активности в отношении фитопатогенных грибов, ставят вопрос о выборе кон-

кретных штаммов фитопатогенов в качестве тест-культур для дальнейшего выявления и оценки штаммов-антагонистов. Для ответа на этот вопрос нами был использован факторный анализ матрицы корреляций чувствительности штаммов фитопатогенных грибов к набору штаммов-антагонистов, в качестве исходных данных для корреляционного анализа исполь-

зованы данные таблицы 3. Поскольку включение в обработку штамма RSA13 порождало «ложные корреляции» (рис. 3), он был исключен из анализа.

Результирующая матрица корреляций представлена в таблице 5, в таблице 6 представлены результаты факторного анализа этой матрицы.

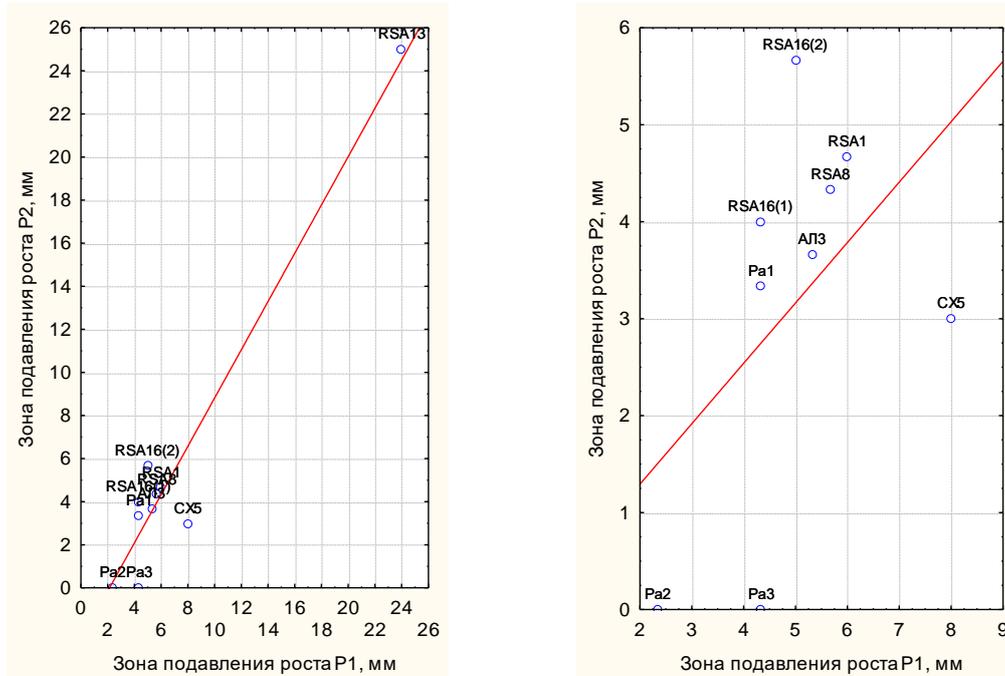


Рис. 3. Пример ложной корреляции: высокий ($r = 0,968$) коэффициент корреляции между реакцией двух штаммов фитопатогенных грибов на набор штаммов-антагонистов вызван тем, что оба фитопатогенных гриба высокочувствительны к действию штамма-антагониста RSA13; исключение данного штамма из обработки приводит к резкому падению коэффициента корреляции до $r = 0,488$

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между зонами отсутствия роста у разных штаммов фитопатогенных грибов после исключения из обработки штамма RSA13

	P1	P2	P4	P6	P12	P13	P17	P22 (1)	P22 (2)	P23	P32
P2	0,49	1,00	0,72	0,95	0,66	0,80	0,54	0,58	0,64	0,47	0,86
P4	0,68	0,72	1,00	0,82	0,71	0,86	0,16	0,89	0,93	0,05	0,71
P6	0,52	0,95	0,82	1,00	0,82	0,89	0,49	0,64	0,81	0,42	0,80
P12	0,49	0,66	0,71	0,82	1,00	0,91	0,23	0,48	0,82	0,21	0,64
P13	0,46	0,80	0,86	0,89	0,91	1,00	0,22	0,74	0,86	0,15	0,82
P17	0,20	0,54	0,16	0,49	0,23	0,22	1,00	0,23	0,30	0,97	0,12
P22(1)	0,48	0,58	0,89	0,64	0,48	0,74	0,23	1,00	0,83	0,10	0,54
P22(2)	0,61	0,64	0,93	0,81	0,82	0,86	0,30	0,83	1,00	0,18	0,56
P23	0,21	0,47	0,05	0,42	0,21	0,15	0,97	0,10	0,18	1,00	0,07
P32	0,49	0,86	0,71	0,80	0,64	0,82	0,12	0,54	0,56	0,07	1,00
P31	-0,33	-0,16	-0,66	-0,36	-0,56	-0,61	0,31	-0,64	-0,64	0,34	-0,23
P33	0,03	0,41	-0,21	0,19	-0,10	-0,04	0,73	-0,12	-0,22	0,79	0,21

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, статистически значимые на уровне $p < 0,05$.

Обращает на себя внимание тот факт, что статистически значимые корреляции по чувствительности к набору штаммов-антагонистов наблюдаются далеко не у всех тест-культур фитопатогенных грибов. Так, например, штаммы P17 и P23 (оба – представители вида *S. sclerotiorum*) демонстрируют очень высокое сходство реакции на набор изучаемых штаммов (коэффициент корреляции $r = 0,97$), однако статистически значимые корреляции со штаммами, представляющими р. *Fusarium*, по реакции на штаммы-антагонисты у них отсутствуют. Реак-

ция штамма P13 (р. *Fusarium*) на набор штаммов-антагонистов хорошо коррелирует с реакцией других штаммов того же рода (коэффициенты корреляции от 0,74 до 0,91), однако не коррелирует с реакцией представителей р. *Sclerotinia* и *Alternaria*. Все это подтверждает наличие у исследуемых антагонистов набора антифунгальных соединений, специфически нацеленных против разных таксономических групп грибов. Этот же вывод подтверждается факторным анализом корреляционной матрицы (табл. 6).

Таблица 6

Факторные нагрузки по результатам факторного анализа корреляционной матрицы, представленной в таблице 5

Штамм фитопатогена	Без вращения		Варимаксное вращение	
	Factor 1	Factor 2	Factor 1	Factor 2
P1 (Fus)	-0,653	-0,009	0,646	0,095
P2 (Fus)	-0,869	0,362	0,800	0,496
P4 (Fus)	-0,936	-0,250	0,964	-0,097
P6(Fus)	-0,944	0,193	0,901	0,342
P12 (Fus)	-0,852	-0,096	0,856	0,041
P13 (Fus)	-0,949	-0,116	0,955	0,037
P17 (Scl)	-0,372	0,844	0,232	0,892
P22(1) (Fus)	-0,806	-0,198	0,827	-0,067
P22(2) (Fus)	-0,918	-0,186	0,935	-0,037
P23 (Scl)	-0,292	0,883	0,147	0,918
P32 (Fus)	-0,796	0,056	0,777	0,182
P31 (Alt)	0,548	0,708	-0,654	0,611
P33(Alt)	-0,040	0,947	-0,112	0,941
Собственное значение	7,226	3,219	7,123	3,322
% вариации	55,6	24,8	54,8	25,6

Примечание: факторные нагрузки больше 0,70 выделены жирным шрифтом.

Как видно из представленных данных, после исключения из обработки штамма RSA13 варьирование изученных штаммов фитопатогенных грибов по чувствительности к штаммам-антагонистам на 80,3 % объясняется действием двух факторов с собственными значениями выше 1. При этом на основе факторных нагрузок (см. табл. 6) первый фактор можно интерпретировать как антибиотические вещества, эффективные против *Fusarium* spp., а второй – как антибиотические вещества, эффективные против *S. sclerotiorum* и *Alternaria* spp.

Распределение штаммов по величине первого и второго факторов представлено на рисунке 4.

Как видно из представленных на рисунке 4 данных, ни один из протестированных штаммов-антагонистов не является максимально эффективным одновременно по Factor 1 и Factor 2. Это говорит о том, что ни один из изученных штаммов-антагонистов не продуцирует в достаточном количестве весь спектр антибиотических веществ, эффективных против всего набора тест-культур фитопатогенных грибов.

Однако использование этих штаммов в комбинациях позволяет преодолеть данный недостаток. Так, на основе рисунка 4 можно предложить комбинацию штаммов СХ5+Pa1 (у обоих – максимальная эффективность по Factor 1) и АЛЗ (максимальная эффективность по Factor 2).

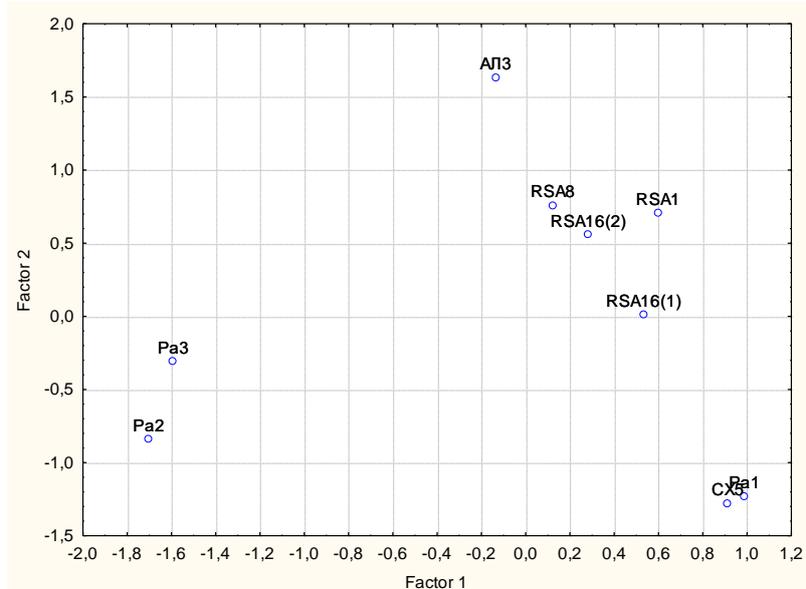


Рис. 4. Проекция штаммов на первые два главных фактора (использовано варимаксное вращение, см. табл. 6)

Использование результатов факторного анализа позволило сократить число тест-культур, используемых для тестирования штаммов-антагонистов, выделяемых в дальнейшем. Так, для оценки штаммов-антагонистов по величине первого антигрибного фактора достаточно использовать одну тест-культуру с высокой по абсолютному значению факторной нагрузкой (что эквивалентно высокой чувствительности) по Factor 1, а для оценки штаммов-антагонистов по величине второго антигрибного фактора достаточно использовать одну тест-культуру с высокой по абсолютному значению факторной нагрузкой по Factor 2.

Заключение

1. При массовом скрининге штаммов-антагонистов против набора таксономически и биологически различающихся штаммов фитопатогенных грибов использование методов многомерной статистики позволяет резко сократить объем работы, выбрав на основе предварительных исследований в качестве тест-культур наиболее типичные штаммы фитопатогенов.

2. В случае разнообразия видового состава возбудителей грибных болезней культуры, для защиты которой предполагается разработка биопрепарата, целесообразно создавать комплексный препарат на основе набора штаммов-антагонистов, имеющих разный спектр антигрибной активности.

Список источников

1. Microbial interactions within multiple-strain biological control agents impact soil-borne plant disease / B. Niu [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. P. 585404.
2. Microbial Consortia for Plant Protection against Diseases: More than the Sum of Its Parts / T. Maciag [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, №. 15. P. 12227.
3. Почвенные микробные сообщества как источник штаммов для биологической защиты сои от фузариоза в Приенисейской Сибири / С.А. Родовиков [и др.] // *Вестник Нижневартовского государственного университета*. 2020. № 2. С. 4–11. DOI: 10.36906/2311-4444/20-2/01.
4. Kaiser H.F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis // *Educational and Psychological Measurement*. 1960. 20 (1). P. 141–151.
5. Hayton J.C., Allen D.G., Scaprelo V. Factor Retention Decisions in Exploratory Factor Analysis: A Tutorial on Parallel Analysis // *Organizational Research Methods*. 2004. Vol. 7. № 2. P. 191–205.
6. Comparing multiple comparisons: practical guidance for choosing the best multiple comparisons test / S. Midway [и др.] // *Bioinformatics and Genomics*. 2020. DOI: 10.7717/peerj.10387.

References

1. Microbial interactions within multiple-strain biological control agents impact soil-borne plant disease / *B. Niu* [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. P. 585404.
2. Microbial Consortia for Plant Protection against Diseases: More than the Sum of Its Parts / *T. Maciag* [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, №. 15. P. 12227.
3. Pochvennye mikrobnye soobshchestva kak istochnik shtammov dlya biologicheskoy zaschity soi ot fuzarioza v Prienisejskoj Sibiri / *S.A. Rodovikov* [i dr.] // *Vestnik Nizhnevar-tovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020. № 2. S. 4–11. DOI: 10.36906/2311-4444/20-2/01.
4. *Kaiser H.F.* The Application of Electronic Computers to Factor Analysis // *Educational and Psychological Measurement*. 1960. 20 (1). P. 141–151.
5. *Hayton J.C., Allen D.G., Scaprello V.* Factor Retention Decisions in Exploratory Factor Analysis: A Tutorial on Parallel Analysis // *Organizational Research Methods*. 2004. Vol. 7. № 2. P. 191–205.
6. Comparing multiple comparisons: practical guidance for choosing the best multiple comparisons test / *S. Midway* [и др.] // *Bioinformatics and Genomics*. 2020. DOI: 10.7717/peerj.10387.

Статья принята к публикации 04.12.2023 / The article accepted for publication 04.12.2023.

Информация об авторах:

Сергей Витальевич Хижняк¹, профессор кафедры экологии и природопользования, доктор биологических наук, доцент

Полина Александровна Аболенцева², научный сотрудник лаборатории селекции и оригинального семеноводства

Софья Владимировна Овсянкина³, заведующая межкафедральной научно-инновационной лабораторией сельскохозяйственных и экологической биотехнологии, кандидат биологических наук

Анатолий Николаевич Халипский⁴, профессор, заведующий кафедрой растениеводства, селекции и семеноводства, доктор биологических наук, доцент

Ангелина Николаевна Литовченко⁵, студентка 4-го курса

Ирина Сергеевна Коротченко⁶, заведующая кафедрой экологии и природопользования, кандидат биологических наук, доцент

Олеся Владиславовна Злотникова⁷, доцент кафедры экологии и природопользования, кандидат биологических наук, доцент

Ольга Владимировна Романова⁸, доцент кафедры экологии и природопользования, кандидат сельскохозяйственных наук

Information about the authors:

Sergey Vitalievich Khizhnyak¹, Professor at the Department of Ecology and Environmental Management, Doctor of Biological Sciences, Docent

Polina Aleksandrovna Abolentseva², Researcher, Laboratory of Breeding and Original Seed Production

Sofya Vladimirovna Ovsyankina³, Head of the Interdepartmental Research and Innovation Laboratory of Agricultural and Environmental Biotechnology, Candidate of Biological Sciences

Anatoly Nikolaevich Khalipsky⁴, Professor, Head of the Department of Plant Growing, Selection and Seed Production, Doctor of Biological Sciences, Docent

Angelina Nikolaevna Litovchenko⁵, 4th year student

Irina Sergeevna Korotchenko⁶, Head of the Department of Ecology and Environmental Management, Candidate of Biological Sciences, Docent

Olesya Vladislavovna Zlotnikova⁷, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Management, Candidate of Biological Sciences, Docent

Olga Vladimirovna Romanova⁸, Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Management, Candidate of Agricultural Sciences