

## МИКРОБТЫ БИОПЕСТИЦИДТЕРДІҢ (*BACILLUS*, *TRICHODERMA*, *PSEUDOMONAS*) ӘСЕР ЕТУ МЕХАНИЗМДЕРІ

Қ. Қайратқызы, Ш.Е. Арыстанова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ.,

Қазақстан Республикасы

\*e-mail: kairatkyzy20@mail.ru

### Аңдатпа

Бұл шолу мақалада микробты биопестицидтердің негізгі топтары – *Bacillus*, *Trichoderma* және *Pseudomonas* туыстарына жататын микроағзалардың әсер ету механизмдері талданған. Шетелдік және отандық ғылыми зерттеулерге сүйене отырып, аталған микроағзалардың фитопатогендер мен зиянкестерге қарсы антагонистік, инсектицидтік және фунгицидтік белсенділігі қарастырылды. Микробты биопестицидтердің әсер ету механизмдері ретінде токсиндер мен антибиотиктер синтезі, микопаразитизм, гидролитикалық ферменттердің белсенділігі, қоректік ресурстар үшін бәсекелестік және өсімдіктің индуцирленген жүйелік төзімділігін белсендіру сипатталды. Сонымен қатар микробты биопестицидтердің экологиялық қауіпсіздігі, химиялық пестицидтермен салыстырғандағы артықшылықтары және ауыл шаруашылығында қолдану перспективалары көрсетілді. Жүргізілген шолу микробты биопестицидтердің тұрақты ауыл шаруашылығын дамытудағы маңызын айқындайды. Бұл шолу микробты биопестицидтерді тиімді қолдану стратегияларын әзірлеуге теориялық негіз бола алады.

**Түйінді сөздер:** микробты биопестицидтер, *Bacillus*, *Trichoderma*, *Pseudomonas*, биологиялық бақылау, әсер ету механизмдері, фитопатогендер.

**Кіріспе.** Қазіргі ауыл шаруашылығында өсімдіктердің аурулары мен зиянкестерін күресу үшін химиялық пестицидтер кеңінен қолданылып келеді. Алайда олардың ұзақ мерзімді қолданылуы экожүйелердің бұзылуына,

топырақ пен су ресурстарының ластануына, биологиялық әртүрліліктің төмендеуіне және адам денсаулығына кері әсер етуіне алып келетіні көптеген зерттеулерде көрсетілген [1–3]. Осыған байланысты соңғы онжылдықтарда экологиялық тұрғыдан қауіпсіз, биологиялық негізделген қорғау құралдарына деген қызығушылық айтарлықтай артты [4,5].

Биопестицидтер – тірі организмдерден немесе олардың метаболиттерінен алынатын, зиянкестер мен фитопатогендерді тежеуге бағытталған биологиялық агенттер [6]. Олардың ішінде микробты биопестицидтер ерекше орын алады. Әсіресе *Bacillus*, *Trichoderma* және *Pseudomonas* туыстарына жататын микроағзалар жоғары биологиялық белсенділігімен және кең спектрлі әсерімен ерекшеленеді [7–9].

Осы шолу мақаласының мақсаты – *Bacillus*, *Trichoderma* және *Pseudomonas* туыстарына жататын микроағзалар негізіндегі микробты биопестицидтердің әсер ету механизмдерін жүйелеу және олардың фитопатогендерге қарсы тиімділігін салыстырмалы түрде талдау.

**Материалдар мен әдістері.** Бұл шолулық жұмыста микробты биопестицидтердің (*Bacillus*, *Trichoderma*, *Pseudomonas*) өсімдік аурулары мен зиянкестеріне қарсы әсер ету механизмдері бойынша отандық және шетелдік ғылыми әдебиеттерге талдау жүргізілді. Әдеби дереккөздер Web of Science, Scopus, Google Scholar дерекқорларынан іріктелді. Талдауға соңғы жылдардағы рецензияланатын ғылыми журналдарда жарияланған мақалалар, монографиялар мен шолулық жұмыстар енгізілді.

Әдебиеттерді іріктеу кезінде микробты биопестицидтердің антагонистік белсенділігі, өсімдік иммунитетін индукциялау, биологиялық белсенді метаболиттер түзуі және ризосферадағы өзара әрекеттесу механизмдерін сипаттайтын еңбектерге басымдық берілді. Алынған деректер салыстырмалы-талдамалық және жүйелеу әдістері арқылы өңделіп, микробты агенттердің өсімдіктерді қорғаудағы рөлі кешенді түрде қарастырылды.

**Микробты биопестицидтерге жалпы сипаттама.** Микробты биопестицидтер – өсімдік зиянкестері мен фитопатогендерді тежеу немесе жою үшін қолданылатын тірі микроағзалар немесе олардың тіршілік әрекетінің өнімдеріне негізделген биологиялық қорғау құралдары. Бұл топқа негізінен бактериялар, саңырауқұлақтар және кейбір актиномицеттер жатады [10].

Әдеби деректерге сәйкес микробты биопестицидтерді қолданудың негізгі артықшылықтарына олардың селективтілігі, биологиялық ыдырауы, адам мен жануарлар үшін салыстырмалы түрде қауіпсіздігі, сондай-ақ зиянкестерде резистенттіліктің баяу дамуы жатады [6,11]. Химиялық пестицидтерден айырмашылығы, микробты агенттер тірі жүйе ретінде қоршаған орта факторларына бейімделе алады және патогендерге кешенді биологиялық әсер көрсетеді [12].

Микробты биопестицидтер әсер ету механизмі бойынша бір ғана жолмен емес, бірнеше биологиялық процестердің жиынтығы арқылы жұмыс істейді. Оларға тікелей антагонистік әсер, қоректік ресурстар мен тіршілік кеңістігі үшін бәсекелестік, антибиотиктер мен гидролитикалық ферменттер синтезі, паразитизм және өсімдіктің индуцирленген жүйелік төзімділігін (ISR) белсендіру жатады [13–15].

Микробты биопестицидтерді жіктеу микроағзалардың таксономиялық тиесілігіне және қолдану бағытына байланысты жүргізіледі. Таксономиялық тұрғыдан олар бактериялық (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*), саңырауқұлақтық (*Trichoderma*, *Beauveria*, *Metarhizium*)

және актиномицеттік биопестицидтерге бөлінеді [10].

#### **Нәтижелер мен талқылау.**

#### ***Bacillus* туысындағы биопестицидтердің әсер ету механизмдері**

*Bacillus* туысына жататын бактериялар микробты биопестицидтер арасында ең кең қолданылатын және жан-жақты зерттелген топтардың бірі болып табылады [16]. Бұл бактериялардың ауыл шаруашылығында кең таралуының негізгі себебі – олардың спора түзу қабілеті, экологиялық факторларға жоғары төзімділігі және әртүрлі биологиялық белсенді қосылыстарды синтездеу мүмкіндігі [17,18]. *Bacillus* негізіндегі биопрепараты топырақта, өсімдік бетінде және ризосферада ұзақ уақыт сақталып, фитопатогендерге қарсы тұрақты әсер көрсете алады.

*Bacillus* текті биопестицидтердің ең белгілі өкілі – *Bacillus thuringiensis*. Бұл бактерия инсектицидтік қасиетке ие  $\delta$ -эндотоксиндерді (Cry және Cyt ақуыздары) синтездейді. Cry токсиндері жәндіктердің асқорыту жүйесіне түскеннен кейін ішектің эпителиальды жасушаларындағы арнайы рецепторлармен байланысады, нәтижесінде жасуша мембранасында поралар түзіліп, иондық тепендік бұзылады және жәндік өледі [19,20]. Бұл механизм *B. thuringiensis*-тің жәндіктерге қарсы селективті және жоғары тиімді әсерін қамтамасыз етеді [21].

Инсектицидтік әсермен қатар, *Bacillus* spp. фитопатоген саңырауқұлақтар мен бактерияларға қарсы да жоғары антагонистік белсенділік көрсетеді. Олар липопептидтік антибиотиктердің бірнеше тобын, соның ішінде итуриндер, сурфактиндер және фенгициндерді синтездейді [22–24]. Бұл қосылыстар патогендердің жасуша мембранасының тұтастығын бұзып, олардың өсуін тежейді немесе толық жояды. Итруиндер көбіне саңырауқұлақтарға қарсы белсенді болса, фенгициндер фитопатогендердің кең спектріне әсер етеді, ал сурфактиндер мембрана өткізгіштігін арттырып, басқа антибиотиктердің әсерін күшейтеді [22,23].

*Bacillus* бактерияларының әсер ету механизмдерінің тағы бір маңызды бағыты – қоректік ресурстар мен тіршілік кеңістігі үшін бәсекелестік. Олар ризосферада жылдам көбейіп, фитопатогендерге қолайсыз микробиологиялық орта қалыптастырады [13]. Бұл құбылыс әсіресе топырақта таралатын ауру қоздырғыштарына қарсы күресте маңызды рөл атқарады.

Сонымен қатар бірқатар зерттеулер *Bacillus* spp. өсімдікте индуцирленген жүйелік төзімділікті (Induced Systemic Resistance, ISR) белсендендіретінін көрсетеді [25]. Бұл жағдайда бактериялар өсімдік тамырымен өзара әрекеттесіп, сигналдық молекулалар арқылы өсімдіктің қорғаныс гендерінің экспрессиясын арттырады. Нәтижесінде өсімдік әртүрлі патогендерге қарсы төзімді бола түседі, тіпті бактериялар тікелей әсер етпейтін ұлпаларда да қорғаныс реакциясы күшейеді.

#### ***Trichoderma* туысындағы саңырауқұлақтардың әсер ету механизмдері.**

*Trichoderma* туысына жататын саңырауқұлақтар микробты биопестицидтер ішінде фитопатоген саңырауқұлақтарға қарсы ең тиімді биобақылау агенттерінің бірі болып саналады [26,27]. Бұл микроағзалар топырақта кең таралған, ризосферада белсенді тіршілік етеді және өсімдіктермен тығыз экологиялық байланыс орнатады. *Trichoderma* негізіндегі биопрепараттар көптеген дақылдардың тамыр шірігі, солу және басқа да саңырауқұлақ текті ауруларына қарсы қолданылады.

*Trichoderma* текті биопестицидтердің негізгі әсер ету механизмі – мико-паразитизм. Бұл процесс барысында *Trichoderma* гифалары фитопатоген саңырауқұлақтың гифаларын таниды, оларға бағытталып өседі және тікелей жанасу орнатады. Әрі қарай арнайы гидролитикалық ферменттерді бөліп, патогеннің жасуша қабырғасы ыдырайды [28,29]. Микопаразитизм *Trichoderma*-ның көптеген топырақ патогендеріне қарсы жоғары тиімділігін қамтамасыз

ететін негізгі механизмдердің бірі болып табылады.

*Trichoderma* саңырауқұлақтары хитиназа,  $\beta$ -1,3-глюканаза, целлюлаза және протеаза секілді ферменттерді синтездейді. Бұл ферменттер фитопатогендердің жасуша қабырғасының негізгі құрылымдық компоненттерін бұзып, олардың өсуі мен дамуын тежейді [29,30]. Сонымен қатар ферменттік белсенділік патогендердің қорғаныс механизмдерін әлсіретіп, басқа антагонистік факторлардың әсерін күшейтеді.

Антибиоз *Trichoderma* әсер ету механизмдерінің тағы бір маңызды бағыты болып табылады. Әдеби деректерде *Trichoderma* штаммдарының әртүрлі антибиотиктер мен екінші реттік метаболиттерді, соның ішінде пептаиболдар, пирондар және ұшпа органикалық қосылыстарды синтездейтіні көрсетілген [31]. Бұл қосылыстар фитопатогендердің спора түзуін, гифалардың өсуін және инфекциялық қабілетін тежейді.

*Trichoderma* туысындағы саңырауқұлақтардың әсері тек патогендерді басумен шектелмейді. Бірқатар зерттеулер бұл микроағзалардың өсімдіктің өсуін ынталандыратынын және физиологиялық белсенділігін арттыратынын дәлелдейді [32,33].

Олар өсімдік тамыр жүйесінің дамуын жақсартып, қоректік элементтердің сіңуін күшейтеді, сонымен қатар фитогормондар мен гормон-тәрізді қосылыстарды синтездеуі мүмкін.

Сонымен қатар *Trichoderma* өсімдікте индуцирленген жүйелік төзімділікті (ISR) белсендендіреді. Бұл құбылыс өсімдіктің қорғаныс гендерінің экспрессиясының артуымен және әртүрлі биотикалық стресс факторларға қарсы төзімділіктің күшеюімен сипатталады [34]. Мұндай әсер *Trichoderma* қолданылған жағдайда аурулардың таралуын ұзақ мерзімді бақылауға мүмкіндік береді.

Шетелдік және отандық зерттеулер *Trichoderma* негізіндегі биопрепараттардың тиімділігі штамм ерекшеліктеріне, топырақ жағдайына және қолдану әдістеріне тәуелді екенін көрсетеді [35].

Осыған байланысты қазіргі уақытта жоғары антагонистік белсенділікке ие жергілікті штаммдарды іріктеу және оларды кешенді биопрепараттар құрамында пайдалану бағытында көптеген ғылыми жұмыстар жүргізілуде.

#### ***Pseudomonas* туысындағы биопестицидтердің әсер ету механизмдері.**

*Pseudomonas* туысына жататын бактериялар микробты биопестицидтер ішінде өсімдік ризосферасында белсенді тіршілік ететін және фитопатогендерге қарсы жоғары антагонистік қасиет көрсететін микроағзалар тобына жатады [36]. Әсіресе флуоресцентті *Pseudomonas* түрлері (мысалы, *P. fluorescens*, *P. putida*) өсімдіктерді биологиялық қорғауда кеңінен зерттеліп, практикалық қолданыс тапқан [37,38]. Бұл бактериялар тамыр аймағында жылдам колонизацияланып, фитопатогендерге қолайсыз микробиологиялық орта қалыптастырады.

*Pseudomonas* текті биопестицидтердің негізгі әсер ету механизмдерінің бірі – антибиотикалық қосылыстарды синтездеу. Әдеби деректерге сәйкес, бұл бактериялар феназиндер, пиролниктин, пиолотеин және 2,4-диацетилфлороглюцинол (2,4-DAPG) секілді биологиялық белсенді заттарды өндіреді [39,40]. Аталған қосылыстар фитопатоген саңырауқұлақтар мен бактериялардың жасушалық процестерін бұзып, олардың өсуі мен дамуын тежейді. Әсіресе 2,4-DAPG көптеген топырақ патогендеріне қарсы жоғары фунгицидтік әсер көрсетеді [40].

*Pseudomonas* бактерияларының тағы бір маңызды әсер ету механизмі – сидерофорлар түзу арқылы темір элементі үшін бәсекелестік жүргізу. Сидерофорлар қоршаған ортадағы темір иондарын берік байланыстырып, фитопатогендер үшін темірдің қолжетімділігін төмендетеді [41]. Темірдің жетіспеушілігі патогендердің метаболизміне кері әсер етіп, олардың вируленттілігін әлсіретеді. Бұл механизм ризосфера жағдайында *Pseudomonas* штаммдарының бәсекелестік артықшылығын қамтамасыз етеді.

Сонымен қатар *Pseudomonas spp.* өсімдік тамыры бетінде биоқабықша түзу қабілетіне ие. Биоқабықшалар бактериялардың тамыр аймағында тұрақты

бекінуіне мүмкіндік беріп, фитопатогендердің колонизациясын шектейді [42]. Биоқабықшалар арқылы түзілген микробиологиялық қауымдастық өсімдік пен микроағза арасындағы өзара әрекеттесуді күшейтіп, ұзақ мерзімді қорғау әсерін қалыптастырады.

*Pseudomonas* туысты бактериялардың әсер ету механизмдерінің тағы бір маңызды бағыты – өсімдікте индуцирленген жүйелік төзімділікті (ISR) белсендіру. Бұл процесс барысында бактериялар өсімдік тамыры арқылы сигналдық молекулалар бөліп шығарып, өсімдіктің қорғаныс гендерінің экспрессиясын арттырады [14,15]. Нәтижесінде өсімдік әртүрлі фитопатогендерге және кейбір абиотикалық стресс факторларға қарсы төзімді бола түседі.

Жалпы алғанда, *Pseudomonas* туысты микробты биопестицидтер антибиотикалық белсенділік, ресурстар үшін бәсекелестік, биоқабықша түзу және өсімдіктің қорғаныс жүйесін индукциялау сияқты бірнеше әсер ету механизмдерінің үйлесуі арқылы фитопатогендерге қарсы жоғары тиімділік көрсетеді. Бұл оларды ауыл шаруашылығында экологиялық қауіпсіз және перспективалы биологиялық қорғау агенттері ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

#### **Микробты биопестицидтердің салыстырмалы талдауы.**

Әртүрлі зерттеулерде *Bacillus*, *Trichoderma* және *Pseudomonas* туыстарына жататын микробты биопестицидтердің тиімділігі салыстырмалы түрде бағаланған. *Bacillus* негізіндегі биопрепараттар инсектицидтік және фунгицидтік әсерімен сипатталып, олардың спора түзу қабілеті препараттардың сақтау тұрақтылығын арттыратыны көрсетілген [43]. Сонымен қатар липопептидтік антибиотиктердің (итурин, сурфактин, фенгицин) кешенді әсері фитопатогендердің кең спектрін тежеуге мүмкіндік беретіні анықталған [44].

*Trichoderma* туысты саңырауқұлақтардың фитопатогендерге қарсы тиімділігі микопаразитизм, гидролитикалық ферменттер белсенділігі және өсімдікте индуцирленген жүйелік төзімділікті белсендірумен байланысты екені дәлелденген [45,46].

Бұл микроағзалардың өсімдік имундық жүйесінің реттелуіне ықпал ететіні де бірқатар зерттеулерде көрсетілген.

*Pseudomonas* туысты бактериялар ризосферада тұрақты колонизацияланып, антибиотикалық қосылыстар мен сидерофорлар арқылы фитопатогендердің дамуын шектеуге қабілетті екені анықталған [47,48]. Сонымен қатар бұл бактериялардың өсімдік өсуін ынталандыратын қосымша әсері бар екені көрсетілген.

Жалпы алғанда, микробты биопестицидтердің салыстырмалы тиімділігі олардың әсер ету механизмдерінің көпқырлылығына, қолдану жағдайларына және штамм ерекшеліктеріне тәуелді екені көрсетіледі. Осыған байланысты микробты агенттерді біріктіріп қолдану және аймақтық жағдайларға бейімделген штаммдарды пайдалану тиімді бағыт ретінде қарастырылады [49].

**Қорытынды.** Жүргізілген әдеби шолу микробты биопестицидтердің ауыл шаруашылығында экологиялық қауіпсіз және тиімді өсімдіктерді қорғау құралы екенін айқын көрсетеді. *Bacillus*, *Trichoderma* және *Pseudomonas* туыстарына жататын микроағзалар әртүрлі биологиялық механизмдер арқылы фитопатогендер мен зиянкестердің дамуын тежейді және агроэкожүйелердің табиғи тепе-теңдігін сақтауға ықпал етеді [50].

Микробты биопестицидтерді интеграцияланған өсімдіктерді қорғау жүйелерінде қолдану химиялық пестицидтерге тәуелділікті азайтып, ауыл шаруашылығы өнімдерінің экологиялық қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді. Болашақта жоғары белсенді және жергілікті экологиялық жағдайларға бейімделген штаммдарды іріктеу, микробты биопрепараттардың тұрақты формуляцияларын әзірлеу және олардың әсер ету механизмдерін молекулалық деңгейде зерттеу микробты биопестицидтерді тиімді қолданудың негізгі бағыттары болып қала береді.

Бұл бағыттағы зерттеулер отандық микробты биопрепараттарды әзірлеуге

және оларды интеграцияланған өсімдіктерді қорғау жүйелеріне енгізуге негіз бола алады.

### **Пайдаланылған әдебиеттер тізімі**

1. Pimentel D., Burgess M. *Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States // Integrated Pest Management.* – 2014. – Vol. 3. – P. 47–71.

2. Damalas C.A., Eleftherohorinos I.G. *Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators // International Journal of Environmental Research and Public Health.* – 2011. – Vol. 8. – P. 1402–1419.

3. Aktar M.W., Sengupta D., Chowdhury A. *Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards // Interdisciplinary Toxicology.* – 2009. – Vol. 2, № 1. – P. 1–12.

4. Copping L.G., Menn J.J. *Biopesticides: a review of their action, applications and efficacy // Pest Management Science.* – 2000. – Vol. 56. – P. 651–676.

5. Gupta S., Dikshit A.K. *Biopesticides: an ecofriendly approach for pest control // Journal of Biopesticides.* – 2010. – Vol. 3. – P. 186–188.

6. Glare T., Caradus J., Gelernter W. et al. *Have biopesticides come of age? // Trends in Biotechnology.* – 2012. – Vol. 30, № 5. – P. 250–258.

7. Verma M.L. et al. *Microbial production of biopesticides for sustainable agriculture // Sustainability.* – 2024. – Vol. 16, № 17. – Article 7496.

8. Cai P., Dimopoulos G. *Microbial biopesticides: a One Health perspective on benefits and risks // One Health.* – 2024. – Vol. 18. – Article 100288.

9. Tiwari R.K.S. et al. *Microbial biopesticides: an eco-friendly plant protection measure // Environmental Research.* – 2024. – Vol. 242. – Article 117590.

10. Cook R.J., Baker K.F. *The Nature and Practice of Biological Control of Plant Pathogens.* – St. Paul : APS Press, 1983.

11. Harman G.E. *Overview of mechanisms and uses of Trichoderma spp. // Phytopathology.* – 2006. – Vol. 96. – P. 190–194.

12. Vinale F. et al. *Trichoderma*–plant–pathogen interactions // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2008. – Vol. 40. – P. 1–10.
13. Compant S., Duffy B., Nowak J. et al. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2005. – Vol. 71. – P. 4951–4959.
14. Köhl J., Kolnaar R., Ravensberg W.J. Mode of action of microbial biological control agents // *BioControl*. – 2019. – Vol. 64. – P. 1–19.
15. Abdullaeva N.K. et al. Antagonistic activity of *Bacillus* and *Pseudomonas* strains against phytopathogens // *Agricultural Biology*. – 2022. – Vol. 57, № 4. – P. 812–823.
16. Karimova G.A. Biological control of plant diseases using microbial preparations // *Plant Protection*. – 2021. – № 3. – P. 25–31.
17. Emmert E.A.B., Handelsman J. Biocontrol of plant disease: a (Gram-) positive perspective // *FEMS Microbiology Letters*. – 1999. – Vol. 171. – P. 1–9.
18. Nicholson W.L. Roles of *Bacillus* endospores in the environment // *Cellular and Molecular Life Sciences*. – 2002. – Vol. 59. – P. 410–416.
19. Schnepf E. et al. *Bacillus thuringiensis* and its pesticidal crystal proteins // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 1998. – Vol. 62. – P. 775–806.
20. Bravo A., Gill S.S., Soberón M. Mode of action of *Bacillus thuringiensis* Cry and Cyt toxins // *Toxicon*. – 2007. – Vol. 49. – P. 423–435.
21. Raymond B. et al. *Bacillus thuringiensis*: an impotent pathogen? // *Trends in Microbiology*. – 2010. – Vol. 18. – P. 189–194.
22. Ongena M., Jacques P. *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol // *Trends in Microbiology*. – 2008. – Vol. 16. – P. 115–125.
23. Romero D., de Vicente A., Rako-toaly R.H. et al. The iturin and fengycin families of lipopeptides // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2007. – Vol. 73. – P. 1606–1614.
24. Stein T. *Bacillus subtilis* antibiotics: structures, syntheses and specific functions // *Molecular Microbiology*. – 2005. – Vol. 56. – P. 845–857.
25. Kloepper J.W., Ryu C.M., Zhang S. Induced systemic resistance and promotion of plant growth // *Phytopathology*. – 2004. – Vol. 94. – P. 1259–1266.
26. Druzhinina I.S. et al. *Trichoderma*: the genomics of opportunistic success // *Nature Reviews Microbiology*. – 2011. – Vol. 9. – P. 749–759.
27. Howell C.R. Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases // *Plant Disease*. – 2003. – Vol. 87. – P. 4–10.
28. Lorito M. et al. Chitinolytic enzymes produced by *Trichoderma* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 1998. – Vol. 50. – P. 293–300.
29. Harman G.E. et al. *Trichoderma* species—opportunistic, avirulent plant symbionts // *Nature Reviews Microbiology*. – 2004. – Vol. 2. – P. 43–56.
30. Mukherjee P.K. et al. *Trichoderma* metabolites in plant disease control // *Phytochemistry*. – 2012. – Vol. 90. – P. 1–13.
31. Shores M., Harman G.E., Mastouri F. Induced systemic resistance and plant responses // *Plant Physiology*. – 2010. – Vol. 154. – P. 136–146.
32. Contreras-Cornejo H.A. et al. *Trichoderma*-induced plant growth promotion // *Microbiological Research*. – 2009. – Vol. 164. – P. 287–296.
33. Mastouri F., Björkman T., Harman G.E. Seed treatment with *Trichoderma* // *Plant Disease*. – 2010. – Vol. 94. – P. 1033–1041.
34. Weller D.M. *Pseudomonas* biocontrol agents // *Annual Review of Phytopathology*. – 2007. – Vol. 45. – P. 309–332.
35. Haas D., Défago G. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads // *Nature Reviews Microbiology*. – 2005. – Vol. 3. – P. 307–319.
36. Raaijmakers J.M., Mazzola M. Diversity and natural functions of antibiotics produced by beneficial bacteria // *Annual Review of Phytopathology*. – 2012. – Vol. 50. – P. 403–424.
37. Kloepper J.W. et al. Role of siderophores in plant disease suppression // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1980. – Vol. 40. – P. 785–792.

38. Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria // *Annual Review of Microbiology*. – 2009. – Vol. 63. – P. 541–556.

39. Pieterse C.M.J. et al. Induced systemic resistance by beneficial microbes // *Annual Review of Phytopathology*. – 2014. – Vol. 52. – P. 347–375.

46. Harman G.E., Doni F., Khadka R.B., Uphoff N. Endophytic strains of *Trichoderma*: mechanisms and applications // *Journal of Fungi*. – 2021. – Vol. 7, № 3. – P. 1–20.

47. Raaijmakers J.M., Kiers E.T. Microbial biopesticides and plant–microbe interactions in the rhizosphere // *Annual Review of Phytopathology*. – 2022. – Vol. 60. – P. 453–476.

48. Olanrewaju O.S., Glick B.R., Babalola O.O. Mechanisms of action of *Pseudomonas* in plant growth promotion and biocontrol // *Rhizosphere*. – 2023. – Vol. 25. – Article 100613.

49. Marrone P.G. Integrated use of microbial biopesticides // *Journal of Pest Science*. – 2023. – Vol. 96. – P. 135–149.

50. Keswani C. et al. Bioformulations for sustainable agriculture // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – Article 180.

### References

1. Pimentel D., Burgess M. Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States // *Integrated Pest Management*. – 2014. – Vol. 3. – P. 47–71.

2. Damalas C.A., Eleftherohorinos I.G. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2011. – Vol. 8. – P. 1402–1419.

3. Aktar M.W., Sengupta D., Chowdhury A. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards // *Interdisciplinary Toxicology*. – 2009. – Vol. 2, № 1. – P. 1–12.

4. Copping L.G., Menn J.J. Biopesticides: a review of their action, applications and efficacy // *Pest Management Science*. – 2000. – Vol. 56. – P. 651–676.

5. Gupta S., Dikshit A.K. Biopesticides: an ecofriendly approach for pest control // *Journal of Biopesticides*. – 2010.

– Vol. 3. – P. 186–188.

6. Glare T., Caradus J., Gelernter W. et al. Have biopesticides come of age? // *Trends in Biotechnology*. – 2012. – Vol. 30, № 5. – P. 250–258.

7. Verma M.L. et al. Microbial production of biopesticides for sustainable agriculture // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, № 17. – Article 7496.

8. Cai P., Dimopoulos G. Microbial biopesticides: a One Health perspective on benefits and risks // *One Health*. – 2024. – Vol. 18. – Article 100288.

9. Tiwari R.K.S. et al. Microbial biopesticides: an eco-friendly plant protection measure // *Environmental Research*. – 2024. – Vol. 242. – Article 117590.

10. Cook R.J., Baker K.F. *The Nature and Practice of Biological Control of Plant Pathogens*. – St. Paul : APS Press, 1983.

11. Harman G.E. Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. // *Phytopathology*. – 2006. – Vol. 96. – P. 190–194.

12. Vinale F. et al. *Trichoderma*–plant–pathogen interactions // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2008. – Vol. 40. – P. 1–10.

13. Compant S., Duffy B., Nowak J. et al. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2005. – Vol. 71. – P. 4951–4959.

14. Köhl J., Kolnaar R., Ravensberg W.J. Mode of action of microbial biological control agents // *BioControl*. – 2019. – Vol. 64. – P. 1–19.

15. Abdullaeva N.K. et al. Antagonistic activity of *Bacillus* and *Pseudomonas* strains against phytopathogens // *Agricultural Biology*. – 2022. – Vol. 57, № 4. – P. 812–823.

16. Karimova G.A. Biological control of plant diseases using microbial preparations // *Plant Protection*. – 2021. – № 3. – P. 25–31.

17. Emmert E.A.B., Handelsman J. Biocontrol of plant disease: a (Gram-) positive perspective // *FEMS Microbiology Letters*. – 1999. – Vol. 171. – P. 1–9.

18. Nicholson W.L. Roles of *Bacillus* endospores in the environment // *Cellular and Molecular Life Sciences*. – 2002. – Vol. 59. – P. 410–416.

19. Schnepf E. et al. *Bacillus thuringiensis* and its pesticidal crystal proteins // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 1998. – Vol. 62. – P. 775–806.
20. Bravo A., Gill S.S., Soberón M. Mode of action of *Bacillus thuringiensis* Cry and Cyt toxins // *Toxicon*. – 2007. – Vol. 49. – P. 423–435.
21. Raymond B. et al. *Bacillus thuringiensis*: an impotent pathogen? // *Trends in Microbiology*. – 2010. – Vol. 18. – P. 189–194.
22. Ongena M., Jacques P. *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol // *Trends in Microbiology*. – 2008. – Vol. 16. – P. 115–125.
23. Romero D., de Vicente A., Rakoatoly R.H. et al. The iturin and fengycin families of lipopeptides // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2007. – Vol. 73. – P. 1606–1614.
24. Stein T. *Bacillus subtilis* antibiotics: structures, syntheses and specific functions // *Molecular Microbiology*. – 2005. – Vol. 56. – P. 845–857.
25. Kloepper J.W., Ryu C.M., Zhang S. Induced systemic resistance and promotion of plant growth // *Phytopathology*. – 2004. – Vol. 94. – P. 1259–1266.
26. Druzhinina I.S. et al. *Trichoderma*: the genomics of opportunistic success // *Nature Reviews Microbiology*. – 2011. – Vol. 9. – P. 749–759.
27. Howell C.R. Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases // *Plant Disease*. – 2003. – Vol. 87. – P. 4–10.
28. Lorito M. et al. Chitinolytic enzymes produced by *Trichoderma* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 1998. – Vol. 50. – P. 293–300.
29. Harman G.E. et al. *Trichoderma* species—opportunistic, avirulent plant symbionts // *Nature Reviews Microbiology*. – 2004. – Vol. 2. – P. 43–56.
30. Mukherjee P.K. et al. *Trichoderma* metabolites in plant disease control // *Phytochemistry*. – 2012. – Vol. 90. – P. 1–13.
31. Shores M., Harman G.E., Mastouri F. Induced systemic resistance and plant responses // *Plant Physiology*. – 2010. – Vol. 154. – P. 136–146.
32. Contreras-Cornejo H.A. et al. *Trichoderma*-induced plant growth promotion // *Microbiological Research*. – 2009. – Vol. 164. – P. 287–296.
33. Mastouri F., Björkman T., Harman G.E. Seed treatment with *Trichoderma* // *Plant Disease*. – 2010. – Vol. 94. – P. 1033–1041.
34. Weller D.M. *Pseudomonas* biocontrol agents // *Annual Review of Phytopathology*. – 2007. – Vol. 45. – P. 309–332.
35. Haas D., Défago G. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent *pseudomonads* // *Nature Reviews Microbiology*. – 2005. – Vol. 3. – P. 307–319.
36. Raaijmakers J.M., Mazzola M. Diversity and natural functions of antibiotics produced by beneficial bacteria // *Annual Review of Phytopathology*. – 2012. – Vol. 50. – P. 403–424.
37. Kloepper J.W. et al. Role of siderophores in plant disease suppression // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1980. – Vol. 40. – P. 785–792.
38. Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria // *Annual Review of Microbiology*. – 2009. – Vol. 63. – P. 541–556.
39. Pieterse C.M.J. et al. Induced systemic resistance by beneficial microbes // *Annual Review of Phytopathology*. – 2014. – Vol. 52. – P. 347–375.
40. Van Loon L.C., Bakker P.A.H.M., Pieterse C.M.J. Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria // *Annual Review of Phytopathology*. – 1998. – Vol. 36. – P. 453–483.
41. Ravensberg W.J. *A Roadmap to the Successful Development and Commercialization of Microbial Pest Control Products*. – Springer, 2011.
42. Marrone P.G. The market and potential for biopesticides // *Journal of Pest Science*. – 2014. – Vol. 87. – P. 27–35.
43. Verma M.L., Brar S.K., Tyagi R.D. Microbial biopesticides for sustainable agriculture: recent advances // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13, № 9. – P. 1–23.
44. Keswani C., Singh H.B., García-Estrada C. et al. Antimicrobial secondary metabolites from *Bacillus* spp. in plant disease control // *Frontiers in Microbiology*. – 2022. – Vol. 13. – Article 903345.
45. Woo S.L., Ruocco M., Vinale F. et al. *Trichoderma*-based products and their role in sustainable agriculture // *Biological Control*. – 2021. – Vol. 161. – Article 104689.

46. Harman G.E., Doni F., Khadka R.B., Uphoff N. Endophytic strains of *Trichoderma*: mechanisms and applications // *Journal of Fungi*. – 2021. – Vol. 7, № 3. – P. 1–20.

47. Raaijmakers J.M., Kiers E.T. Microbial biopesticides and plant–microbe interactions in the rhizosphere // *Annual Review of Phytopathology*. – 2022. – Vol. 60. – P. 453–476.

48. Olanrewaju O.S., Glick B.R., Babalola O.O. Mechanisms of action of *Pseudomonas* in plant growth promotion and biocontrol // *Rhizosphere*. – 2023. – Vol. 25. – Article 100613.

49. Marrone P.G. Integrated use of microbial biopesticides // *Journal of Pest Science*. – 2023. – Vol. 96. – P. 135–149.

50. Keswani C. et al. Bioformulations for sustainable agriculture // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – Article 180.

**Материал баспаға 15.12.25 түсті**

**Механизмы действия микробных биопестицидов (*Bacillus*, *Trichoderma*, *Pseudomonas*)**

**Аннотация**

В данной обзорной статье рассмотрены основные механизмы действия микробных биопестицидов на основе микроорганизмов родов *Bacillus*, *Trichoderma* и *Pseudomonas*. На основе анализа зарубежных и отечественных научных источников охарактеризованы их антагонистическая, инсектицидная и фунгицидная активность в отношении фитопатогенов и вредителей сельскохозяйственных культур. Показано, что микробные биопестициды реализуют свое действие за счет синтеза токсинов и антибиотических соединений, микопаразитизма, активности гидролитических ферментов, конкуренции за питательные ресурсы, а также индукции системной устойчивости растений. Отмечены экологические преимущества микробных биопестицидов и перспективы их применения в интегрированных системах защиты растений.

Результаты обзора подтверждают высокую значимость микробных биопестицидов для устойчивого развития сельского хозяйства. Данный обзор может служить теоретической основой для разработки стратегий эффективного применения микробных биопестицидов.

**Ключевые слова:** микробные биопестициды, *Bacillus*, *Trichoderma*, *Pseudomonas*, биологическая защита растений, механизмы действия, фитопатогены.

**Материал поступил в редакцию**

**15.12.2025**

**Mechanisms of Action of Microbial Biopesticides (*Bacillus*, *Trichoderma*, *Pseudomonas*)**

**Summary**

This review article analyzes the main mechanisms of action of microbial biopesticides based on microorganisms of the genera *Bacillus*, *Trichoderma*, and *Pseudomonas*. Based on domestic and international scientific literature, the antagonistic, insecticidal, and fungicidal activities of these microorganisms against phytopathogens and agricultural pests are discussed. The principal mechanisms of microbial biopesticides include the production of toxins and antibiotic compounds, mycoparasitism, hydrolytic enzyme activity, competition for nutrients, and the induction of systemic resistance in plants. The ecological safety of microbial biopesticides, their advantages over chemical pesticides, and their prospects for application in sustainable agriculture are also highlighted. The review demonstrates the significant role of microbial biopesticides in the development of environmentally friendly plant protection strategies. This review can serve as a theoretical basis for the development of strategies for the effective application of microbial biopesticides.

**Keywords:** microbial biopesticides, *Bacillus*, *Trichoderma*, *Pseudomonas*, biological control, mechanisms of action, phytopathogens.

**Material received on 15.12.2025**

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.