

Горинова Екатерина Андреевна

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина

Г. Краснодар

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРБИЦИДНЫХ АНТИДОТОВ И
РОСТРЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ ПИРИДИНА И
ПИРАЗОЛОПИРИДИНА ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР
(НА ПРИМЕРЕ ПОДСОЛНЕЧНИКА И СОИ)**

Аннотация: В работе представлены результаты синтеза и исследования биологической активности новых производных пиридина и пиразолопиридина – перспективных гербицидных антидотов и рострегуляторов для защиты сельскохозяйственных культур. Модифицирована методика синтеза 3-аминотиено[2,3-*b*]пиридинов с использованием микроволновой активации, что позволило сократить время реакции (с 6 ч до 20 мин) и повысить выходы целевых продуктов на 10-15%. Строение синтезированных соединений подтверждено методами ИК-, ЯМР ¹H-спектроскопии и масс-спектрометрии. В лабораторных условиях на проростках сои и подсолнечника проведен скрининг рострегулирующей и антидотной (к гербициду 2,4-Д) активности. Выявлены соединения 2*b* (с этильным заместителем) и 2*d* (с бензильным заместителем), показавшие высокий антидотный эффект (до 46,7%) и стимуляцию роста (увеличение длины проростков сои на 28,6%). В полевых мелкоделяночных опытах (2023-2024 гг.) обработка растений сои соединением 2*b* обеспечила прибавку урожая семян 2,9 ц/га (15,9%), а на подсолнечнике при совместном применении с 2,4-Д – сохраненный урожай 6,1 ц/га (40,1% относительно варианта с гербицидом). Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего изучения 3-аминотиено[2,3-*b*]пиридинов в качестве основы для создания новых экологически безопасных препаратов для защиты и стимуляции роста сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: гербицидные антидоты, регуляторы роста растений, пиразолопиридины, 3-аминотиено[2,3-*b*]пиридины, 2,4-Д, подсолнечник (*Helianthus annuus* L.), соя (*Glycine max* (L.) Merr.), микроволновый синтез, биологическая активность

Abstract: The paper presents the results of the synthesis and investigation of the biological activity of new pyridine and pyrazolopyridine derivatives, promising herbicidal antidotes and growth regulators for crop protection. The method of synthesis of 3-aminothieno[2,3-*b*]pyridines using microwave activation was modified, which reduced the reaction time (from 6 hours to 20 minutes) and increased the yields of the target products by 10-15%. The structure of the synthesized compounds was confirmed by IR, NMR ¹H spectroscopy, and mass spectrometry. In laboratory conditions, the growth-regulating and antidote (to the herbicide 2,4-D) activities were screened on soybean and sunflower seedlings. Compounds 2b (with an ethyl substituent) and 2d (with a benzyl substituent) were identified, showing a high antidote effect (up to 46.7%) and growth stimulation (an increase in the length of soybean seedlings by 28.6%). In field small-plot experiments (2023-2024), treatment of soybean plants with compound 2b resulted in an increase in seed yield of 2.9 centners per hectare (15.9%), and in sunflower, when used in combination with 2,4-D, it resulted in a saved yield of 6.1 centners per hectare (40.1% compared to the herbicide-treated option). The obtained results confirm the prospects of further study of 3-aminothieno[2,3-*b*]pyridines as a basis for the creation of new environmentally friendly preparations for the protection and stimulation of crop growth.

Keywords: herbicide antidotes, plant growth regulators, pyrazolopyridines, 3-aminothieno[2,3-*b*]pyridines, 2,4-D, sunflower (*Helianthus annuus* L.), soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), microwave synthesis, biological activity

Введение

Одной из ключевых проблем современного растениеводства является необходимость эффективной борьбы с сорной растительностью при сохранении высокой продуктивности культурных растений. Химический метод защиты растений, основанный

на применении гербицидов, остается наиболее экономически эффективным, однако его широкое использование сопряжено с риском фитотоксического воздействия на саму сельскохозяйственную культуру.¹ Особенно остро эта проблема стоит при выращивании подсолнечника (*Helianthus annuus* L.) и сои (*Glycine max* (L.) Merr.) – стратегически важных масличных культур, чувствительных к ряду широко применяемых гербицидов, в частности к производным 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-Д).²

Эффективным подходом к минимизации гербицидного стресса является применение антидотов (безопаснаторов) – химических соединений, которые избирательно защищают культурное растение, не снижая при этом гербицидной активности в отношении сорняков. Параллельно важной задачей остается поиск новых регуляторов роста растений (рострегуляторов), способных повышать устойчивость культур к абиотическим и биотическим стрессам, а также улучшать их продукционные показатели.³ В связи с этим, разработка и исследование новых биологически активных соединений, сочетающих антидотные и рострегулирующие свойства, является актуальным направлением современной агрохимии и органической химии.

Особый интерес среди перспективных объектов для создания таких препаратов представляют гетероциклические соединения, содержащие пиридиновый и конденсированные с ним циклы. Ранее было показано, что производные пиридина, в частности 2-алкилтионикотинонитрилы, проявляют выраженную антидотную активность по отношению к 2,4-Д на подсолнечнике⁴. Кроме того, значительный потенциал продемонстрировали замещенные изоксазоло[5,4-b]пиридины, синтез и биологическая активность которых описаны в работе⁵, где установлена их способность эффективно защищать вегетирующие растения подсолнечника от повреждающего действия гербицида.

Дальнейшим развитием этого направления является синтез и изучение свойств производных пиразолопиридина – гетероциклической системы, сочетающей структурные

¹ Буров В. Н., Долженко В. И., Сухорученко Г. И., Тютюрев С. Л. Состояние, проблемы и перспективы химического метода защиты растений на пороге XXI века // Вестник защиты растений. 1999. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-problemy-i-perspektivy-himicheskogo-metoda-zaschity-rasteniy-na-poroge-xxi-veka> (дата обращения: 28.05.2026).

² Суворова Ю. Н., Омелянюк Л. В., Асанов А. М. Подсолнечник и соя - перспективные интродуцированные масличные культуры для западной Сибири // Вестник ОмГАУ. 2021. №4 (44). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podsolnechnik-i-soya-perspektivnye-introdutsirovannye-maslichnye-kultury-dlya-zapadnoy-sibiri> (дата обращения: 28.05.2026).

³ Касьяненко В. А. Значение антидотов в химической защите культур от сорной растительности // Защита и карантин растений. 2011. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/znachenie-antidotov-v-himicheskoy-zaschite-kultur-ot-sornoj-rastitelnosti> (дата обращения: 28.05.2026).

⁴ Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А., Дядюченко Л.В. Антидотная активность производных 2-алкилтио-никотинонитрилов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 132. С. 435-441.

⁵ Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А. Синтез замещенных изоксазоло[5,4-b]пиридинов и их антидотная активность // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 122. С. 471-480.

фрагменты, ответственные за биологическую активность. В работах ⁶ и ⁷ были получены данные о рострегулирующей активности некоторых представителей этого ряда на сое и подсолнечнике, однако закономерности «структура-активность» и механизмы антидотного действия остаются недостаточно изученными.

Целью работы является разработка методов синтеза новых производных пиридина и пиразолопиридина, оценка их антидотной и рострегулирующей активности на примере подсолнечника и сои, а также выявление взаимосвязи между строением молекул и их биологическим эффектом. Исследование направлено на создание научной основы для конструирования высокоэффективных и экологически безопасных препаратов для защиты и стимуляции роста сельскохозяйственных культур.

Литературный обзор

Применение гербицидов, особенно гормонального действия, таких как 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота (2,4-Д), является неотъемлемым элементом современного растениеводства. Однако, как отмечается в ряде работ ⁸, абсолютной избирательности действия у этих веществ не существует, что создает риск фитотоксического повреждения чувствительных сельскохозяйственных культур. Подсолнечник (*Helianthus annuus* L.) и соя (*Glycine max* (L.) Merr.) относятся к числу культур, высокочувствительных к 2,4-Д, что может приводить к существенным потерям урожая при нарушении регламентов применения гербицида. В связи с этим, разработка и внедрение антидотов – веществ, снижающих негативное действие гербицидов на культурные растения без уменьшения их эффективности против сорняков, является актуальной задачей агрохимии и органического синтеза.⁹

Значительный интерес в качестве перспективных антидотов и рострегуляторов представляют азотсодержащие гетероциклические соединения, в частности производные

⁶ Дмитриева И.Г., Сидак П.В., Макарова Н.А., Володин Д.В. Повышение урожайности сои при использовании регулятора роста ряда пиразолопиридинов // Земледелие. 2024. № 2. С. 29-33.

⁷ Дмитриева И.Г., Макарова Н.А. Изучение эффективности экстракта хвоща в качестве регулятора роста подсолнечника // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2025. Т. 21. № 3. С. 42-46.

⁸ Макарова Н.А. Антидотные свойства производных 3-циано-2-алкилтиопиридинов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2016 г. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2017. – С. 150–151.

Дмитриева И.Г., Дядюченко Л.В., Макарова Н.А. Защита подсолнечника от негативного действия 2,4-Д // Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования : сборник статей по материалам II международной научно-практической интернет-конференции. – с. Соленое Займище : Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия, 2017. – С. 1015–1017.

⁹ Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А., Дядюченко Л.В. Антидотная активность производных 2-алкилтио-никотинитрилов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 132. – С. 435–441.

пиридина и конденсированные с ним системы. Как указано в работе¹⁰, аннелированные системы, содержащие пиридиновое кольцо, по биологическому действию часто превосходят моноциклические аналоги, что объясняется увеличением числа фармакофорных групп и возможностью взаимодействия с более широким спектром рецепторов растений.

В рамках систематических исследований научной группы под руководством профессора Макаровой Н.А. был проведен скрининг нескольких классов таких соединений. В работе¹¹ (патент на изобретение) впервые были предложены N-замещенные пиразоло[3,4-b]пиридил-3-сульфонамиды, проявляющие рострегулирующую активность. Было установлено, что эти соединения в диапазоне концентраций 10^{-2} – 10^{-5} мас.% стимулируют рост гипокотилия и корней подсолнечника, превосходя по эффективности эталонный препарат гиббереллин.

Значительный вклад в развитие этого направления внесли исследования антидотных свойств производных 2-алкилтионикотинонитрилов. В работе¹² синтезирована серия новых соединений данного класса и изучена их способность защищать подсолнечник от 2,4-Д. В лабораторных опытах на проростках антидотный эффект достигал 19-44%, а в полевых мелкоделяночных опытах соединения 4, 6 и 8 обеспечили достоверную прибавку урожая семян подсолнечника на 31–44% по сравнению с эталоном (гербицид без антидота). Сохраненный урожай составил от 4,7 до 6,6 ц/га.

Дальнейшее развитие этого подхода представлено в публикации [7]¹³ (20 цитирований), где объектом изучения стали замещенные изоксазоло[5,4-b]пиридины – кислородсодержащие аналоги пиразолопиридинов. Авторами разработан эффективный метод синтеза 3-амино-5-хлор-4,6-диметилизоксазоло[5,4-b]пиридина и его карбоксаминов. Скрининг антидотной активности выявил соединение 5b (N-(3-хлорфенил)карбоксамин), которое в дозе 30 г/га повышало урожайность подсолнечника, поврежденного 2,4-Д, на 38% по сравнению с контролем. Эти данные подтверждают

¹⁰ Кайгородова Е.А., Макарова Н.А., Косянок Н.Е. Поиск перспективных антидотов в ряду пиридинсодержащих соединений // Защита растений от вредных организмов : материалы XI международной научно-практической конференции. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2023. – С. 177–180.

¹¹ Дмитриева И.Г., Дядюченко Л.В., Стрелков В.Д., Макарова Н.А. N-замещенные пиразоло[3,4-b]пиридил-3-сульфонамиды, проявляющие рострегулирующую активность : пат. 2357966 С1 Рос. Федерация. – № 2008105290/04 ; заявл. 12.02.2008 ; опубл. 10.06.2009. – Бюл. № 16.

¹² Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А., Дядюченко Л.В. Антидотная активность производных 2-алкилтио-никотинонитрилов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 132. – С. 435–441.

¹³ Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А. Синтез замещенных изоксазоло[5,4-b]пиридинов и их антидотная активность // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 122 (08). – С. 471–480.

высокий потенциал конденсированных пиридинсодержащих систем для создания эффективных антидотов.

Помимо антидотных свойств, производные пиразолопиридина проявляют выраженную рострегулирующую активность. В работе¹⁴ было показано, что обработка сои регулятором роста ряда пиразолопиридинов способствовала повышению урожайности на 15,7%. Авторы связывают этот эффект с активацией метаболических процессов и улучшением работы ассимиляционного аппарата. Аналогичные результаты были получены на подсолнечнике: в трехлетних полевых испытаниях¹⁵ одно из соединений ряда пиразолопиридинов обеспечило повышение урожайности на 11-13% по сравнению с эталоном (Ретацел), сопровождавшееся увеличением диаметра корзинки на 8,4%, массы семян с корзинки на 10,5% и доли массы семян до 73,1%.

Важно отметить, что эффективность соединений данного класса подтверждена и на других культурах. В исследовании¹⁶ производные пиридиламидоксимов показали положительные результаты при возделывании сорго, что свидетельствует о широком спектре рострегулирующего действия.

В контексте современных тенденций «зеленой» химии и снижения пестицидной нагрузки особый интерес представляют природные биостимуляторы. В работе¹⁷ изучена эффективность СО₂-экстракта полевого хвоща (*Equisetum arvense* L.) в качестве регулятора роста подсолнечника сорта Мастер. Двухлетние полевые опыты показали, что обработка экстрактом в дозе 50 г/га обеспечивает стабильную прибавку урожая семян в среднем на 12,6% (3,05 ц/га), повышает массу 1000 семян и улучшает структуру урожая. Этот результат открывает перспективы для комбинирования синтетических и природных рострегуляторов.

Таким образом, анализ литературных данных свидетельствует о высокой перспективности производных пиридина и пиразолопиридина как основы для создания новых гербицидных антидотов и рострегуляторов. Выявлены четкие закономерности «структура-активность», показана эффективность соединений на подсолнечнике и сое в лабораторных и полевых условиях. Вместе с тем, остается актуальным расширение библиотеки синтезированных соединений, оптимизация их структуры для повышения

¹⁴ Дмитриева И.Г., Сидак П.В., Макарова Н.А., Володин Д.В. Повышение урожайности сои при использовании регулятора роста ряда пиразолопиридинов // Земледелие. – 2024. – № 2. – С. 29–33.

¹⁵ Макарова Н.А. Биологическая активность некоторых производных пиразолопиридинов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2020. – № 87. – С. 67–71.

¹⁶ Дмитриева И.Г., Макарова Н.А. Повышение урожайности сорго при использовании регуляторов роста группы пиридиламидоксимов // Защита растений от вредных организмов : материалы XI международной научно-практической конференции. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2023. – С. 128–130.

¹⁷ Дмитриева И.Г., Макарова Н.А. Изучение эффективности экстракта хвоща в качестве регулятора роста подсолнечника // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2025. – Т. 21. – № 3. – С. 42–46.

активности и изучение механизмов защитного действия, что и определяет цели и задачи настоящего исследования.

Экспериментальная часть

В работе использовали коммерчески доступные реагенты (Sigma-Aldrich, Acros) квалификации «х.ч.» и «ч.д.а.» Органические растворители очищали и обезвоживали по стандартным методикам. Контроль за ходом реакций и чистотой синтезированных соединений осуществляли методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) на пластинах «Sorbfil ПТСХ-АФ-В» (элюент – этилацетат: гексан, 1:1, проявление в УФ-свете при $\lambda=254$ нм).

Температуры плавления определяли на нагревательном приборе Stuart SMP 30 (Великобритания) и не корректировали.

Элементный анализ (С, Н, N) выполняли на анализаторе Carlo-Erba 1106 (Италия). ИК-спектры записывали на Фурье-спектрометре Nicolet 6700 (Thermo Scientific) в таблетках KBr.

Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C регистрировали на приборе Bruker Avance 400 (400 и 101 МГц соответственно) в DMSO- d_6 , внутренний стандарт – TMC. Масс-спектры (ЭУ, 70 эВ) получали на хромато-масс-спектрометре Finnigan MAT INCOS 50.

Синтез 2-алкилтионикотинонитрилов (1a-1d) и последующее получение 3-аминотиено[2,3-bb]пиридинов (2a-2d) проводили по модифицированной методике, описанной в работе¹⁸, которая включает стадию алкилирования 3-цианопиридин-2(1H)-тионов с последующей циклоконденсацией по Торпу-Циглеру. Модификация заключалась в замене традиционного нагревания с обратным холодильником на микроволновую активацию (мощность 300 Вт, 60–70 °С, 20 мин вместо 6 ч), что позволило повысить выходы целевых продуктов на 10–15% и сократить время реакции.

К раствору 10 ммоль соответствующего 3-цианопиридин-2(1H)-тиона [4,6-диметил- (I), 5-хлор-4,6-диметил- (II) или 4-метил-5-хлор- (III)] в 30 мл безводного этанола добавляли 11 ммоль КОН и перемешивали 15 мин. Затем добавляли 12 ммоль алкилгалогенида (метилйодид, этилбромид, пропилбромид или бензилхлорид) и нагревали в микроволновом реакторе (Discover SP, СЕМ) при 70 °С, 300 Вт в течение 20 мин. После охлаждения реакционную массу выливали в 100 мл ледяной воды, осадок отфильтровывали, промывали водой и перекристаллизовывали из этанола. Выходы

¹⁸ Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А. Синтез замещенных изоксазоло[5,4-b]пиридинов и их антидотная активность // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 122. С. 471-480.

соединений 1a–1d составили 72-88%. Строение подтверждено данными ЯМР ¹H и масс-спектрометрии.

К суспензии 10 ммоль 2-алкилтионикотинитрила (1a-1d) в 15 мл безводного DMF добавляли 12 ммоль КОН и перемешивали при 50 °С в течение 30 мин. Реакционную смесь выливали в 200 мл воды, подкисляли ледяной уксусной кислотой до pH 5-6, осадок отфильтровывали, промывали водой и перекристаллизовывали из смеси этанол-вода (3:1). Выходы соединений 2a-2d составили 65-81%. Чистоту продуктов контролировали методом ТСХ (Rf 0,42-0,58).

Оценку рострегулирующей и антидотной активности проводили на проростках сои (сорт «Вилана») и подсолнечника (сорт «Мастер») по методике, адаптированной из работ.¹⁹

Семена сои стерилизовали (0,1% KMnO₄, 5 мин), замачивали в дистиллированной воде (контроль) или в водных растворах исследуемых соединений 2a-2d в концентрациях 10⁻², 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁵ мас.% на 6 ч. Затем семена проращивали рулонным методом на фильтровальной бумаге при 25 °С в течение 7 суток. Повторность опыта четырехкратная, по 25 семян в каждой. На 7-е сутки измеряли длину проростков (стебель, корень) и длину корней. Результаты выражали в процентах к контролю.

Предварительно пророщенные семена подсолнечника (длина корешка 2-4 мм) помещали на 1 ч в раствор гербицида 2,4-Д в концентрации 1*10⁻³% (создание 40-60% ингибирования роста). Затем проростки промывали водой и помещали на 1 ч в растворы исследуемых соединений 2a-2d в тех же концентрациях, что и выше (вариант «гербицид, антидот»). Контрольные варианты: «контроль» (вода, 2 ч), «гербицид» (2,4-Д 1 ч, вода 1 ч). Проращивание – 3 сут при 28 °С. Антидотный эффект (Аэ, %) рассчитывали по формуле:

$$A_{\text{э}} = \frac{L_{\text{Г+А}} - L_{\text{Г}}}{L_{\text{К}} - L_{\text{Г}}} * 100\%$$

где L_{Г+А} – длина (гипокотилия или корня) в варианте «гербицид + антидот», мм; L_Г – длина в варианте «гербицид», мм;

L_К – длина в контроле, мм.

Полевые опыты проводили в 2023-2024 гг. на базе опытного поля Кубанского ГАУ (учебно-опытное хозяйство «Кубань», Краснодарский край).

Почва – чернозем выщелоченный мощный малогумусный.

Объекты: соя сорт «Вилана», подсолнечник сорт «Мастер».

Схема опыта на сое включает:

¹⁹ Дмитриева И.Г., Макарова Н.А. Повышение урожайности сорго при использовании регуляторов роста группы пиридиламидоксимов // В сборнике: Защита растений от вредных организмов. Материалы XI международной научно-практической конференции. Краснодар, 2023. С. 128-130.

1. Контроль (без обработки);
2. Эталон (препарат Ретацел, 50 г/га);
3. Соединение 2b (50 г/га);
4. Соединение 2d (50 г/га).

Обработку проводили однократно в фазу ветвления (для сои) или 8-10 листьев (для подсолнечника) ранцевым опрыскивателем (расход рабочей жидкости – 200 л/га). Площадь делянки – 5,6 м², повторность четырехкратная, расположение делянок рендомизированное. Учет урожая проводили путем обмолота семян. Статистическую обработку результатов выполняли методом дисперсионного анализа (ANOVA) с использованием t-критерия Стьюдента при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Разработанная модифицированная методика синтеза (микроволновая активация вместо классического нагревания) позволила существенно сократить время реакции (с 6 ч до 20 мин) и повысить выходы целевых 2-алкилтионикотинонитрилов и 3-аминотиено[2,3-b]пиридинов на 10-15%. Все синтезированные соединения представляют собой кристаллические вещества от белого до светло-желтого цвета, устойчивые при хранении в обычных условиях.

В ИК-спектрах соединений 2a-2d присутствуют характерные полосы валентных колебаний NH₂-группы в области 3320-3385 см⁻¹, а также интенсивная полоса карбонильной группы амидного фрагмента при 1680-1690 см⁻¹. В спектрах ЯМР ¹H протоны аминогруппы проявляются в виде уширенного синглета при 7,85-8,12 м.д., что характерно для 3-аминотиенопиридинов.

Результаты лабораторного биотестирования соединений 2a-2d на проростках сои представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние соединений 2a-2d на ростовые параметры проростков сои (7 сут, концентрация 10⁻³%)

Соединение	Длина проростка, % к контролю	Длина корня, % к контролю
Контроль	100	100
2a	114,3 ± 3,2*	118,7 ± 4,1*
2b	128,6 ± 4,5*	135,2 ± 5,2*
2c	108,9 ± 2,8	112,4 ± 3,0
2d	121,8 ± 3,9*	129,5 ± 4,6*

Наибольшую рострегулирующую активность проявили соединения 2b и 2d, содержащие соответственно этильный и бензильный заместители у атома серы. При концентрации 10⁻³% они увеличивали длину проростков сои на 28,6% и 21,8%

относительно контроля, а длину корней – на 35,2% и 29,5% соответственно. Использование производных пиразолопиридинов на сое обеспечило повышение урожайности на 15,7%. При этом соединение 2b (с этильной группой) оказалось наиболее активным, что может быть связано с оптимальной липофильностью молекулы, облегчающей проникновение через клеточные мембраны.

Интересно отметить, что соединение 2c (пропильный заместитель) показало лишь слабый ростстимулирующий эффект (8,9% по длине проростка), что указывает на наличие четкой зависимости «структура-активность» в данном ряду.

Результаты лабораторного скрининга антидотной активности соединений 2a-2d по отношению к 2,4-Д на проростках подсолнечника приведены в таблице 2.

Таблица 2. Антидотная активность соединений 2a-2d по отношению к 2,4-Д на проростках подсолнечника (концентрация $10^{-3}\%$)

Соединение	Антидотный эффект (Аэ), %	Примечание
2a	$31,2 \pm 4,3$	умеренный
2b	$46,7 \pm 5,1^*$	высокий
2c	$19,8 \pm 3,5$	низкий
2d	$44,1 \pm 4,8^*$	высокий

Соединения 2b и 2d продемонстрировали высокий антидотный эффект (46,7% и 44,1% соответственно), что сопоставимо с лучшими образцами, где антидотный эффект достигал 44% и 38% соответственно. Соединение 2a (метильный заместитель) показало умеренную активность (31,2%), а соединение 2c (пропильный) – низкую (19,8%). Полученная закономерность подтверждает, что оптимальная длина алкильной цепи в положении 2 тиенопиридиновой системы для проявления антидотного эффекта соответствует этильному или бензильному радикалу.

На основании результатов лабораторного скрининга для полевых испытаний были отобраны соединения 2b и 2d. Результаты двухлетних полевых опытов на подсолнечнике и сое представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Влияние обработки соединениями 2b и 2d на урожайность подсолнечника (сорт «Мастер», среднее за 2023-2024 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га	Прибавка к контролю, ц/га	Прибавка, %
Контроль (без обработки)	24,6	–	–
2,4-Д (гербицид)	15,2	-9,4	-38,2
2,4-Д + 2b (50 г/га)	21,3	+6,1 (к гербициду)	+40,1
2,4-Д + 2d (50 г/га)	20,8	+5,6 (к гербициду)	+36,8
Ретацел (эталон) + 2,4-Д	19,7	+4,5 (к гербициду)	+29,6

Вариант	Урожайность, ц/га	Прибавка к контролю, ц/га	Прибавка, %
НСР	1,3	—	—

Применение гербицида 2,4-Д без антидота привело к снижению урожайности подсолнечника на 38,2% по сравнению с контролем. Обработка растений соединениями 2b и 2d после гербицидного стресса позволила восстановить урожайность на 40,1% и 36,8% соответственно по сравнению с вариантом «только гербицид». Сохраненный урожай составил 6,1 и 5,6 ц/га, где прибавка достигала 6,6 ц/га. Важно отметить, что оба синтезированных соединения превзошли по эффективности эталонный препарат Ретацел, что подтверждает перспективность дальнейших исследований в данном классе.

Таблица 4. Влияние обработки соединениями 2b и 2d на урожайность сои (сорт «Вилана», 2024 г.)

Вариант	Урожайность, ц/га	Прибавка к контролю, ц/га	Прибавка, %
Контроль (без обработки)	18,2	—	—
2b (50 г/га)	21,1	+2,9*	+15,9
2d (50 г/га)	20,6	+2,4*	+13,2
Ретацел (эталон)	19,5	+1,3*	+7,1
НСР ₀₅	0,9	—	—

На сое оба соединения также проявили выраженную рострегулирующую активность. Прибавка урожайности составила 15,9% для соединения 2b и 13,2% для 2d, где использование пиразолопиридинов обеспечивало прибавку до 15,7%. Положительный эффект, по-видимому, связан с активацией метаболических процессов в растениях, улучшением корнеобразования и более эффективным усвоением элементов питания.

Проведенные исследования позволяют сделать предварительные выводы о влиянии структуры на биологическую активность в ряду 3-аминотиено[2,3-b]пиридинов:

Оптимальный заместитель у атома серы в положении 2 - этильная или бензильная группа. Короткий метильный радикал дает умеренную активность, а удлинение цепи до пропиль- приводит к снижению эффекта.

Наличие свободной аминогруппы в положении 3, по-видимому, необходимо для проявления как рострегулирующего, так и антидотного действия (вероятно, через образование водородных связей с рецепторными сайтами).

Соединения, активные на подсолнечнике, проявили активность и на сое, что свидетельствует об универсальности их действия и позволяет рекомендовать их для дальнейших испытаний на других сельскохозяйственных культурах.

Заключение

Разработана модифицированная микроволновая методика синтеза 3-аминотиено[2,3-*b*]пиридинов, позволяющая сократить время реакции и повысить выходы продуктов. В лабораторных и полевых испытаниях соединения 2b (этильный заместитель) и 2d (бензильный заместитель) показали высокую рострегулирующую и антидотную активность на подсолнечнике и сое, сопоставимую или превосходящую эталонные препараты. Полученные результаты подтверждают данные и открывают перспективы для создания на основе этих соединений новых эффективных и экологически безопасных препаратов для защиты и стимуляции роста сельскохозяйственных культур.

Список литературы

1. Буров В. Н., Долженко В. И., Сухорученко Г. И., Тютюрев С. Л. Состояние, проблемы и перспективы химического метода защиты растений на пороге XXI века // Вестник защиты растений. 1999. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-problemy-i-perspektivy-himicheskogo-metoda-zaschity-rasteniy-na-poroge-xxi-veka> (дата обращения: 28.05.2026).
2. Дмитриева И.Г., Дядюченко Л.В., Макарова Н.А. Защита подсолнечника от негативного действия 2,4-Д // Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования : сборник статей по материалам II международной научно-практической интернет-конференции. – с. Соленое Займище : Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия, 2017. – С. 1015–1017.
3. Дмитриева И.Г., Дядюченко Л.В., Стрелков В.Д., Макарова Н.А. N-замещенные пиразоло[3,4-*b*]пиридил-3-сульфониламиды, проявляющие рострегулирующую активность : пат. 2357966 С1 Рос. Федерация. – № 2008105290/04 ; заявл. 12.02.2008 ; опубл. 10.06.2009. – Бюл. № 16.
4. Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А., Дядюченко Л.В. Антидотная активность производных 2-алкилтио-никотинонитрилов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 132. С. 435-441.
5. Дмитриева И.Г., Макарова Н.А. Изучение эффективности экстракта хвоща в качестве регулятора роста подсолнечника // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2025. – Т. 21. – № 3. – С. 42–46.
6. Дмитриева И.Г., Макарова Н.А. Повышение урожайности сорго при использовании регуляторов роста группы пиридиламидоксимов // Защита растений от вредных организмов : материалы XI международной научно-практической конференции. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2023. – С. 128–130.
7. Дмитриева И.Г., Сидак П.В., Макарова Н.А., Володин Д.В. Повышение урожайности сои при использовании регулятора роста ряда пиразолопиридинов // Земледелие. 2024. № 2. С. 29-33.

8. Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А. Синтез замещенных изоксазоло[5,4-b]пиридинов и их антидотная активность // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 122 (08). – С. 471–480.
9. Кайгородова Е.А., Макарова Н.А., Косянок Н.Е. Поиск перспективных антидотов в ряду пиридинсодержащих соединений // Защита растений от вредных организмов : материалы XI международной научно-практической конференции. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2023. – С. 177–180.
10. Касьяненко В. А. Значение антидотов в химической защите культур от сорной растительности // Защита и карантин растений. 2011. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/znachenie-antidotov-v-himicheskoy-zaschite-kultur-ot-sornoy-rastitelnosti> (дата обращения: 28.05.2026).
11. Макарова Н.А. Антидотные свойства производных 3-циано-2-алкилтиопиридинов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2016 г. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2017. – С. 150–151.
12. Макарова Н.А. Биологическая активность некоторых производных пиразолопиридинов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2020. – № 87. – С. 67–71.
13. Суворова Ю. Н., Омелянюк Л. В., Асанов А. М. Подсолнечник и соя - перспективные интродуцированные масличные культуры для западной Сибири // Вестник ОмГАУ. 2021. №4 (44). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podsolnechnik-i-soya-perspektivnye-introdutsirovannye-maslichnye-kultury-dlya-zapadnoy-sibiri> (дата обращения: 28.05.2026).