

УДК 632.937.2

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-396-07-137-145

Р.И. Тараканов<sup>1</sup> ✉П.В. Евсеев<sup>2</sup>С.И. Чебаненко<sup>1</sup>О.А. Савоськина<sup>1</sup>О.Г. Каратаева<sup>1</sup>К.М. Воробьев<sup>1</sup>Ф.С.-У. Джалилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

✉ r.tarakanov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию: 13.04.2025

Одобрена после рецензирования: 11.06.2025

Принята к публикации: 26.06.2025

© Тараканов Р.И., Евсеев П.В., Чебаненко С.И., Савоськина О.А., Каратаева О.Г., Воробьев К.М., Джалилов Ф.С.-У.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-396-07-137-145

Rashit I. Tarakanov<sup>1</sup> ✉Peter V. Evseev<sup>2</sup>Svetlana I. Chebanenko<sup>1</sup>Olga A. Savoskina<sup>1</sup>Oksana G. Karatayeva<sup>1</sup>Kirill M. Vorobyov<sup>1</sup>Fevzi S.-U. Dzhaliyov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia.

<sup>2</sup>Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

✉ r.tarakanov@rgau-msha.ru

Received by the editorial office: 13.04.2025

Accepted in revised: 11.06.2025

Accepted for publication: 26.06.2025

© Tarakanov R.I., Evseev P.V., Chebanenko S.I., Savoskina O.A., Karataeva O.G., Vorobyov K.M., Dzhaliyov F.S.-U.

# Температурная зависимость активности нового бактериофага в отношении возбудителя сосудистого бактериоза капусты *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*

## РЕЗЮМЕ

Сосудистый бактериоз капусты, вызываемый грамотрицательной бактерией *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (Хсс), остается значительной угрозой для выращивания капустных, особенно в условиях ужесточения ограничений на применение химических средств защиты растений. В работе представлены результаты характеристики нового бактериофага Murka, активного против 64,3% исследованных штаммов возбудителя, включая циркулирующие в Центральной Европе и России. Модельные эксперименты в мультиканальном биореакторе позволили определить температурную зависимость взаимодействия фага и бактерии в диапазоне 15–45 °С. Установлено, что наибольшая литическая активность и накопление фаговых частиц достигаются при температуре культивирования 20–30 °С. Это указывает на перспективность применения фага Murka в различных климатических зонах. Фаг проявил устойчивость к хлороформу, стабильность в диапазоне pH 6–10 и утрату активности при температурах выше 50 °С. Морфологически Murka относится к роду *Mioviruses*, генетически — к роду *Foxunavirus*. Геном фага длиной 43 277 п. о. содержит 83 ORF-гена, из которых 41 с предполагаемой функцией, а 42 — гипотетические белки. Дополнительные испытания показали, что даже при температурных колебаниях фаг способен эффективно контролировать рост бактерии. Особое внимание уделено возможности использования фага на ранних этапах вегетации растений, например при предпосевной обработке семян, когда условия способствуют максимальной стабильности и эффективности фаготерапии. В дальнейшем планируется проведение *in planta* испытаний в условиях открытого грунта, что позволит определить оптимальные регламенты применения и интеграцию применения фага в комплексную систему защиты капусты от сосудистого бактериоза.

**Ключевые слова:** *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, бактериофаг, сосудистый бактериоз, капуста, биоконтроль, температура, *Foxunavirus*

**Для цитирования:** Тараканов Р.И., Евсеев П.В., Чебаненко С.И., Савоськина О.А., Каратаева О.Г., Воробьев К.М., Джалилов Ф.С.-У. Температурная зависимость активности нового бактериофага в отношении возбудителя сосудистого бактериоза капусты *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Аграрная наука*. 2025; 396(07): 137–145. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-137-145>

# Temperature dependence of the activity of a new bacteriophage against the causative agent of black rot of cabbage *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*

## ABSTRACT

Vascular bacteriosis of cabbage caused by the Gram-negative bacterium *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* remains a significant threat to cabbage cultivation, especially in the context of stricter restrictions on the use of chemical plant protection products. The paper presents the results of characterization of the new Murka bacteriophage, which is active against 64.3% of the studied strains of the pathogen, including those circulating in Central Europe and Russia. Model experiments in a multi-channel bioreactor allowed us to determine the temperature dependence of the phage-bacterium interaction in the range of 15–45 °C. It was found that the greatest lytic activity and accumulation of phage particles are achieved at a culture temperature of 20–30 °C. This indicates the promising use of the Murka phage in various climatic zones. The phage showed resistance to chloroform, stability in the pH range of 6–10, and loss of activity at temperatures above 50 °C. Morphologically, Murka belongs to the genus *Mioviruses*, genetically to the genus *Foxunavirus*. The 43,277 bp long phage genome contains 83 ORF genes, of which 41 have a proposed function, and 42 are hypothetical proteins. Additional tests have shown that even with temperature fluctuations, the phage is able to effectively control bacterial growth. Special attention is paid to the possibility of using phage in the early stages of plant vegetation, for example, during pre-sowing seed treatment, when conditions contribute to maximum stability and effectiveness of phage therapy. In the future, it is planned to conduct *in-planta* tests in open ground conditions, which will determine the optimal regulations for the use and integration of phage use into a comprehensive cabbage protection system against vascular bacteriosis.

**Key words:** *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, bacteriophage, black rot, cabbage, biocontrol, temperature, *Foxunavirus*

**For citation:** Tarakanov R.I., Evseev P.V., Chebanenko S.I., Savoskina O.A. *et al.* Temperature dependence of the activity of a new bacteriophage against the causative agent of black rot of cabbage *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Agrarian science*. 2025; 396(07): 137–145 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-137-145>

## Введение/Introduction

Сосудистый бактериоз капусты, вызываемый бактерией *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (далее — Хсс), является одним из наиболее экономически значимых заболеваний капустных культур в мире, особенно в регионах с теплым и влажным климатом [1]. Патоген поражает сосудистую систему растения, вызывая хлороз, увядание и гибель надземных органов, что значительно снижает урожайность и товарные качества продукции [2]. Проблема усугубляется локализацией патогена внутри тканей растения, высокой устойчивостью патогена к ряду химических средств защиты растений, а также отсутствием универсальных сортов с устойчивостью к различным расам Хсс. В последние годы интерес к биологическим методам защиты растений значительно возрос, что связано как с ужесточением норм по применению пестицидов, так и с ростом резистентности возбудителей к традиционным средствам защиты растений [3].

В условиях усиливающихся ограничений на использование пестицидов в растениеводстве особую актуальность приобретают экологически безопасные методы борьбы с бактериальными болезнями, такие как использование бактериофагов — вирусов, избирательно поражающих бактериальные клетки [4]. Применение бактериофагов как элемента интегрированной системы защиты растений рассматривается как перспективный подход, однако остается недостаточно изученным.

Несмотря на ряд успешных примеров использования фагов в защите сои [5], картофеля и других культур, количество работ, посвященных именно фагам возбудителя сосудистого бактериоза капусты, ограничено. Holtappels *et al.* (2022) охарактеризовали новые Хсс-фаги — FoX2 и FoX6, указав на их потенциал как агентов биоконтроля патогена [6]. Weiss *et al.* (1994) описали фаг ХТР1, однако, кроме характеристики биологических особенностей, дальнейшего анализа не проводили [7]. Большинство опубликованных данных носят фундаментальный характер и не учитывают таких критически важных факторов, как температурные колебания в условиях открытого грунта и их влияние на взаимодействие в системе «фаг — бактерия».

Фаги обладают высокой специфичностью к микробной клетке и, проходя репродукцию в ней, не влияют на растения и окружающую среду [5]. Тем не менее эффективность фаготерапии в полевых условиях зависит от множества факторов, среди которых ключевыми являются температура, влажность, УФ-излучение и pH окружающей среды. В отличие от медицинских и ветеринарных объектов, где температура организма-хозяина стабильна, применение фагов в растениеводстве требует учета широких температурных колебаний, особенно при выращивании растений в открытом грунте [8].

Температура оказывает прямое влияние на скорость роста бактерий, активность фагов и

эффективность лизиса [4]. С другой стороны, температурный диапазон в агроценозах варьирует от 10 до 50 °С, и биопрепараты, предназначенные для полевых условий, должны демонстрировать устойчивость к таким колебаниям. В связи с этим возникает необходимость в исследовании температурной зависимости кинетики фаг-бактериального взаимодействия с целью оптимизации условий применения бактериофагов.

*Цель работы* — изучение влияния температуры на активность нового Хсс-фага Murka.

## Материалы и методы исследования / Materials and methods

*Штаммы бактерий.* Штаммы Хсс были выделены из растений семейства капустных (цветная и белокочанная капуста из России, Молдовы, Украины, Беларуси и Нидерландов) и пастушьей сумки (из Японии) с визуальными признаками сосудистого бактериоза в 1957–2017 гг. сотрудниками Российского государственного аграрного университета — МСХА им. К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия) и Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы (г. Москва, Россия) или получены из международных микробиологических коллекций.

Поверхность стеблей и побегов дезинфицировали этанолом, некротизированные сосуды вырезали, измельчали в стерильной воде, гомогенизировали и распределяли по поверхности чашек со средой YDC (г/л: дрожжевой экстракт — 10,0, карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) — 20,0, агар — 15,0, безводная глюкоза — 20,0) [9]. Чашки Петри инкубировали при 26 °С в течение 48 ч. Собирали слизистые колонии с желтой пигментацией, типичные для Хсс, и проводили 3-кратную рекультивацию для получения чистой культуры.

Для первичной характеристики штаммов был проведен тест на гидролиз крахмала в соответствии с Lee *et al.* (2020) с изменениями [10]. Бактериальные изоляты наносили штрихом на чашки Петри с агаром, содержащим 0,2% растворимого крахмала, и инкубировали при 30 °С до начала интенсивного роста. Затем чашки заполняли раствором Люголя (йод — 1 г, калий — 1 г, йодид калия — 2 г, дистиллированная вода — 100 мл), и прозрачные зоны, свидетельствующие о гидролизе крахмала вокруг колоний, были идентифицированы как положительная реакция. Штамм 528Т из Национальной коллекции фитопатогенных бактерий (NCPPB, Йорк, Великобритания) использовали в качестве эталонного штамма. Бактериальные культуры хранили в 15%-ном глицерине при температуре -72 °С для последующих тестов.

Тест на патогенность проводили в соответствии с Nakalova *et al.* (2018) с изменениями [11]. Растения цветной капусты сорта Гарантия (восприимчивый стандарт) выращивали в зимней остекленной теплице при температуре 28/22 °С (14 ч днем / 10 ч ночью), естественной инсоляции и поливали по мере необходимости. Растения выращивали на

торфоперлитовом субстрате («Велторф», Россия) в пластиковых лотках на 40 ячеек (объем ячейки 0,12 л, «Агрофлорапак», Россия) до фазы 3–4 настоящих листьев. Инокуляцию проводили путем прокалывания жилки листа иглой до этого погруженной в бактериальную суспензию в воде с концентрацией  $10^9$  КОЕ/мл.

Суспензии готовили из колоний штаммов, выращенных на среде Кинга Б при 26 °C в течение 48 ч путем суспендирования в стерильной воде, довели до оптимальной концентрации, измеряя оптическую плотность при 600 нм с помощью спектрофотометра NanoDrop One (Thermo Fisher Scientific, США). В качестве положительного контроля использовали суспензию штамма NCPPB 528T, а в качестве отрицательного контроля — стерильную воду. Каждым штаммом инокулировали по три растения. Регистрацию симптомов проводили на 12-й день после инокуляции. В дальнейшей работе использовали штаммы, которые вызывали типичные симптомы сосудистого бактериоза.

ДНК выделяли из двухдневных культур с использованием набора для выделения ДНК «Фитосорб» («Синтол», г. Москва, Россия) в соответствии с протоколом производителя. Реакционная смесь содержала 5 мкл  $5 \times$  Master-mix ( $5 \times$  MasDDTaqMIX-2025, «Диалат», Россия), 10 пМ каждого праймера, 5 нг ДНК и воду без ДНК до объема 25 мкл. ПЦР-амплификацию проводили в термоциклере T100 (Bio-Rad, США). Для амплификации гена 16S рПНК использовали праймеры rD1 и fD1, описанные в работе Yınur *et al.* (2020) [12] с добавлением двух нуклеотидов к прямому праймеру для увеличения температуры отжига. Ампликоны (размером около 1500 п. о.) были разделены с помощью электрофореза в 1,5%-ном агарозе в присутствии бромистого этидия в  $0,5 \times$  TBE и проанализированы с использованием Gel Doc XR+ (BioRad, США). Продукты ПЦР были выделены и очищены с использованием набора ColGen («Синтол», Россия) в соответствии с рекомендациями производителя. Секвенирование очищенных фрагментов ПЦР проводили на автоматическом секвенаторе DNA Analyzer 3730 с набором BigDye Terminator v3.1 (Thermo Fisher Scientific, США).

**Выделение и характеристика фага Murka.** Бактериофаг Xcc Murka был выделен из образца почвы, взятого на поле, где в 2012 году произошла массовая вспышка сосудистого бактериоза капусты, недалеко от Тирасполя (Приднестровье, Молдова). Фаг размножали с использованием штамма Xcc Tr1 при 26 °C в соответствии с ранее опубликованным протоколом [3]. Лизат обрабатывали хлороформом, а осадок концентрировали центрифугированием при  $8000 \times g$  в течение 20 мин с последующей фильтрацией надосадочной жидкости через мембранные фильтры с размером пор 0,22 мкм (Millex-GV, Millipore, Cork, Ирландия) и впоследствии добавляли ДНКазу I (0,5 мг/мл, 1 ч; «Евроген», Россия) [13].

Фильтраты фагов концентрировали ультрацентрифугированием при  $100\,000 \times g$  при 4 °C в течение 2 ч с использованием ротора Beckman SW28 (Beckman Coulter, США). Очистку фагов проводили ультрацентрифугированием в ступенчатом градиенте CsCl ( $0,5$ – $1,7$  г/мл) при  $22000 \times g$  в течение 2 ч. Фагосодержащую опалесцирующую полосу собирали и подвергали диализу с использованием буфера SM (10 мМ Трис-HCl, pH 7,5, 10 мМ  $MgSO_4$ , 100 мМ NaCl). Суспензию фага хранили при температуре 4 °C.

Для оценки диапазона хозяев среди циркулирующих штаммов Xcc была проведена проверка на фаговую инфекционность в отношении 14 штаммов. Набор штаммов включал один эталонный штамм из коллекции NCPPB и 13 полевых изолятов. Для анализа 5 мкл суспензии фага с титром  $10^7$  БОЕ (бляшкообразующих единиц) / мл вносили на двухслойный агар Кинга Б, содержащий бактериальный штамм, и инкубировали в течение ночи при 26 °C. Наличие литической активности определяли по образованию зон лизиса культуры. Для исключения ложноположительных результатов для образцов с положительной реакцией было проведено титрование фагов.

**Оценка влияния температуры культивирования на кинетику взаимодействия фага и бактерии.** Рост бактерий в присутствии или в отсутствие фага при различных температурах проводили в условиях персонального мультисканального биореактора Biosan RTS-8 (Biosan, Латвия), согласно [14], с модификациями. Для этого 15 мл стерильной жидкой среды Кинга Б и 100 мкл ночной культуральной суспензии штамма Tr1 ( $2,5 \times 10^9$  КОЕ/мл;  $OD_{600} \approx 0,21$ ) асептически переносили в пробирки для культивирования. Затем в пробирки для культивирования добавляли (не добавляли) по 100 мкл суспензии фагов ( $1,2 \times 10^6$  БОЕ/мл при  $MOI = 0,001$ ). Это позволило провести параллельные измерения в пробирках, обе из которых содержали бактерию, а одна — дополнительно фаг, тем самым смоделировав ситуацию, в которой суспензия фага попала на бактерии в растении. Пробирки помещали в биореактор и культивировали при температурах 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C или 45 °C при 1300 об/мин в обратном вращении каждые 3 сек в течение 48 ч,  $OD_{600}$  определяли автоматически каждые 6,5 мин. После отбора образцы очищали с помощью хлороформа и титровали на верхнем агаре с штаммом Tr1 методом серийных разведений. Эксперимент проводили в двух повторностях (по две пробирки для культивирования на вариант).

Кривые роста были построены и использованы для расчета площади под кривыми роста (AUGC-Area under growth curve) с использованием GraphPad Prism 9.2.0 (GraphPad Software Inc., США) согласно [15]. Скорость роста оптической плотности бактерий определяли путем вычисления отношения  $OD$  в конечной точке к  $OD$  в начальной точке логарифмической фазы и

деления на продолжительность логарифмической фазы [16].

**Статистический анализ.** Статистическую обработку данных проводили с использованием метода дисперсионного анализа в программе Statistica 12.0 (StatSoft, США), сравнивая средние значения по критерию Дункана. Графики строили с помощью GraphPad Prism 9.2.0 (GraphPad Software Inc., США).

## Результаты и обсуждение / Results and discussion

**Штаммы бактерий.** Штаммы бактерий были охарактеризованы авторами ранее в работе [17], и их основные характеристики представлены в таблице 1. Референтный штамм *Xcc* NCPPB 528T использовали в качестве эталона для сравнения с местными изолятами *Xcc* во всех экспериментах.

Все отобранные штаммы были: (i) высоковирулентными в отношении восприимчивых растений при искусственной инокуляции; (ii) идентичными штамму *Xcc* NCPPB 528T по морфологии колоний на питательной среде YDC; (iii) положительными в тесте на гидролиз крахмала, который является диагностическим признаком рода *Xanthomonas*; (iv) имели наиболее схожие (> 95%) последовательности фрагментов гена 16S рПНК с соответствующими последовательностями эталонных штаммов *Xcc* в NCBI GenBank. Аннотированные последовательности гена 16S рПНК штаммов *Xcc* были депонированы в NCBI GenBank; регистрационные номера приведены в таблице 1.

**Характеристика *Xcc*-фага Murka.** *Xcc*-специфичный бактериофаг Murka был выделен из образца почвы из Молдовы. Активность выделенного фага была протестирована против ряда штаммов *Xcc*, что привело к лизису 9 из 14

протестированных штаммов *Xcc* (табл. 1). Таким образом, фаг лизировал большинство штаммов возбудителя, циркулирующих в центре европейской части России, за исключением одного штамма из Московской области. Протестированные штаммы из Беларуси, Украины, Нидерландов и Великобритании оказались устойчивыми к фагу Murka.

Фаг Murka почти полностью адсорбировался на клетках штамма-хозяина *Xcc* Tr1 (92,4%) в течение 13 мин при температуре 26 °С и лизировал бактерии в течение 100 мин, образуя  $97 \pm 21$  частицу потомства на инфицированную бактериальную клетку. Было обнаружено, что фаг устойчив к повышенным концентрациям хлороформа: титр незначительно снижался только при 75%-ной концентрации в растворе. Ультрафиолетовое облучение (280–315 нм) снижало жизнеспособность фага пропорционально времени обработки с полным уничтожением через 30 мин. Фаг был стабилен в диапазоне pH 6–10 при 26 °С в течение 1 ч, но быстро терял жизнеспособность при pH 3–5 и 11–12. Инфекционная способность фага Murka значительно снижалась при температурах выше 50 °С. В частности, суспензия фага с концентрацией 107 БОЕ/мл теряла 50% своей жизнеспособности при 50 °С в течение 1 ч. Оптимальная температура длительного хранения фагов составляла около 4 °С.

В стандартных условиях размножения бактерии-хозяина фаг Murka образует небольшие бляшки (Ø1–2 мм) с гладкими границами и неправильной формой. Морфология фага, выявленная с помощью просвечивающей электронной микроскопии, продемонстрировала внешний вид, типичный для *Mioviruses*; капсулы были икосаэдрическими и имели диаметр ~56 нм. Хвост длиной

Таблица 1. Спектр литической активности бактериофага Murka в отношении штаммов *X. campestris* pv. *campestris*  
Table 1. The spectrum of lytic activity of Murka bacteriophage against *X. campestris* pv. *campestris* strains

| № штамма | Название штамма | Дата выделения | Источник (культура и регион)                                  | № последовательности 16S рПНК в NCBI GenBank | Наличие зоны лизиса при взаимодействии с фагом Murka |
|----------|-----------------|----------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1        | BK-55           | 10.2017        | Белокочанная капуста (Краснодарский край)                     | OR626094                                     | +                                                    |
| 2        | CK-71           | 10.2017        | Цветная капуста (Краснодарский край)                          | OR626097                                     | +                                                    |
| 3        | <i>Xcc</i> 1/1  | 09.2017        | Белокочанная капуста (Дмитровский р-н, Московская обл.)       | OR626648                                     | +                                                    |
| 4        | Bes-1           | 09.2016        | Белокочанная капуста (Дмитровский р-н, Московская обл.)       | OR626092                                     | +                                                    |
| 5        | Cas             | 09.2016        | Цветная капуста (Дмитровский р-н, Московская обл.)            | OR626095                                     | +                                                    |
| 6        | Tr1             | 11.2012        | Капуста (Тирасполь, Молдова)                                  | OR626099                                     | +                                                    |
| 7        | DK-1            | 10.2012        | Белокочанная капуста (Серпуховский р-н, Московская обл.)      | OR626096                                     | +                                                    |
| 8        | Ram 3-1         | 10.2012        | Белокочанная капуста (Раменский р-н, Московская обл.)         | OR625211                                     | +                                                    |
| 9        | XU 1-2          | 10.2012        | Белокочанная капуста (Украина)                                | OR644606                                     | –                                                    |
| 10       | Bel-2           | 10.2006        | Белокочанная капуста (Белоруссия)                             | OR626091                                     | –                                                    |
| 11       | Bun-1           | 09.2006        | Белокочанная капуста (Дмитровский р-н, Московская обл.)       | OR626093                                     | –                                                    |
| 12       | Xn-13           | 1997           | <i>Capsella bursa-pastoris</i> (пастушья сумка) (Ано, Япония) | OR626098                                     | +                                                    |
| 13       | 306NZ           | –              | Нидерланды                                                    | OR626090                                     | –                                                    |
| 14       | NCPPB 528T      | 1957           | капуста (Великобритания)                                      | –                                            | –                                                    |

около 108 нм был соединен с головкой через тонкую шейку, и никаких выраженных волокон (шипов) в адсорбционном аппарате обнаружено не было.

Фаг *Xanthomonas* Murka (регистрационный № GenBank OR500351) имеет геном в виде двухцепочечной ДНК, состоящий из 43 277 пар оснований. Содержание GC в геноме составляет 59,6% и равномерно распределено по всей длине генома. Среднее содержание GC в 78 штаммах *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, содержащихся в базе данных NCBI ReSeq, составляет 65,1%, что заметно выше, чем содержание GC в геноме фага. В геноме Murka предсказано 83 гена ORF. 41-му белку были присвоены предполагаемые функции, а 42 гена были аннотированы как кодирующие гипотетические белки. В геноме не было обнаружено ни одного гена tPHK.

Генетический анализ с использованием последовательностей фага Murka показал, что ближайшими родственниками фага являются *Foxnaviruses*. Поиск выявил родственные фаги, инфицирующие бактерии, отличные от *Xanthomonas*, включая фаг *Burkholderia* Mica (род *Micavirus*), фаг *Achromobacter* Mano (род *Manovirus*), фаг *Acinetobacter* Alexa (не классифицирован), фаг *Escherichia* vB\_EcoM-ep3 (род *Jilinvirus*) и фаг *Serratia* MQ-4. Результаты сравнительного анализа геномов показали сходство геномной организации между этими фагами, *Foxnaviruses* и фагом Murka. Полная характеристика фага представлена в предыдущей статье авторов [16].

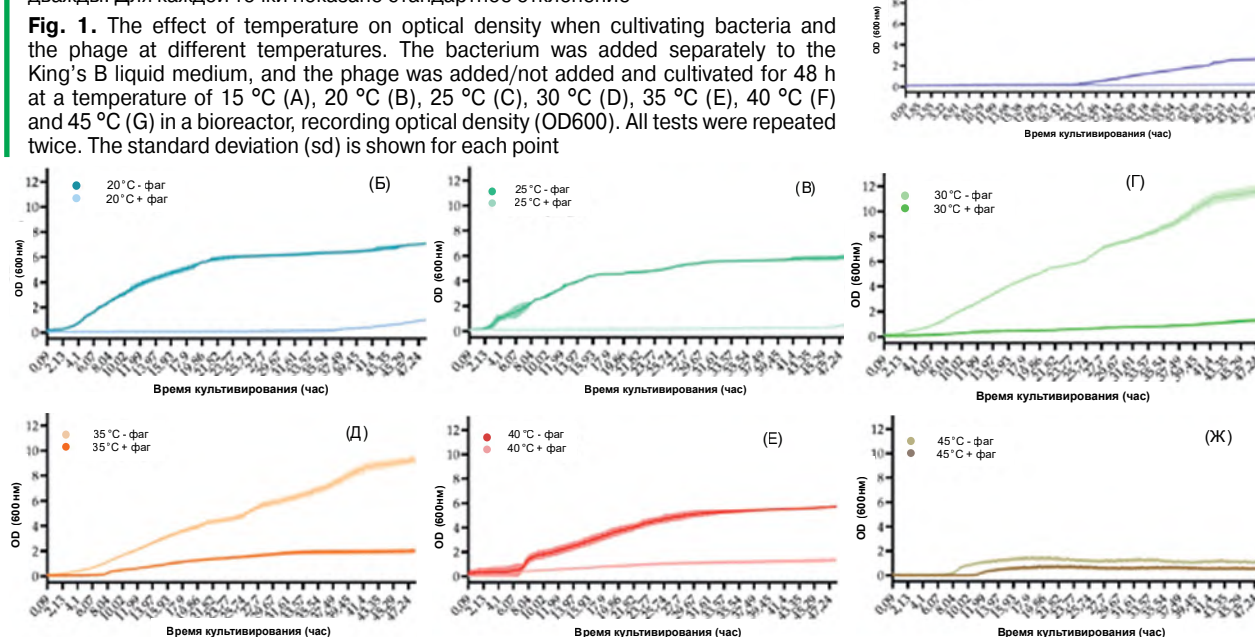
**Влияние температуры культивирования на кинетику взаимодействия фага и бактерии.** Способность фага длительное время существовать в ризосфере или на поверхности растения при различных температурах является важным

технологическим параметром, характеризующим возможное применение фага [18]. Авторами было проведено исследование влияния температуры на кинетику взаимодействия фага с хозяином в модельных экспериментах в условиях биореактора. Во всех вариантах присутствие фага в смеси снижало оптическую плотность бактериальной суспензии при 600 нм, но это различие зависело от температуры. Было показано, что температура является одним из основных факторов роста штамма Tr1. Так, например, самые низкие значения  $OD_{600}$  были получены при культивировании при температурах 15 °C и 45 °C (на пике 2,68 ед. и 1,1 ед.  $OD$  соответственно), в то время как при оптимальных значениях для роста бактерий (30 °C и 35 °C) значения  $OD$  были самыми высокими и находились на пике при 2,68 ед., 11,77 ед. — при температуре 30 °C, 9,3 ед. — при температуре 35 °C (рис. 1).

Анализ площади под кривой (AUGC) показал следующие результаты: максимальные значения показателя наблюдались при культивировании без фага при температуре 30 °C (3055 ед.) и с фагом при температуре 35 °C (648,4 ед.); наименьшие значения наблюдались без фага при температуре 15 °C (466,7 ед.) и с фагом при температуре 15 °C (73,88 ед.) (рис. 2А).

Расчет скорости роста оптической плотности бактерий в логарифмической фазе привел к нескольким интересным результатам. К примеру, максимальные значения показателя наблюдались при культивировании без фага при температуре 20 °C (0,3 ед/ч) и с фагом при температуре 45 °C (0,06 ед/ч); самые низкие значения наблюдались в варианте без фага при температуре 15 °C (0,113 ед/ч) и с фагом при температуре 20 °C (0,001 ед/ч) (рис. 2Б).

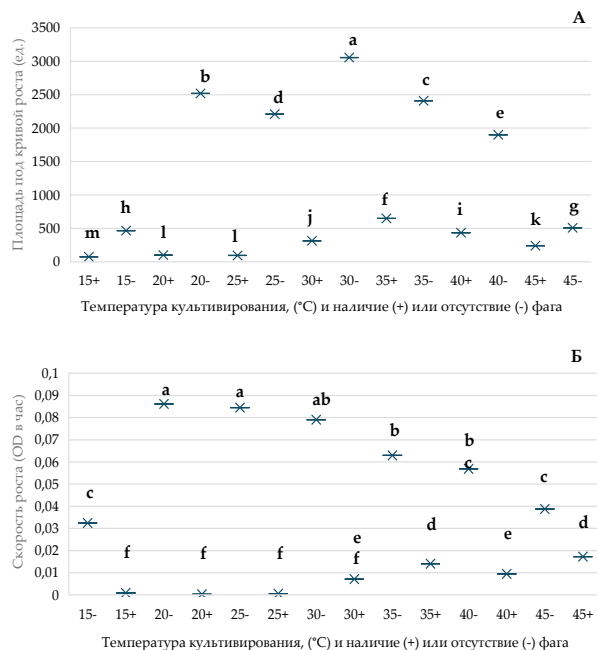
**Рис. 1.** Влияние температуры на оптическую плотность при культивировании бактерий и фагов при разных температурах. Бактерию добавляли отдельно в жидкую среду Кинга Б, добавляли (не добавляли) фаг и культивировали в течение 48 ч при температуре 15 °C (А), 20 °C (Б), 25 °C (В), 30 °C (Г), 35 °C (Д), 40 °C (Е) и 45 °C (Ж) в биореакторе, регистрируя оптическую плотность ( $OD_{600}$ ). Все тесты повторяли дважды. Для каждой точки показано стандартное отклонение



**Fig. 1.** The effect of temperature on optical density when cultivating bacteria and the phage at different temperatures. The bacterium was added separately to the King's B liquid medium, and the phage was added/not added and cultivated for 48 h at a temperature of 15 °C (A), 20 °C (B), 25 °C (C), 30 °C (D), 35 °C (E), 40 °C (F) and 45 °C (G) in a bioreactor, recording optical density ( $OD_{600}$ ). All tests were repeated twice. The standard deviation (sd) is shown for each point

**Рис. 2.** Влияние температуры культивирования на площадь под кривой роста (А) и скорость роста в логарифмической фазе (Б). Красные области указывают варианты без добавления фага в раствор, а зеленые — на присутствие фага в растворе для культивирования. Разные буквы указывают на существенные различия в показателях, согласно тесту Дункана, при  $p = 0,05$ . Все тесты были повторены дважды. Для каждой точки указано стандартное отклонение

**Fig. 2.** Effect of cultivation temperature on the area under the growth curve (A) and growth rate in the logarithmic phase (B). The red areas indicate variants without adding the phage to the solution, and the green areas indicate the presence of the phage in the culture solution. Different letters indicate significant differences in values, according to Duncan's test, at  $p = 0.05$ . All tests were re-peated twice. The standard deviation (sd) is shown for each point

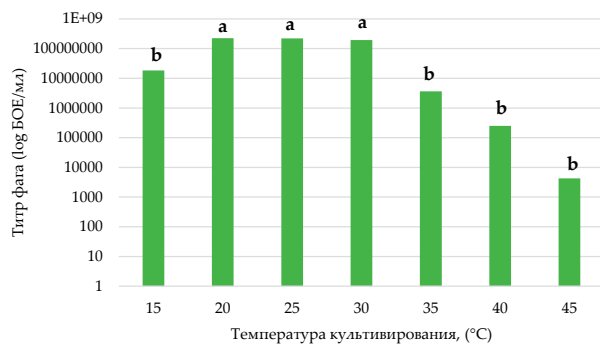


Температура влияла на накопление вирусных частиц в растворе с течением времени. Эксперименты показали, что самые высокие значения титра фага наблюдались при температурах культивирования 20 °C, 25 °C и 30 °C. При других температурах конечный титр фага резко снижался по сравнению с 20 °C, на 91,7% — при 15 °C, на 99,9% — при 45 °C (рис. 3). Таким образом, было показано, что для фага Murka оптимальные температуры для размножения находятся в диапазоне 20–30 °C.

**Обсуждение.** Сосудистый бактериоз капусты, вызываемый Хсс, является одним из наиболее известных бактериальных заболеваний растений, приводящим к потере урожая и качества капустных культур. В настоящее время борьба с болезнью носит комплексный характер [1]. Следуя тенденции к сокращению использования пестицидов при производстве растениеводческой продукции и необходимости повышения качества продукции, актуальная задача состоит в разработке и внедрении новых методов защиты растений. Недавно были предложены альтернативные методы борьбы с Хсс, включающие использование индукторов устойчивости совместно с бактериями-антагонистами, растительными пестицидами и РНК-интерференцией [19].

**Рис. 3.** Влияние температуры культивирования на конечный титр Хсс-фага Murka. Бактерии и фаги добавляли в жидкую среду Кинга Б при MOI = 0,001 и культивировали в течение 48 ч при температуре 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C и 45 °C в биореакторе; отбирали аликвоту и титровали фаг на верхнем агаре с штаммом Tr1. Разные буквы указывают на значительную разницу в показателях, согласно тесту Дункана, при  $p = 0,05$ . Все тесты были повторены дважды. Для каждого столбца указано стандартное отклонение

**Fig. 3.** Effect of cultivation temperature on the final titer of Xcc phage Murka. Bacteria and phage were added to the King's B liquid medium at MOI = 0.001 and cultivated for 48 h at temperatures of 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C and 45 °C in a bioreactor; an aliquot was taken and the phage was titrated on top of agar with Tr1. Different letters indicate a significant difference in values, according to Duncan's test, at  $p = 0.05$ . All tests were repeated twice. The standard deviation (sd) is shown for each bar



Отличительной особенностью выращивания овощных культур в открытом грунте является широкий диапазон сезонных и суточных колебаний температуры воздуха и почвы. Для возбудителей болезней человека и сельскохозяйственных животных влияние температуры на эффективность обработки фагами нивелируется стабильной температурой тела, в то время как для растений эта температура подвержена резким сезонным и суточным изменениям.

В связи с этим одной из целей исследования была оценка кинетических параметров системы «фаг — бактерия» путем моделирования ее в биореакторе. Для этого температуру выращивания варьировали от 15 до 45 °C, что соответствовало обычному температурному спектру в период вегетации капусты в открытом грунте в большинстве климатических зон.

Было установлено, что температура оказывает сильное влияние на накопление бактериальной биомассы, причем оптическая плотность была самой высокой при температуре 30 °C.

С другой стороны, из ранее опубликованных работ следует, что оптимальная температура для культивирования Хсс составляет 25–27 °C [20]. Тот факт, что штаммы Хсс различаются по оптимальной температуре роста, коррелирует с вариативностью кластера генов, контролирующих липополисахаридный комплекс [2]. Модельный штамм Tr1, используемый в данной работе, относится к серотипу 1 (с LPS, сходным со штаммами B100/3811/PHW231), поэтому, оптимальная температура для роста этого штамма выше, чем для штамма типа Хсс NCPPB 528T и аналогичных штаммов.

Температура влияла на накопление фаговых вирионов. Оптимальная температура для увеличения концентрации вируса находилась в диапазоне от 20 до 30 °C, в то время как при других температурах концентрация вирусных частиц снижалась до 99% (например, при температуре 45 °C). Таким образом, ингибирование фагом роста бактерий менее эффективно при высоких температурах из-за более низкой скорости развития фагов. Это указывает на отсутствие специального механизма термозависимой устойчивости фагов к Хсс. С другой стороны, широкий диапазон температур (20–30 °C), при котором Murka способна эффективно уничтожать бактерии, косвенно указывает на то, что ее можно использовать в различных климатических зонах, что является ценным свойством для перспективного биологического средства для борьбы с сосудистым бактериозом капусты.

Предпочтительным способом обработки растений капусты фагом является обработка семян перед посевом, поскольку (1) молодые всходы наиболее восприимчивы к бактерии; (2) во время прорастания семена интенсивно увеличивают площадь поверхности как корней, так и стебля. Полагаем, что фаг предотвратит колонизацию бактериями поверхности растения и их попадание в сосудистую систему из почвы; (3) при посеве семян капусты в поле или теплице температура почвы довольно низкая, и фаг находится в стабильных условиях. Эти моменты будут рассмотрены в будущих экспериментах.

Считается, что из-за длительной совместной эволюции бактерии-хозяина и фага оптимальная температура (как для метаболизма бактерии-хозяина, так и для процессов заражения фагом) стала близка. Однако данная работа и ряд других публикаций показывают, что температуры культивирования, отличные от оптимальных для бактерии-хозяина, могут повысить продуктивность вируса. Например, для низкотемпературного (LT) типа фага *Aeromonas hydrophila* известно, что субоптимальная (более низкая) температура для бактерии может влиять на адсорбцию фага на бактериальных клетках и его размножение [3].

Несмотря на то что оптимальная температура для культивирования *Escherichia coli* составляет 35–37 °C, максимальный выход фагов был обнаружен при температуре 30 °C. [21]. По-видимому, снижение выхода фаговых частиц при температурах, повышенных для развития бактерии-хозяина, происходит из-за образования не полностью собранных частиц, а также потому, что, по-видимому, температура больше всего влияет на конечную стадию сборки фага [22].

Таким образом, температура культивирования оказывает непосредственное влияние не на сам бактериофаг, который не имеет признаков самостоятельного метаболизма, а на бактерию и систему «фаг — бактерия» в целом. В вариантах культивирования фага при температуре 15–30 °C наблюдалась тенденция к увеличению OD<sub>600</sub> к концу периода культивирования (с 23 до 47 ч), тогда как в случае культивирования при температуре 45 °C этого не наблюдалось. Это может быть связано с появлением устойчивых к фагам форм [18]. Одним из способов решения этой проблемы является использование «фаговых коктейлей», включающих представителей разных групп фагов, при обработке растений для снижения риска появления устойчивых форм.

## Выводы/Conclusions

Авторами охарактеризован новый фаг Murka, который приводит к лизису 64,3% штаммов возбудителя сосудистого бактериоза капусты *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, использованных в исследовании. Он имеет типичную морфологию миовируса и относится к роду *Foxnavirus*. Модельный эксперимент, проведенный в условиях жидкой культуры в биореакторе, показал, что оптимальный температурный диапазон для достижения максимальной продуктивности фага составляет 20–30 °C. Этот факт указывает на возможность использования фага в различных климатических зонах, что является ценным свойством для перспективного биологического средства борьбы с сосудистым бактериозом капусты. Для проверки этого предположения необходимы испытания на растениях в условиях искусственного инфекционного фона.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Liu Z. *et al.* Physical, chemical, and biological control of black rot of *Brassicaceae* vegetables: A review. *Frontiers in Microbiology*. 2022; 13: 1023826. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1023826>
2. Ignatov A. A possible role of LPS structure in climate adaptation of *Xanthomonas campestris*. 4th Annual Conference of the EuroXanth COST Action Integrating Science on *Xanthomonadaceae* for integrated plant disease management in Europe. Virtual Conference. 2021. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15969.02400>

## REFERENCES

1. Liu Z. *et al.* Physical, chemical, and biological control of black rot of *Brassicaceae* vegetables: A review. *Frontiers in Microbiology*. 2022; 13: 1023826. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1023826>
2. Ignatov A. A possible role of LPS structure in climate adaptation of *Xanthomonas campestris*. 4th Annual Conference of the EuroXanth COST Action Integrating Science on *Xanthomonadaceae* for integrated plant disease management in Europe. Virtual Conference. 2021. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15969.02400>

3. Nair A., Ghugare G.S., Khairnar K. An Appraisal of Bacteriophage Isolation Techniques from Environment. *Microbial Ecology*. 2022; 83(3): 519–535.  
<https://doi.org/10.1007/s00248-021-01782-z>
4. Seeley N.D., Primrose S.B. The Effect of Temperature on the Ecology of Aquatic Bacteriophages. *Journal of General Virology*. 1980; 46(1): 87–95.  
<https://doi.org/10.1099/0022-1317-46-1-87>
5. Тараканов Р.И., Игнатов А.Н., Джалилов Ф.С. Выделение бактериофагов *Pseudomonas savastanoi* pv. *glycinea* и их использование в защите сои от бактериального ожога. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2020; (4): 43–53.  
<https://www.elibrary.ru/fzasld>
6. Holtappels D. et al. The potential of bacteriophages to control *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* at different stages of disease development. *Microbial Biotechnology*. 2022; 15(6): 1762–1782.  
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.14004>
7. Weiss B.D., Capage M.A., Kessel M., Benson S.A. Isolation and Characterization of a Generalized Transducing phage for *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Journal of Bacteriology*. 1994; 176(11): 3354–3359.  
<https://doi.org/10.1128/jb.176.11.3354-3359.1994>
8. Lukianova A.A. et al. Morphologically Different *Pectobacterium brasiliense* Bacteriophages PP99 and PP101: Deacetylation of O-Polysaccharide by the Tail Spike Protein of Phage PP99 Accompanies the Infection. *Frontiers in Microbiology*. 2019; 10: 3147.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.03147>
9. Lelliot R.A., Stead D.E. Methods for the Diagnosis of Bacterial Diseases of Plants. Oxford: *Blackwell*. 1987; vii, 216. ISBN 978-0-632-01233-6
10. Lee Y.-A., Yang P.-Y., Huang S.-C. Characterization, Phylogeny, and Genome Analyses of Nonpathogenic *Xanthomonas campestris* Strains Isolated from Brassica Seeds. *Phytopathology*. 2020; 110(5): 981–988.  
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-19-0319-R>
11. Peňázová E., Kopta T., Jurica M., Pečenka J., Eichmeier A., Pokluda R. Testing of Inoculation Methods and Susceptibility Testing of Perspective Cabbage Breeding Lines (*Brassica oleracea* convar. *Capitata*) to the Black Rot Disease Caused by *Xanthomonas campestris* pv. *Campestris*. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2018; 66(1): 139–148.  
<https://doi.org/10.11118/actaun201866010139>
12. Tilahun B., Yinur D., Zenabu D., Menesha F.M. Isolation and identification of *Enset* wilt disease causing bacteria using 16S rRNA Gene Sequence samples collected from Gurage zone, Ethiopia. *Journal of Life Science and Biomedicine*. 2020; 10(4): 51–58.  
<https://doi.org/10.51145/jlsb.2020.7>
13. Tarakanov R.I. et al. Ayka, a Novel *Curtobacterium* Bacteriophage, Provides Protection against Soybean Bacterial Wilt and Tan Spot. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(18): 10913.  
<https://doi.org/10.3390/ijms231810913>
14. Beňo F., Horsáková I., Kmoch M., Petřík K., Krátká G., Ševčík R. Bacteriophages as a Strategy to Protect Potato Tubers against *Dickeya dianthicola* and *Pectobacterium carotovorum* Soft Rot. *Microorganisms*. 2022; 10(12): 2369.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10122369>
15. Maina A.N., Mwaura F.B., Wagacha J.M., Jumba M., Aziz R.K., Nour El-Din H.T. Phenotypic characterization of phage vB\_vcM\_Kuja. *Journal of Basic Microbiology*. 2023; 63(5): 481–488.  
<https://doi.org/10.1002/jobm.202200635>
16. Allen R.J., Waclaw B. Bacterial growth: a statistical physicist's guide. *Reports on Progress in Physics*. 2019; 82(1): 016601.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6633/aae546>
17. Evseev P.V. et al. Characterisation of New *Foxunavirus* Phage Murka with the Potential of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* Control. *Viruses*. 2024; 16(2): 198.  
<https://doi.org/10.3390/v16020198>
18. Cristobal-Cueto P., García-Quintanilla A., Esteban J., García-Quintanilla M. Phages in Food Industry Biocontrol and Bioremediation. *Antibiotics*. 2021; 10(7): 786.  
<https://doi.org/10.3390/antibiotics10070786>
19. Fontana R. et al. Effects of *Moringa oleifera* Leaf Extracts on *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Microorganisms*. 2021; 9(11): 2244.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9112244>
20. Esgalhado M.E., Roseiro J.C., Collaço M.T.A. Interactive Effects of pH and Temperature on Cell Growth and Polymer Production by *Xanthomonas campestris*. *Process Biochemistry*. 1995; 30(7): 667–671.  
[https://doi.org/10.1016/0032-9592\(94\)00044-1](https://doi.org/10.1016/0032-9592(94)00044-1)
21. Choi Y.K., Han S.M., Lee S.M., Soh J.O., Lee S.K., Lee J.H. Investigation of the Relation between Temperature and M13 Phage Production via ATP Expenditure. *Processes*. 2022; 10(5): 962.  
<https://doi.org/10.3390/pr10050962>
3. Nair A., Ghugare G.S., Khairnar K. An Appraisal of Bacteriophage Isolation Techniques from Environment. *Microbial Ecology*. 2022; 83(3): 519–535.  
<https://doi.org/10.1007/s00248-021-01782-z>
4. Seeley N.D., Primrose S.B. The Effect of Temperature on the Ecology of Aquatic Bacteriophages. *Journal of General Virology*. 1980; 46(1): 87–95.  
<https://doi.org/10.1099/0022-1317-46-1-87>
5. Tarakanov R.I., Ignatov A.N., Dzhailov F.S. Isolation of specific bacteriophages *Pseudomonas savastanoi* pv. *glycinea* and their use in soybean bacterial blight control. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2020; (4): 43–53 (in Russian).  
<https://www.elibrary.ru/fzasld>
6. Holtappels D. et al. The potential of bacteriophages to control *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* at different stages of disease development. *Microbial Biotechnology*. 2022; 15(6): 1762–1782.  
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.14004>
7. Weiss B.D., Capage M.A., Kessel M., Benson S.A. Isolation and Characterization of a Generalized Transducing phage for *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Journal of Bacteriology*. 1994; 176(11): 3354–3359.  
<https://doi.org/10.1128/jb.176.11.3354-3359.1994>
8. Lukianova A.A. et al. Morphologically Different *Pectobacterium brasiliense* Bacteriophages PP99 and PP101: Deacetylation of O-Polysaccharide by the Tail Spike Protein of Phage PP99 Accompanies the Infection. *Frontiers in Microbiology*. 2019; 10: 3147.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.03147>
9. Lelliot R.A., Stead D.E. Methods for the Diagnosis of Bacterial Diseases of Plants. Oxford: *Blackwell*. 1987; vii, 216. ISBN 978-0-632-01233-6
10. Lee Y.-A., Yang P.-Y., Huang S.-C. Characterization, Phylogeny, and Genome Analyses of Nonpathogenic *Xanthomonas campestris* Strains Isolated from Brassica Seeds. *Phytopathology*. 2020; 110(5): 981–988.  
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-19-0319-R>
11. Peňázová E., Kopta T., Jurica M., Pečenka J., Eichmeier A., Pokluda R. Testing of Inoculation Methods and Susceptibility Testing of Perspective Cabbage Breeding Lines (*Brassica oleracea* convar. *Capitata*) to the Black Rot Disease Caused by *Xanthomonas campestris* pv. *Campestris*. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2018; 66(1): 139–148.  
<https://doi.org/10.11118/actaun201866010139>
12. Tilahun B., Yinur D., Zenabu D., Menesha F.M. Isolation and identification of *Enset* wilt disease causing bacteria using 16S rRNA Gene Sequence samples collected from Gurage zone, Ethiopia. *Journal of Life Science and Biomedicine*. 2020; 10(4): 51–58.  
<https://doi.org/10.51145/jlsb.2020.7>
13. Tarakanov R.I. et al. Ayka, a Novel *Curtobacterium* Bacteriophage, Provides Protection against Soybean Bacterial Wilt and Tan Spot. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(18): 10913.  
<https://doi.org/10.3390/ijms231810913>
14. Beňo F., Horsáková I., Kmoch M., Petřík K., Krátká G., Ševčík R. Bacteriophages as a Strategy to Protect Potato Tubers against *Dickeya dianthicola* and *Pectobacterium carotovorum* Soft Rot. *Microorganisms*. 2022; 10(12): 2369.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10122369>
15. Maina A.N., Mwaura F.B., Wagacha J.M., Jumba M., Aziz R.K., Nour El-Din H.T. Phenotypic characterization of phage vB\_vcM\_Kuja. *Journal of Basic Microbiology*. 2023; 63(5): 481–488.  
<https://doi.org/10.1002/jobm.202200635>
16. Allen R.J., Waclaw B. Bacterial growth: a statistical physicist's guide. *Reports on Progress in Physics*. 2019; 82(1): 016601.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6633/aae546>
17. Evseev P.V. et al. Characterisation of New *Foxunavirus* Phage Murka with the Potential of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* Control. *Viruses*. 2024; 16(2): 198.  
<https://doi.org/10.3390/v16020198>
18. Cristobal-Cueto P., García-Quintanilla A., Esteban J., García-Quintanilla M. Phages in Food Industry Biocontrol and Bioremediation. *Antibiotics*. 2021; 10(7): 786.  
<https://doi.org/10.3390/antibiotics10070786>
19. Fontana R. et al. Effects of *Moringa oleifera* Leaf Extracts on *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Microorganisms*. 2021; 9(11): 2244.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9112244>
20. Esgalhado M.E., Roseiro J.C., Collaço M.T.A. Interactive Effects of pH and Temperature on Cell Growth and Polymer Production by *Xanthomonas campestris*. *Process Biochemistry*. 1995; 30(7): 667–671.  
[https://doi.org/10.1016/0032-9592\(94\)00044-1](https://doi.org/10.1016/0032-9592(94)00044-1)
21. Choi Y.K., Han S.M., Lee S.M., Soh J.O., Lee S.K., Lee J.H. Investigation of the Relation between Temperature and M13 Phage Production via ATP Expenditure. *Processes*. 2022; 10(5): 962.  
<https://doi.org/10.3390/pr10050962>

22. Pollard E., Woodyatt S. The Effect of Temperature on the Formation of T1 and T2r Bacteriophage. *Biophysical Journal*. 1964; 4(5): 367–385.  
[https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(64\)86789-8](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(64)86789-8)

#### ОБ АВТОРАХ

##### Рашит Ислямович Тараканов<sup>1</sup>

кандидат биологических наук, доцент кафедры защиты растений

[r.tarakanov@rgau-msha.ru](mailto:r.tarakanov@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3235-8467>

##### Пётр Владимирович Евсеев<sup>2</sup>

кандидат биологических наук, заведующий лабораторией молекулярной микробиологии

[petevseev@gmail.com](mailto:petevseev@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-1646-9802>

##### Светлана Ивановна Чебаненко<sup>1</sup>

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры защиты растений

[svchebanenko@rgau-msha.ru](mailto:svchebanenko@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-6128-1948>

##### Ольга Алексеевна Савоскина<sup>1</sup>

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры земледелия и методики опытного дела

[osavoskina@rgau-msha.ru](mailto:osavoskina@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-1568-4922>

##### Оксана Григорьевна Каратаева<sup>1</sup>

кандидат экономических наук, доцент кафедры педагогики и психологии профессионального образования

[okarataeva@rgau-msha.ru](mailto:okarataeva@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-5016-225X>

##### Кирилл Максимович Воробьев<sup>1</sup>

магистрант кафедры защиты растений

[kirillvrbv@mail.ru](mailto:kirillvrbv@mail.ru)

<https://orcid.org/0009-0005-1858-1346>

##### Февзи Сеид-Умерович Джалилов<sup>1</sup>

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой защиты растений

[dzhalilov@rgau-msha.ru](mailto:dzhalilov@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-5014-8375>

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127434, Россия

<sup>2</sup>Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, ул. им. Островитянова, 1, Москва, 117513, Россия

22. Pollard E., Woodyatt S. The Effect of Temperature on the Formation of T1 and T2r Bacteriophage. *Biophysical Journal*. 1964; 4(5): 367–385.  
[https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(64\)86789-8](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(64)86789-8)

#### ABOUT THE AUTHORS

##### Rashit Islyamovich Tarakanov<sup>1</sup>

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Plant Protection

[r.tarakanov@rgau-msha.ru](mailto:r.tarakanov@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3235-8467>

##### Peter Vladimirovich Evseev<sup>2</sup>

Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Molecular Microbiology

[petevseev@gmail.com](mailto:petevseev@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-1646-9802>

##### Svetlana Ivanovna Chebanenko<sup>1</sup>

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Plant Protection

[svchebanenko@rgau-msha.ru](mailto:svchebanenko@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-6128-1948>

##### Olga Alekseevna Savoskina<sup>1</sup>

Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Agriculture and Experimental Methods

[osavoskina@rgau-msha.ru](mailto:osavoskina@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-1568-4922>

##### Oksana Grigorievna Karataeva<sup>1</sup>

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Pedagogy and Psychology of Vocational Education

[okarataeva@rgau-msha.ru](mailto:okarataeva@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-5016-225X>

##### Kirill Maksimovich Vorobyov<sup>1</sup>

Master's Student of the Department of Plant Protection

[kirillvrbv@mail.ru](mailto:kirillvrbv@mail.ru)

<https://orcid.org/0009-0005-1858-1346>

##### Fevzi Seid-Umerovich Dzhalilov<sup>1</sup>

Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Plant Protection

[dzhalilov@rgau-msha.ru](mailto:dzhalilov@rgau-msha.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-5014-8375>

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

<sup>2</sup>Pirogov Russian National Research Medical University, 1 Ostrovityanova Str., Moscow, 117513, Russia