ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 547.79+632.952
https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-4-284-291

Поступила в редакцию 11.08.2026
Received 11.08.2026

В. А. Будевич[1], Ю. А. Сущевич[2], А. В. Зураев[3]

[1]Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
[2]Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по земледелию, Жодино, Беларусь
[3]Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МЕЗОИОННЫХ ТЕТРАЗОЛИЙ-5-АМИНИДОВ А-ТИПА ПРОТИВ НЕКОТОРЫХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БОЛЕЗНЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

Аннотация. Проведена оценка биологической активности пяти мезоионных тетразолий-5-аминидов (**3–7**) А-типа против возбудителей болезней сельскохозяйственных растений, таких как *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Alternaria alternata*, *Colletotrichum lupini*. Исследования выполняли в лабораторных условиях на картофельно-глюкозном агаре с добавлением указанных соединений непосредственно в питательную среду в концентрации 0,3 мг/мл. Учет площади колоний, морфологии мицелия и интенсивности спороношения проводили на 4-е и 7-е сутки культивирования. Установлено, что на 4-е сутки воздействие соединений сократило площадь колоний патогенов на 9,2–83,5 % относительно контрольного образца (за исключением *N*-тозил-3-*трет*-бутил-1-метилтетразолий-5-аминида (**5**) против *F. avenaceum*, который не показал наличия фунгицидной активности). Наибольшее ингибирующее действие проявили *N*-бензоил-1,3-ди-*трет*-бутилтетразолий-5-аминид (**3**) и *N*-(*N′*-фенилтиокарбамил)-1,3-ди-*трет*-бутилтетразолий-5-аминид (**6**). К 7-м суткам высокий угнетающий эффект у соединения **3** сохранился (площадь колоний снизилась до 20,5–48,1 % от контрольного образца). Соединение **6** вызвало полное подавление спороношения у *F. avenaceum* и *B. sorokiniana*, стимулируя вегетативный рост в ущерб размножению. В отношении *A. alternata* соединение **6** спровоцировало стрессовое гиперспороношение, что может быть использовано для наработки инфекционного материала в научных целях. Полученные данные подтверждают перспективность дальнейшего изучения тетразолий-5-аминидов А-типа для создания на их основе новых средств защиты растений.

Ключевые слова: мезоионные тетразолий-5-аминиды, биологическая активность, фитопатогены, фунгицидный эффект, спороношение, *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Alternaria alternata*, *Colletotrichum lupini*

Для цитирования. Будевич, В. А. Оценка биологической активности мезоионных тетразолий-5-аминидов А-типа против некоторых возбудителей болезней сельскохозяйственных растений / В. А. Будевич, Ю. А. Сущевич, А. В. Зураев // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2026. – Т. 62, № 4. – С. 284–291. https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-4-284-291

V. A. Budevich[1], Yu. A. Sushchevich[2], A. V. Zuraev[3]

[1]Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
[2]Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture, Zhodino, Belarus
[3]Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

ASSESSMENT OF THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF MESOIONIC A-TYPE TETRAZOLIUM-5-AMINIDES AGAINST CERTAIN AGRICULTURAL PLANT PATHOGENS

Abstract. The biological activity of five mesoionic A-type tetrazolium-5-aminides was evaluated against the causative agents of agricultural plant diseases, including *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Alternaria alternata*, and *Colletotrichum lupini*. The studies were carried out under laboratory conditions on potato dextrose agar with the test compounds added directly to the culture medium at a concentration of 0.3 mg/mL. Colony area, mycelial morphology, and sporulation intensity were assessed on days 4 and 7 of cultivation. On day 4, the test compounds reduced the colony area of the pathogens by 9.2–83.5 % relative to the control (with the exception of *N*-tosyl-3-*tert*-butyl-1-methyltetrazolium-5-aminide (**5**) against *F. avenaceum*, which showed no fungicidal activity). The most pronounced inhibitory effect was exerted by *N*-benzoyl-1,3-di-*tert*-butyltetrazolium-5-aminide (**3**) and *N*-(*N′*-phenylthiocarbamoyl)-1,3-di-*tert*-butyltetrazolium-5-aminide (**6**). By day 7, the strong suppressive effect of compound **3** persisted (colony area decreased to 20.5–48.1 % of the control). Compound **6** caused complete inhibition of sporulation in *F. avenaceum* and *B. sorokiniana*, stimulating vegetative growth at the expense of reproduction. In *A. alternata*, compound **6** induced stress-induced hypersporulation, which can be utilized for the production of infectious material for scientific purposes. The obtained data confirm the promise of further investigation of A-type tetrazolium-5-aminides as a basis for the development of new plant protection agents.

© Будевич В. А., Сущевич Ю. А., Зураев А. В., 2026

Keywords: mesoionic tetrazolium-5-aminides, biological activity, phytopathogens, fungicidal effect, sporulation, *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Alternaria alternata*, *Colletotrichum lupini*

For citation. Budevich V. A., Sushchevich Yu. A., Zuraev A. V. Assessment of the biological activity of mesoionic A-type tetrazolium-5-aminides against certain agricultural plant pathogens. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2026, vol. 62, no. 4, pp. 284–291 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-4-284-291

Введение. Болезни растений являются одной из основных причин снижения продуктивности сельскохозяйственных культур. К наиболее распространенным относятся заболевания, вызванные фитопатогенными грибами. Патогенный комплекс этих возбудителей представлен различными видами, паразитирующими на растении-хозяине на протяжении всего онтогенеза и поражающими разные части растения. Высокой вредоносностью отличаются патогены, повреждающие корневую систему и вызывающие корневую гниль, которые ведут к ее преждевременному разрушению, что полностью блокирует поступление в растение воды и питательных веществ. Огромное количество патогенных грибов поражают листья, стебли и репродуктивные части растений, что приводит к снижению фотосинтеза и нарушению их метаболизма. Следует отметить, что отдельные грибы, возбудители болезней, способные развиваться на всех органах растения-хозяина, поражают корневую систему (корневые гнили), листья (листовые пятнистости), репродуктивные части и семена. В технологиях возделывания сельскохозяйственных культур большое внимание уделяется защитным мероприятиям в борьбе с болезнями, таким как агротехнические, биологические и химические [1–3].

В комплексе защиты от болезней наибольшее значение имеют химические средства (фунгициды), эффективно подавляющие грибную инфекцию. Особое место занимают серосодержащие препараты, поскольку многие из них подавляют не только грибную инфекцию, но и сдерживают развитие клещей (акарициды). Отметим, что в отличие от современных препаратов соединения, содержащие в своем составе серу, могут уступать по технологичности применения. Несмотря на то что в настоящее время зарегистрировано и разрешено к использованию на территории республики много высокоэффективных препаратов, продолжаются исследования по созданию и изучению новых биологически активных веществ [4]. Объяснением такого разнообразия применяемых фунгицидов служит биологическая особенность возбудителей болезней. Исследования показывают, что благодаря огромной репродуктивной способности патогены быстро адаптируются к изменениям и становятся малоуязвимы к широко используемым препаратам [5–7].

Азольные фунгицидные препараты остаются ключевым классом веществ, применяемых для защиты сельскохозяйственных культур, составляя около 20–25 % мирового рынка фунгицидов [5]. Одними из основных мишеней являются стерол-14α-деметилаза (CYP51), β-тубулины и другие клеточные компоненты. В первом случае происходит остановка окислительного деметилирования ланостерина путем блокировки биосинтеза эргостерина – важнейшего компонента клеточных мембран грибов, во втором случае фунгициды воздействуют на тубулины, нарушая образование веретена и влияя на митоз [6, 7]. Важным достижением является создание мефентрифлуконазола – первого представителя инновационной подгруппы изопропанол-азолов. Благодаря конформационной гибкости он прочно связывается даже с мутантными формами фермента CYP51, успешно преодолевая резистентность фитопатогенов к другим азолам (тебуконазол, эпоксиконазол) [8]. Современные исследования сфокусированы на синтезе молекул, сочетающих азольный цикл с другими фармакофорными группами: аминокислотными, карбоксамидными, оксадиазольными или тиадиазольными фрагментами. Азолы часто обладают плохой растворимостью в воде и высокой токсичностью для водной фауны. Нано- и микрокапсулирование (например, гексаконазол в оболочке из хитозана или прохлораз в мезопористых наночастицах диоксида кремния) обеспечивает pH- и термочувствительное контролируемое высвобождение, повышая фотостабильность и значительно снижая экологическую нагрузку на окружающую среду [7, 9–11].

В соответствии с современными представлениями мезоионные тетразолий-5-аминиды А-типа, также являющиеся азолами, относятся к подклассу сопряженных мезомерных гетероциклических бетаинов [12]. Для мезоионных соединений характерно проявление различных видов

биологической активности, включая такие, как антибактериальная, инсектицидная, фунгицидная и др. [13]. Среди производных тетразола известны соединения, обладающие антигипертензивной, антибактериальной, противогрибковой, противовирусной, противовоспалительной, противораковой и др. биологической активностью [14, 15]. Несмотря на то что мезоионные производные тетразолий-5-аминидов А-типа были впервые получены более 70 лет назад, исследованию их фунгицидной активности до настоящего времени должного внимания не уделялось [16].

Задачей нашего исследования является оценка эффективности пяти новых мезоионных тетразолий-5-аминидов А-типа против возбудителей корневой гнили, пятнистостей листьев, стебля, репродуктивных органов и семян зерновых культур и люпина.

Методика проведения исследования. В работе использовали чистые культуры патогенов возбудителей корневых гнилей и других болезней зерновых культур: *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Alternaria alternata*, а также возбудитель антракноза люпина *Colletotrichum lupini*. Исследования проводили в лабораторных условиях на картофельно-глюкозном агаре (КГА). Состав питательной среды: картофель (отвар) – 200 г, глюкоза – 20 г, агар – 20 г, дистиллированная вода – до 1 000 мл.

Картофель измельчали и кипятили в воде в течение 40 мин, после чего отвар процеживали через марлю, добавляли необходимое количество глюкозы (20 г/л), агар (15–20 г/л) и воду, разливали в стеклянные колбы объемом 150–200 мл и автоклавировали 20 мин при 1 атм. Согласно схеме перед посевом грибов в питательную среду добавляли исследуемые вещества (предварительно растворенные в ацетоне в расчете 0,03 г на 1 мл ацетона) в количестве 1 мл раствора в ацетоне на 100 мл питательной среды, тщательно перемешивали, разливали по чашкам Петри, а после остывания осуществляли посев возбудителей. В качестве контроля использовали питательные среды, полученные из расчета 1 мл ацетона на 100 мл питательной среды. Чашки Петри помещали в термостат при температуре 24 °С, измерение и описание колоний проводили на 4-е и 7-е сутки. Наличие или отсутствие спороношения определяли под микроскопом МБИ-6 при увеличении ×350. Следует отметить, что скорость роста колоний зависела от вида возбудителя: быстрее разрастались фузариозные колонии (*F. avenaceum*). Некоторые колонии не имели четкого радиального роста, поэтому проводили три замера их диаметра и вычисляли среднюю величину. Площадь колоний рассчитывали по формуле:

$$S = \pi r^2,$$

где r – радиус колонии.

Исследуемые соединения **3–7** получали по опубликованным ранее методикам [17, 18] из 1,3-ди-*трет*-бутилтетразолий-5-аминида (**1**) и из 3-*трет*-бутил-1-метилтетразолий-5-аминида (**2**) путем их взаимодействия с соответствующими электрофильными агентами в условиях реакции Шоттена–Баумана (рис. 1).

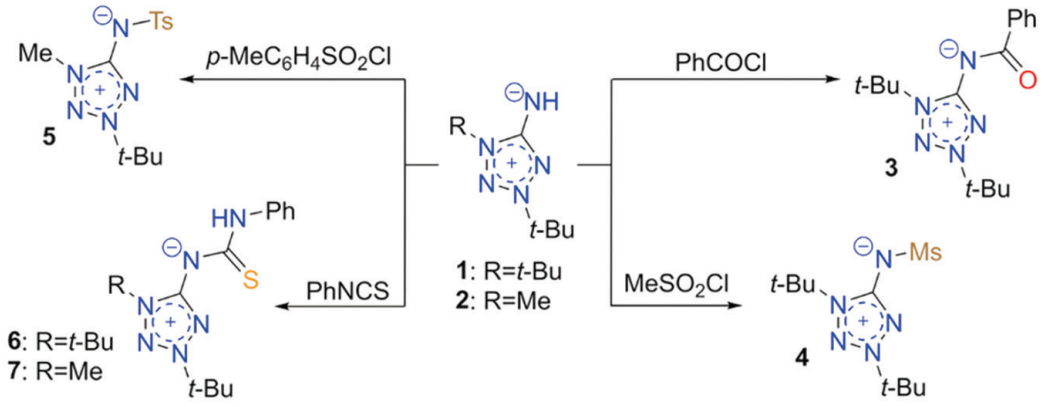


Рис. 1. Схема синтеза исследуемых соединений **3–7**

Fig. 1. Synthesis scheme for compounds **3–7**

Результаты и их обсуждение. Исследование показывает, что на 4-е сутки стало заметно действие изучаемых соединений **3–7**. За исключением одного варианта, где использовалось соединение **5** с посевом *F. avenaceum*, площадь колоний уменьшилась на 9,2–83,5 % по отношению к контрольному образцу. Особенно сильное ингибирующее действие выявлено у соединений **3** и **6**: от 38,7 до 83,5 %. Следует отметить неоднозначную реакцию на эти вещества возбудителей болезней. Так, более сильно реагировал возбудитель альтернариоза, где колонии были угнетены на 78,0 и 83,5 %, в меньшей степени – возбудитель антракноза (38,7 и 59,7 % соответственно) (табл. 1).

Таблица 1. **Влияние химических соединений на рост колоний возбудителей болезней растений (4-е сутки)**

Table 1. **The effect of chemical compounds on the colony growth of plant pathogens (day 4)**

Вариант	*F. avenaceum*		*B. sorokiniana*		*C. lupini*		*A. alternata*	
	Площадь колонии, см^2	К контролю, %	Площадь колонии, см^2	К контролю, %	Площадь колонии, см^2	К контролю, %	Площадь колонии, см^2	К контролю, %
КГА (контроль)	15,2	100,0	5,3	100,0	6,2	100,0	9,1	100,0
КГА + ацетон	13,8	90,8	3,1	58,5	6,2	100,0	7,1	78,0
КГА + **3**	4,5	29,6	1,5	28,3	3,8	61,3	2,0	22,0
КГА + **4**	12,6	82,9	3,1	58,5	5,3	85,5	7,1	78,0
КГА + **5**	15,2	100,0	4,5	84,9	5,3	85,5	8,0	87,9
КГА + **6**	6,2	40,8	2,0	37,7	2,5	40,3	1,5	16,5
КГА + **7**	13,8	90,8	2,5	47,2	4,5	72,6	5,3	58,2

На 7-е сутки повторное определение площади колоний грибов показало, что действие соединений **3** и **6** сохранилось, однако ингибирующий эффект в большей степени проявился у вещества **3**, где уменьшение колоний составило 51,9–79,5 % к контрольному варианту. Сильнее всех на соединения **3** и **6** отреагировал возбудитель альтернариоза: на 79,5 и 69,9 % ниже контрольного образца; на одном уровне по отношению к веществам **3** и **6** оказался размер площади колоний у возбудителя антракноза: 48,1 % относительно контрольного образца. В то же время площадь колонии возбудителя гельминтоспориоза (*B. sorokiniana*) при использовании соединения **6** увеличилась на 28,2 % (табл. 2).

Таблица 2. **Влияние химических соединений на рост колоний возбудителей болезней растений (7-е сутки)**

Table 2. **The effect of chemical compounds on colony growth of plant pathogens (day 7)**

Вариант	*F. avenaceum*		*B. sorokiniana*		*C. lupini*		*A. alternata*	
	Площадь колонии, см^2	К контролю, %	Площадь колонии, см^2	К контролю, %	Площадь колонии, см^2	К контролю, %	Площадь колонии, см^2	К контролю, %
КГА (контроль)	58,5	100,0	7,1	100,0	21,2	100,0	30,2	100,0
КГА + ацетон	55,4	94,7	5,3	74,6	19,6	92,5	22,9	75,8
КГА + **3**	13,8	23,6	2,5	35,2	10,2	48,1	6,2	20,5
КГА + **4**	50,2	85,8	6,2	87,3	16,6	78,3	22,9	75,8
КГА + **5**	52,8	90,3	7,1	100,0	16,6	78,3	26,4	87,4
КГА + **6**	21,2	36,2	9,1	128,2	10,2	48,1	9,1	30,1
КГА + **7**	55,4	94,7	6,2	87,3	15,2	71,7	21,2	70,2

Как показал дальнейший анализ, исследуемые соединения оказали действие и на интенсивность спороношения грибов. В табл. 3 представлены интенсивность спороношения и описание морфологии колоний возбудителя, которое показывает, что возбудители болезней отреагировали на препараты как размером колоний, так и образованием спор и структурой мицелия. Гриб *F. avenaceum* на питательной среде с использованием соединения **3** образовал очень небольшое количество спор, всего от 2 до 5 в поле зрения микроскопа, а вещество **6** вовсе подавило развитие спор, наблюдалось их полное отсутствие. Отсутствие спороношения означает отсутствие вос-

производства возбудителя, хотя гетеротрофные патогены могут размножаться мицелием, а мицелий имеет большее значение в сохранении и возобновлении организма. От интенсивности спороношения зависит его распространение, а также патогенность и агрессивность. В контрольном и других вариантах опыта наблюдалось обильное спороношение без какой-либо деформации спор. Отмечены некоторые изменения в морфологии мицелия: в отличие от контрольного образца колонии возбудителя имели снежно-белый окрас, с более плотной структурой (войлочной), строма слабо окрашенная (в норме – темно-малиновый цвет). Использование вещества **6** привело к полному отсутствию спороношения у колоний *B. sorokiniana*, при этом если в контрольном варианте колонии этого возбудителя имеют почти черный окрас и черную строму, плотную колонию и обильное спороношение, то на среде с этим препаратом окрас светло-серый, колония воздушная, строма также светлая. Отсутствие спороношения привело к интенсивному вегетативному росту в ущерб спороношению и возобновлению роста и распространения гриба. Микроскопическое исследование выявило угнетение спороношения данного возбудителя под действием всех применяемых химических соединений.

Меньше других возбудителей отреагировал на анализируемые соединения антракноз люпина (*C. lupini*). Количество спор в поле зрения микроскопа снизилось всего почти в два раза в чашках с соединениями **3**, **5** и **6** (больше с веществом **6**), при этом мицелий и строма приобрели более светлый окрас и рыхлую структуру мицелия.

Несколько другая реакция наблюдалась при посеве чистой культуры возбудителя альтернариоза (*A. alternata*). В отличие от других возбудителей колонии альтернарии на 7-е сутки слабо спороносили, в варианте с ацетоном спороношение вовсе отсутствовало, при этом в варианте с соединением **6** наблюдалось интенсивное спороношение, мицелий не просматривался, каждая его клетка образовала спору, по внешнему виду несколько деформированную. Однако при последующем пересеве в стандартную среду КГА наблюдался нормальный мицелиальный рост. Можно предположить, что возбудитель от примененного препарата получил сильный стресс, а защитная реакция проявилась в усилении образования спор в целях сохранения вида. Такие явления нередки в природе, когда стрессовые ситуации провоцируют ускорение цветения и плодообразование у растений. В данном случае соединение **6** можно рассматривать как обладающее положительным свойством, стимулирующим спороношение (например, при ускоренной наработке инфекции для научных исследований, создании некоторых биологических препаратов, применяемых в целях защиты растений от вредителей и болезней).

Таблица 3. **Влияние химических соединений на интенсивность спороношения, окрас и типы колоний возбудителей болезней растений в лабораторных условиях**

Table 3. **Influence of chemical compounds on the sporulation intensity, pigmentation, and morphological types of pathogen colonies in laboratory settings**

Вариант	Интенсивность спороношения	Окрас колонии и стромы	Структура мицелия
Fusarium avenaceum			
КГА (контроль)	Обильное, более 100 спор в поле зрения микроскопа	Белая колония, строма темно-малиновая	Мицелий белый паутинистый, с многочисленными пионотами
КГА + ацетон	Обильное, более 100 спор в поле зрения микроскопа	Белая колония, строма темно-малиновая	Мицелий белый паутинистый, с многочисленными пионотами
КГА + **3**	Слабое, 2–5 споры в поле зрения микроскопа	Колония белая, строма малиновая	Мицелий плотный, войлочный
КГА + **4**	Обильное, более 100 спор в поле зрения микроскопа	Колония белая, строма темно-малиновая	Мицелий паутинистый, с многочисленными пионотами
КГА + **5**	Обильное, более 100 спор в поле зрения микроскопа	Колония белая, строма темно-малиновая	Мицелий паутинистый, с многочисленными пионотами
КГА + **6**	Отсутствует	Колония снежно-белая, строма бледно-розовая	Мицелий плотный, войлочный
КГА + **7**	Обильное, более 100 спор в поле зрения микроскопа	Колония белая, строма бледно-розовая	Мицелий рыхлый, паутинистый

Окончание табл. 3

Вариант	Интенсивность спороношения	Окрас колонии и стромы	Структура мицелия
Bipolaris sorokiniana			
КГА (контроль)	Обильное, более 100 спор в поле зрения микроскопа	Колония почти черная, строма черная	Мицелий плотный, бархатистый
КГА + ацетон	Обильное, более 100 спор в поле зрения микроскопа	Колония почти черная, строма черная	Мицелий плотный, бархатистый
КГА + **3**	Невысокое, 20–30 спор в поле зрения микроскопа	Колония почти черная, строма черная	Мицелий плотный, бархатистый
КГА + **4**	Невысокое, 30–20 спор в поле зрения микроскопа	Колония почти черная, строма черная	Мицелий плотный, бархатистый
КГА + **5**	Слабое, 10–20 спор в поле зрения микроскопа	Колония почти черная, строма черная	Мицелий плотный, бархатистый
КГА + **6**	Отсутствует	Колония светло-серая, строма светлая	Мицелий воздушный, рыхлый
КГА + **7**	Очень слабое, 2–3 споры в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма темно-серая	Мицелий воздушный, рыхлый
Colletotrichum lupini			
КГА (контроль)	Среднее, более 50 спор в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма черная	Мицелий воздушный, очень рыхлый
КГА + ацетон	Среднее 40–45 спор в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма черная	Мицелий стелющийся, слегка воздушный
КГА + **3**	Ниже среднего, 20–30 спор в поле зрения микроскопа	Колония светло-серая, строма светло-серая	Мицелий стелющийся, слабо воздушный
КГА + **4**	Среднее, более 50 спор в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма черная	Мицелий воздушный, очень рыхлый
КГА + **5**	Ниже среднего, более 20–30 спор в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма черная	Мицелий стелющийся, слабо воздушный
КГА + **6**	Ниже среднего, 10–20 спор в поле зрения микроскопа	Колония светлая, почти белая, строма светлая	Мицелий воздушный, рыхлый
КГА + **7**	Среднее, 30–40 спор в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма черная	Мицелий воздушный, рыхлый
*Alternaria alternat*a			
КГА (контроль)	Слабое, 1–2 споры в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма черная	Мицелий плотный, слабо пушистый
КГА + ацетон	Отсутствует	Колония серая, строма серая	Мицелий плотный, слегка пушистый
КГА + **3**	Слабое 1–3 споры в поле зрения микроскопа	Колония светло-серая, строма светло-серая	Мицелий плотный, слегка пушистый
КГА + **4**	Слабое, 1–3 споры в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма черная	Мицелий плотный, слабо пушистый
КГА + **5**	Слабое, 2–6 спор в поле зрения микроскопа	Колония серая, строма черная	Мицелий плотный, слабо пушистый
КГА + **6**	Обильное, споры нетипичные, более 300 спор в поле зрения микроскопа	Колония темно-оливковая, бархатистая, строма черная	Мицелий не просматривается, масса спор
КГА + **7**	Отсутствует	Колония серая, строма черная	Мицелий плотный, слабо пушистый

Заключение. Таким образом, проведена оценка фунгицидной активности пяти новых производных 1,3-дизамещенных тетразолий-5-аминидов А-типа по отношению к таким возбудителям болезней сельскохозяйственных растений, как *F. avenaceum*, *B. sorokiniana*, *A. alternata* и *C. lupini*. Наиболее эффективными оказались *N*-бензоил-1,3-ди-*трет*-бутилтетразолий-5-аминид (**3**) и *N*-(*N′*-фенилтиокарбамил)-1,3-ди-*трет*-бутилтетразолий 5-аминид (**6**), что может быть связано со структурным сходством данных соединений с препаратами «Биксафен», «Диафентиурон» и «Тиофанат-Метил». Полученные данные подтверждают перспективность дальнейшего изучения тетразолий-5-аминидов А-типа для создания на их основе новых средств защиты растений.

Список использованных источников

1. Миренков, Ю. А. Химические средства защиты растений : справочник / Ю. А. Миренков, П. А. Саскевич, С. В. Сорока. – 2-е изд., перераб. и доп. – Несвиж : Несвиж. укрупн. тип. им. С. Будного. – 2011. – 394 с.

2. Пересыпкин, В. Ф. Сельскохозяйственная фитопатология / В. Ф. Пересыпкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1974. – 560 с.

3. Подготовка к посеву семян зерновых культур (рекомендации) / Ф. И. Привалов, И. Г. Бруй, Г. В. Будевич [и др.] ; М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, НПЦ НАН Беларуси по земледелию. – Жодино, 2008. – 101 с.

4. Государственный реестр средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь : справ. изд. / сост. : А. В. Пискун, О. А. Хвалей, С. А. Яблонская [и др.]. – Мн. : Промкомплекс, 2020. – 742 с.

5. Jorgensen, L. N. Azole Use in Agriculture, Horticulture, and Wood Preservation – Is It Indispensable? / L. N. Jorgensen, T. M. Heick // Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. – 2021. – Vol. 11. – P. 730297. https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.730297

6. Green Pesticide Research and Development Integrating Molecular Targets, Mechanisms, Resistance, and Innovation in Theory and Technology / C. Wang, X. Luo, Y. Zhang [et al.] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2025. – Vol. 73. – P. 32460–32489. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c11544

7. Recent advances and remaining barriers to producing novel formulations of fungicides for safe and sustainable agriculture / A. B. Tleuova, E. Wielogorskab, V. S. S. L. P. Talluria [et al.] // Journal of Controlled Release. – 2020. – Vol. 326. – P. 468–481. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.07.035

8. Mefentrifluconazole sensitivity amongst European Zymoseptoria tritici populations and potential implications for its field efficacy / S. Kildea, P. Hellin, T. M. Heick [et al.] // Pest Management Science. – 2023. – Vol. 80, № 2. – P. 533–543. https://doi.org/10.1002/ps.7795

9. Synthesis and Biological Evaluation of Novel 1,2,4-Triazole Derivatives Containing Amino Acid Fragments / H. Shi, M. Li, Zh. Zhou [et al.] // Molecules. – 2025. – Vol. 30, № 8. – P. 1692. https://doi.org/10.3390/molecules30081692

10. Wang, J. Design, Synthesis, and Antifungal/Anti-Oomycete Activities of Novel 1,2,4-Triazole Derivatives Containing Carboxamide Fragments / J. Wang, H. Shi, A. Lu // Journal of Fungi. – 2024. – Vol. 10, № 2. – P. 160. https://doi.org/10.3390/jof10020160

11. Разработка и синтез соединений с фунгицидной активностью в подавлении роста грибов / Ф. Д. Дахаева, С. Бахман, М. С. Гинс, М. Баят // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство.– 2023. – Т. 18, № 4. – С. 475–484. https://doi.org/10.22363/2312-797X-2023-18-4-475-484

12. Ramsden, C. A. Chapter Three – Type A mesoionic compounds (1980–2020) / C. A. Ramsden, F. Dumitrascu // Advances in Heterocyclic Chemistry : Heterocyclic Mesomeric Betaines and Mesoionic Compounds / ed. C. A. Ramsden. – Academic Press, 2022. – Vol. 137. – P. 71–189. https://doi.org/10.1016/bs.aihch.2021.09.003

13. Kawase, M. The Chemistry of Bioactive Mesoionic Heterocycles / M. Kawase, H. Sakagami, N. Motohashi // Bioactive Heterocycles VII: Flavonoids and Anthocyanins in Plants, and Latest Bioactive Heterocycles II : Topics in Heterocyclic Chemistry / ed. N. Motohashi. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2009. – P. 135–152. https://doi.org/10.1007/7081_2007_096

14. Ostrovskii, V. A. Tetrazoles / V. A. Ostrovskii, E. A. Popova, R. E. Trifonov // Comprehensive Heterocyclic Chemistry IV / eds. D. S. Black, J. Cossy, C. V. Stevens. – Oxford : Elsevier, 2022. – P. 182–232. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818655-8.00131-1

15. Ostrovskii, V. A. Medicinal chemistry of tetrazoles / V. A. Ostrovskii, R. E. Trifonov, E. A. Popova // Russian Chemical Bulletin. – 2012. – Vol. 61, № 4. – P. 768–780. https://doi.org/10.1007/s11172-012-0108-4

16. Мызников, Л. В. Тетразолсодержащие биологически активные соединения и лекарственные препараты / Л. В. Мызников, С. В. Ворона, Ю. Э. Зевацкий // Химия гетероциклических соединений. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 224–233.

17. Endo- and exocyclic *N*-alkylation of 1- and 5-aminotetrazoles with *t*-BuOH–$HClO_4$: synthesis of mono-, di-, and tri-*tert*-butyl substituted aminotetrazolium salts / S. V. Voitekhovich, P. N. Gaponik, A. S. Lyakhov, O. A. Ivashkevich [et al.] // Tetrahedron. – 2008. – Vol. 64, № 37. – P. 8721–8725. https://doi.org/10.1016/j.tet.2008.06.095

18. *N*-Functionalization of 1,3-dialkyltetrazolium-5-aminides under Schotten-Baumann reaction conditions / V. A. Budevich, A. V. Zuraev, O. S. Sherbakova [et al.] // Tetrahedron Letters. – 2026. – Vol. 184. – P. 156232. https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2026.156232

References

1. Mirenkov Yu. A., Saskevich P. A., Soroka S. V.. *Chemical plant protection products.* 2nd ed., rev. and enl. Nesvizh : Nesvizh. Ukrpn. Tipogr. Im. S. Budnogo, 2011. 394 p. (in Russian).

2. Peresypkin V. F. *Agricultural phytopathology.* 2nd ed., rev. and enl. Moscow, Kolos Publ., 1974. 560 p. (in Russian).

3. Privalov F. I., Bruy I. G., Budevich G. V., Belyavskaya L. I., Kabashnikova L. F., Derevinskaya A. A. Preparation for sowing seeds of grain crops. Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus, RUE «Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture». Zhodino, 2008, 101 p. (in Russian).

4. Piskun A. V., Khvalei O. A., Yablonskaya S. A., Kazakevich N. V., Globazh O. G. A., Nikolaeva T. G., Pesterev S. A. State register of plant protection products and fertilizers permitted for use in the Republic of Belarus : ref. ed. Minsk : Promkompleks, 2020, 742 p. (in Russian).

5. Jorgensen L. N., Heick T. M. Azole Use in Agriculture, Horticulture, and Wood Preservation – Is It Indispensable? *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 2021, vol. 11, pp. 730297. https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.730297

6. Wang C., Luo X., ZhangY., Pu X., Liu J., Zhang Sh., Ye M., Li X. Green Pesticide Research and Development Integrating Molecular Targets, Mechanisms, Resistance, and Innovation in Theory and Technology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2025, vol. 73, pp. 32460–32489. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c11544

7. Tleuova A. B., Wielogorskab E., Talluria V. S. S. L. P., Štěpáneka F., Elliottd C. T., Grigoriev D. O. Recent advances and remaining barriers to producing novel formulations of fungicides for safe and sustainable agriculture. *Journal of Controlled Release*, 2020, vol. 326, pp. 468–481. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.07.035

8. Kildea S., Hellin P., Heick T. M., Byrnea S., Hutton F. Mefentrifluconazole sensitivity amongst European Zymoseptoria tritici populations and potential implications for its field efficacy. *Pest Management Science*, 2023, vol. 80, no. 2, pp. 533–543. https://doi.org/10.1002/ps.7795

9. Shi H., Li M., Zhou Zh., Lu A., Wang Z. Synthesis and Biological Evaluation of Novel 1,2,4-Triazole Derivatives Containing Amino Acid Fragments. *Molecules*, 2025, vol. 30, no. 8, pp. 1692. https://doi.org/10.3390/molecules30081692

10. Wang J., Shi H., Lu A. Design, Synthesis, and Antifungal/Anti-Oomycete Activities of Novel 1,2,4-Triazole Derivatives Containing Carboxamide Fragments. *Journal of Fungi*, 2024, vol. 10, iss. 2, pp. 160. HTTPS://DOI.ORG/10.3390/jof10020160

11. Dakhaeva F. D., Bachman S., Gins M. S., Bayat M. Development and synthesis of compounds with fungicidal activity in suppressing fungal growth. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Agronomiya I zhivotnovodstvo = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 475–484 (in Russian). https://doi.org/10.22363/2312-797X-2023-18-4-475-484

12. Ramsden C. A., Dumitrascu F. Chapter Three – Type A mesoionic compounds (1980–2020). *Advances in Heterocyclic Chemistry : Heterocyclic Mesomeric Betaines and Mesoionic Compounds* / ed. C. A. Ramsden. Academic Press, 2022, vol. 137, pp. 71–189. https://doi.org/10.1016/bs.aihch.2021.09.003.

13. Kawase M., Sakagami H., Motohashi N. The Chemistry of Bioactive Mesoionic Heterocycles. *Bioactive Heterocycles VII: Flavonoids and Anthocyanins in Plants, and Latest Bioactive Heterocycles II : Topics in Heterocyclic Chemistry* / ed. N. Motohashi. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009, pp. 135–152. https://doi.org/10.1007/7081_2007_096

14. Ostrovskii V. A., Popova E. A., Trifonov R. E. Tetrazoles. *Comprehensive Heterocyclic Chemistry IV* / eds. D. S. Black, J. Cossy, C. V. Stevens. Oxford : Elsevier, 2022, pp. 182–232. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818655-8.00131-1

15. Ostrovskii V. A., Trifonov R. E., Popova E. A. Medicinal chemistry of tetrazoles *Russian Chemical Bulletin*, 2012, vol. 61, no. 4, pp. 768–780. https://doi.org/10.1007/s11172-012-0108-4

16. Myznikov L. V., Vorona S. V., Zevatskii Yu. E. Tetrazole-containing biologically active compounds and drugs. *Khimiya geterotsiklicheskikh soedinenii = Chemistry of Heterocyclic Compounds*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 224–233 (in Russian).

17. Voitekhovich S. V., Gaponik P. N., Lyakhov A. S., Ivashkevich O. A. Endo- and exocyclic *N*-alkylation of 1- and 5-aminotetrazoles with *t*-BuOH–$HClO_4$: synthesis of mono-, di-, and tri-*tert*-butyl substituted aminotetrazolium salts. *Tetrahedron*, 2008, vol. 64, no. 37, pp. 8721–8725. https://doi.org/10.1016/j.tet.2008.06.095

18. Budevich V. A., Zuraev A. V., Sherbakova O. S., Ivashkevich L. S., Voitekhovich S. V., Ivashkevich O. A. *N*-Functionalization of 1,3-dialkyltetrazolium-5-aminides under Schotten-Baumann reaction conditions. *Tetrahedron Letters*, 2026, vol. 184, pp. 156232. https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2026.156232

Информация об авторах

Будевич Владислав Александрович – магистр биологических наук, научный сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 5/2, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vl.budevich@gmail.com

Сущевич Юлия Александровна – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией. Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию (ул. Тимирязева, 1, 222160, Жодино, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: immunitet@izis.by

Зураев Александр Викторович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alex.zuraev@gmail.com

Information about the authors

Budevich Vladislav A. – M. Sc. (Biology), Researcher. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Akademika Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vl.budevich@gmail.com

Sushchevich Yulia A. – Ph. D. (Agriculture). Head of the Laboratory. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture (1, Timiryazeva Str., 222160, Zhodino, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: immunitet@izis. By

Zuraev Alexander V. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Deputy Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoriny Str., 220084, Republic of Belarus, Minsk). E-mail: alex.zuraev@gmail.com