

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

**БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И СОСТАВ МЕТАБОЛИТОВ ШТАММА
STREPTOMYCES CARPATICUS K-11 RCAM04697 (SCPM-O-B-9993),
ПЕРСПЕКТИВНОГО ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ**

© 2023 г. Ю. В. Батаева^а, *, Л. Н. Григорян^а, А. Г. Богун^б, А. А. Кисличкина^б, М. Е. Платонов^б,
Е. А. Курашов^с, Ю. В. Крылова^д, А. Г. Федоренко^е, М. П. Андреева^а

^аАстраханский государственный университет им В.Н. Татищева, Астрахань, 414056 Россия

^бГосударственный научный центр прикладной микробиологии
и биотехнологии Роспотребнадзора, Оболensk, 142279 Россия

^сИнститут озераведения Российской академии наук, обособленное подразделение СПб ФИЦ РАН,
Санкт-Петербург, 196105 Россия

^дСанкт-Петербургский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии» (ГосНИОРХ им. Л.С. Берга), Санкт-Петербург, 199004 Россия

^еЮжный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

*e-mail: aveatab@mail.ru

Поступила в редакцию 02.11.2022 г.

После доработки 28.11.2022 г.

Принята к публикации 10.01.2023 г.

Из бурой полупустынной почвы Астраханской области с очень сильной степенью засоления выделен штамм K-11, который на основании анализа последовательности гена 16S рРНК отнесен к виду *Streptomyces carpaticus* K-11 RCAM04697 (SCPM-O-B-9993). Проведено полногеномное секвенирование штамма. Изучена фитотоксичность, противовирусная, антиоксидантная, антифунгальная, инсектицидная активности штамма. Все экстракты и суспензия штамма *S. carpaticus* RCAM04697 обладали фитостимулирующей активностью. Противовирусные свойства проявлялись в сдерживании развития и распространения вирусных возбудителей в лабораторных условиях: вируса мозаики томата (ВМТо) (*Tomato mosaic virus, ToMV*) – 26.3%, вируса мозаики огурца (ВОМ) (*Cucumber mosaic virus, CMV*) – 33.8%, Y-вируса картофеля (YBK) (*Potato Ypotyvirus, PVY*) – 51.3%, X-вируса картофеля (ХВК) (*Potato Xpotyvirus, PVX*) – 41.3%. Наибольшую антиоксидантную активность проявили суспензия – 88.8% и водно-спиртовой экстракт (20 : 80) – 76.0% штамма *S. carpaticus* RCAM04697. Штамм в различной степени ингибировал рост фитопатогена *Fusarium sporotrichioides*. Инсектицидная активность в отношении *Aphis fabae* через 6 ч обработки составила 100% в вариантах с обработкой суспензией, водно-спиртовым (80 : 20, 50 : 50), метанольным и гексановым экстрактами. В составе метаболитов штамма *S. carpaticus* RCAM04697 обнаружены флавоноиды, алкалоиды, гликозиды, органические кислоты (изолимонная, уксусная, фумаровая, молочная, пировиноградная, яблочная), спирты, альдегиды, углеводороды, эфиры, серосодержащие соединения и другие группы низкомолекулярных органических соединений.

Ключевые слова: стрептомицеты, *Streptomyces*, актинобактерии, антиоксидантная активность, антифунгальная активность, противовирусная активность, метаболиты, экстракт, масс-спектрометрия

DOI: 10.31857/S0026365622600730, **EDN:** FVXVYA

Вследствие применения химических удобрений и средств защиты растений, агроценозы аридной зоны испытывают большой стресс по сравнению с природными экосистемами, что сопровождается обеднением состава биоценоза почвы, выпадением из нее ценных видов, деградацией почвенных экосистем, ухудшением качества сельскохозяйственной продукции. Поэтому в настоящее время все большее применение находят биологические удобрения и средства защиты растений на основе почвенных микроорганизмов, которые являются

экологически безопасными стимуляторами роста растений и защищают их от болезней.

Стрептомицеты широко распространены в природе и составляют основную часть актинобактерий, населяющих почву. Разнообразии стрептомицетов, их место среди прочих почвенных микроорганизмов, высокий уровень выживаемости обусловлены конкурентоспособностью и широким спектром продуцируемых метаболитов (Korkmaz et al., 2015; Grigoryan et al., 2020). Стрептомицеты продуцируют в окружающую среду вторичные экзометаболиты,

представляющие собой многокомпонентные комплексы различных по химическому строению природных соединений – антибиотиков, литических ферментов, аминокислот, терпеноидов, алкалоидов и других полезных веществ (Rezanka et al., 2004; Егорова и соавт., 2019). Такие соединения обуславливают полезные свойства стрептомицетов: фитостимулирующие (Бурцева и соавт., 2014), противовирусные (патент № 2226214), антифунгальные (Домрачева и соавт., 2022), антиоксидантные, инсектицидные (Анисимова, 2008). В подавляющем большинстве случаев многие виды стрептомицетов способны синтезировать не один, а несколько вторичных метаболитов (Cho, 2012).

Среди актинобактерий известен ряд штаммов, являющихся перспективной основой для разработки высокоэффективных биопестицидов: *S. avermitilis* ССМ 4697 – продуцент авермектинов, оказывающих токсическое действие на клещей (патент № 2156301); *S. chrysomallus* P-21 действует против грибных и вирусных фитопатогенов (патент № 2226214); *S. hygrosopicus* ssp. ЦКМ В-4561 обладает фунгицидными, бактерицидными и инсектицидными свойствами (патент № 2243259).

Основой микробиологических средств защиты растений являются высокопроизводительные штаммы, в связи с чем необходимо знание эколого-биологических особенностей и биотехнологических возможностей данных продуцентов (Поляк, Сухаревич, 2017). Кроме того, активность штаммов часто обоснована синтезом первичных и вторичных метаболитов, изучение состава которых дает основу понимания механизмов их влияния на объекты.

Цель работы – изучение физиолого-биохимических свойств, таксономического положения, молекулярно-генетических особенностей, спектра биологической активности и полезных для растений экзометаболитов штамма *Streptomyces carpaticus* K-11 RCAM04697.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – штамм *Streptomyces carpaticus* RCAM04697, выделенный в 2013 г. из бурой полупустынной почвы с очень сильной степенью засоления (сухой остаток водной вытяжки – 2.4%) в Наримановском районе Астраханской области.

Условия культивирования. Для изучения культурально-морфологических и физиолого-биохимических свойств штамм выращивали на плотной крахмально-казеиновой среде при температуре 28°C в течение 7 сут. Культуральные свойства исследовали путем определения цвета воздушного и субстратного мицелия, цвета растворимых пигментов, которые окрашивают среду. Изучение морфологического строения репродуктивных структур штамма проводили на 14 сут роста, вырастив

культуру на среде, наиболее благоприятной для спороношения – минеральном агаре. Физиолого-биохимические признаки определяли по стандартным методикам (Методы..., 1984).

Электронно-микроскопическое исследование клеток штамма *S. carpaticus* RCAM04697. Для ультраструктурного исследования клеток штамма *S. carpaticus* RCAM04697 на 3 сут инкубации отбирали фрагменты биопленки, выращенной на крахмально-казеиновой среде, размером примерно 2 × 2 мм. Образцы фиксировали в 2.5% растворе глутарового альдегида на фосфатном буфере (pH 7.4) в течение 2 ч при комнатной температуре (22°C). После двукратной промывки фосфатным буфером с сахарозой образцы дофиксировали 2% раствором OsO₄ в течение 2 ч при комнатной температуре. После отмычки указанным выше буфером образцы обезвоживали в серии растворов этилового спирта восходящей концентрации. Перед помещением в 96% спирт образцы выдерживали в 70% спиртовом растворе уранилацетата в течение 12 ч при температуре 4°C. Затем образцы отмывали от уранилацетата и продолжали обезвоживание 100% спиртом и чистым ацетоном в три смены по 15 мин каждая. Далее образцы пропитывали смолой в серии растворов эпона в ацетоне возрастающей концентраций и заливали в чистый эпоно. Полимеризацию проводили в термостате при температуре 37°C (24 ч), 60°C (48 ч).

Ультратонкие срезы (толщиной 90–100 нм) получали на приборе EM UC26 (“Leica”, Wetzlar, Германия). Их ультраструктурный анализ проводили в электронном микроскопе Tescnai I2 (“FEI, Philips”, Чехия).

Молекулярно-генетическая идентификация штамма. Для идентификации выделенного штамма выделяли геномную ДНК, используя набор реактивов AxyPrep Multisource Genomic DNA Mini-prep Kit (“Corning”, США). Для амплификации участка гена 16S рНК (около 1500 п.н.) применяли праймеры fD1 (5'-AGAGTTTGATCCTGGCT-CAG-3') и rD1 (5'-CTTAAGGAGGTGATCCAG-CC-3'). ПЦР проводили в амплификаторе C1000™ Thermal Cycler (“BioRad”, США) в течение 36 циклов. Выделенную ДНК визуализировали с помощью электрофореза в 1%-ном агарозном геле с использованием маркера Lambda DNA/HindIII (“Fermentas”, США) для оценки размера фрагментов и количества ДНК. Определение нуклеотидной последовательности ПЦР-продукта проводили на генетическом анализаторе ABI 3500 × 1 (“Applied Biosystems”, США). Поиск гомологичных последовательностей проводили с помощью базы данных GenBank NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>) и программы BLAST (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). Для конструирования филогенетических деревьев использовали программу MEGA 6.0 и метод

Neighbor-Joining. Эволюционные расстояния рассчитаны с использованием модели Maximum Composite Likelihood. Статистическую достоверность кластеров оценивали с помощью бутстреп-анализа (1000 реплик).

Полногеномное секвенирование и аннотирование генома. Геномную ДНК выделяли фенол-хлороформным методом. Полногеномное секвенирование осуществлено на платформе Illumina MiSeq, с использованием наборов Nextera DNA Library Preparation Kit и MiSeq Reagent Kits v3. Мономолекулярное нанопоровое секвенирование ДНК осуществлено на платформе MinION, согласно рекомендациям производителя, с использованием набора для быстрого баркодирования (RBK004) и проточной ячейки MinION (R9.4.1). Программное обеспечение для проведения секвенирования – MinKNOW v18.05.5 (время – 48 ч, 180 мВ), демультиплексирование – с помощью программы Guppy v6.0.1. Гибридную сборку генома без предварительного треммирования прочтений осуществили с помощью программы Unicycler v0.4.7.

Приготовление суспензии и экстрактов штамма. Для определения биологической активности и при изучении продукции вторичных метаболитов исследуемый штамм выращивали в жидкой крахмально-казеиновой среде в течение 72 ч при 28°C и непрерывном перемешивании на шейкере (120 об./мин) (Гаузе и соавт., 1983). Суспензия исследуемого штамма представляла собой однородную жидкость светло-желтого цвета со специфическим “землистым” запахом (концентрация клеток 10⁹ КОЕ/мл).

Метанольный и водно-спиртовой экстракты готовили из сухой биомассы исследуемого штамма *S. carpaticus* RCAM04697 с титром клеток 10⁹ КОЕ/мл, полученной путем высушивания в ротационном испарителе (IKA RV 10 digital). Сухую биомассу штамма заливали метанолом или раствором дистиллированной воды и этанола (20 : 80; 50 : 50; 80 : 20) в соотношении 1 мг/мл на 40 мин. После центрифугирования, удаления осадка, высушивания жидкости в ротационном вакуумном испарителе при температуре от 60 до 70°C, досушивания в сушильном шкафу (ШС-80-01 СПУ) при температуре 37°C в течение 3 сут до постоянной массы получали сухой экстракт.

Для приготовления гексановых экстрактов 250 мл суспензии (концентрация клеток 10⁹ КОЕ/мл) штамма экстрагировали 5 мл гексана в течение 3 мин в делительной воронке. Гексановый экстракт высушивали в ротационном испарителе. Экстракты хранили в морозильной камере при температуре –18°C.

Для определения биологической активности использовали высушенную и измельченную массу сухих экстрактов, которую разводили дистиллированной водой до концентраций 1.0 и 0.5 мг/мл.

Определение фитотоксичности. Фитотоксичность суспензии и экстрактов штамма RCAM04697 исследовали методом ингибирования роста корня редиса (*Rarhanus sativus*) сорта Хелро при 20°C в течение 3 сут в двух концентрациях: 0.5 и 1.0 мг/мл.

Создание инфекционного фона для определения противовирусной активности. Искусственное заражение рассады томата проводили на стадии 3–4 настоящих листьев вирусами мозаики томата (ВМТо) и мозаики огурца (ВОМ) путем нанесения на листовые пластинки инокулюмов, полученных путем растирания пестиком инфицированных фитовирусами растений. Проростки картофеля искусственно заражали на стадии 3–4 настоящих листьев Y-вирусом картофеля (YVK) и X-вирусом картофеля (XVK). Идентифицированные изоляты вирусов (ВОМ, ВМТо, YVK, XVK) взяты из коллекции филиала ФГБУ “Россельхозцентр” по Астраханской области. Обработку растений томата и картофеля суспензией штамма *S. carpaticus* RCAM04697 с титром 10⁹ КОЕ/мл проводили двукратно методом опрыскивания через 7 сут после контаминации возбудителями вирусной инфекции. Интервал времени между обработками составил 5 сут. Контрольные растения опрыскивали водопроводной водой. На 3 сут после второго опрыскивания определяли наличие вирусов в растениях.

Иммунохроматографический метод определения вирусов растений. Присутствие вирусов в растениях томата и картофеля, обработанных суспензией штамма, определяли методом ИХА с помощью иммунострипов (ImmunoStrip Test Kit Flashkits, США), которые состоят из пластины микротитра, пропитанной щелочным ферментом, покрытой с обеих сторон антителами выявляемого возбудителя болезни, и пакета с буфером для экстракции образцов.

Метод ПЦР-диагностики определения вирусов растений. Определение вирусов в растениях проводили также методом ПЦР с гибридационно-флуоресцентной детекцией продуктов в режиме “реального времени” с использованием микроципового амплификатора нуклеиновых кислот “АриаДНА”. Для этого получали пробы ДНК и РНК из зеленой массы картофеля.

Определение антиоксидантной активности. Изучение антиоксидантной активности и компонентного состава метаболитов суспензии и экстрактов штамма RCAM04697 проводили с концентрацией 1.0 мг/мл. Для определения антиоксидантной активности использовали реакцию со стабильным свободным радикалом ДФПГ.

Исследование антифунгальной активности. Антифунгальные свойства суспензии штамма в лабораторных условиях исследовали с помощью метода лунок на лабораторной культуре фитопатогенного гриба *Fusarium sporotrichioides*, хранящегося в

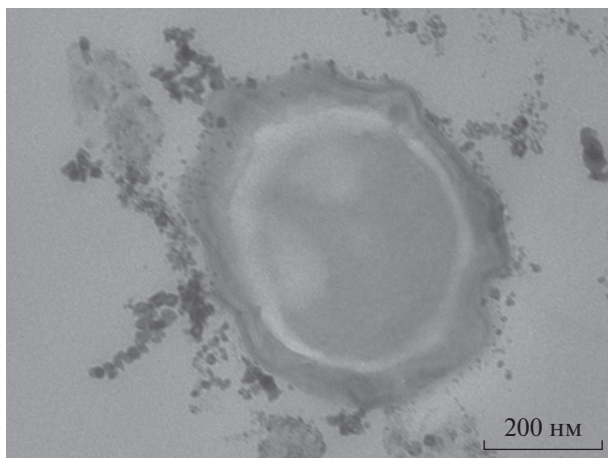


Рис. 1. Ультратонкий срез споры *S. carpaticus* RCAM04697, полученный с помощью трансмиссионного электронного микроскопа (масштабная метка – 0.2 мкм).

научной лаборатории биотехнологий АГУ им. В.Н. Татищева. В лунки помещали суспензию штамма *S. carpaticus* RCAM 04697 в концентрации 10^9 КОЕ/мл, в качестве контроля вносили дистиллированную воду. Опыт проводили в 4-х повторностях.

Исследование инсектицидной активности. Инсектицидную активность штамма в концентрации 10^9 КОЕ/мл определяли в лаборатории филиала ФГБУ “Россельхозцентр” по Астраханской области по методике, основанной на контактном взаимодействии препарата и тест-объекта – бобовой тли *Aphis fabae*. Расчет инсектоакарицидной активности осуществляли по формуле Аббота, % (при сопоставлении с контролем).

Исследование основных групп веществ методом качественных реакций. Определение флавоноидов, алкалоидов, гликозидов и сапонинов культуральной жидкости и экстрактов штамма проводили методом качественных реакций.

Определение органических кислот в водно-спиртовых экстрактах штамма *S. carpaticus* RCAM04697 проводили методом ВЭЖХ с использованием анионообменных колонок и супрессионной системы с кондуктометрическим детектированием. Для определения органических кислот использовали жидкостной хроматограф Waters – Alliance 2695 с диодно-матричным детектором Waters 2996 при длине волны 220 нм.

Определение состава низкомолекулярных органических соединений (НОС). Качественный и количественный состав НОС суспензии и гексанового, водно-спиртового (50 : 50), метанольного экстрактов штамма *S. carpaticus* RCAM04697 исследовали методом ГХ/МС на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010 UI-

tra. Использовали неполярную колонку МТХ (1.30 м × 0.25 мм × 0.25 мкм); газ-носитель – гелий. Масс-спектры снимали в режиме сканирования по полному диапазону масс (30–1090 m/z) в программном режиме температур (35°C – 3 мин, 2°C/мин до 60°C – 3 мин, 2°C/мин до 80°C – 3 мин, 4°C/мин до 120°C – 3 мин, 5°C/мин до 150°C – 3 мин, 15°C/мин до 240°C – 10 мин) с последующей пошаговой обработкой хроматограмм. Идентификацию обнаруженных НОС проводили с использованием библиотек масс-спектров “NIST-2014” и “Wiley”. Количественный анализ выполняли, используя декафторбензофенон и бензофенон в качестве внутренних стандартов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфолого-культуральные и физиолого-биохимические свойства

Штамм *S. carpaticus* K-11 RCAM04697 характеризуется следующими культурально-морфологическими свойствами. На крахмально-казеиновой среде колонии круглые, слабоскладчатые, с мучнистой поверхностью ($d = 4$ мм). Воздушный мицелий темно-коричневого цвета, субстратный – вишнево-красного цвета. Пигмент на среду не влияет. Пигменты, как продукты вторичного метаболизма, являются важной биохимической характеристикой актинобактерий (Гаузе и соавт., 1983). Оптимальная температура роста 28°C. Оптимальное значение pH 7.0–7.1. Споры прямые или извитые, короткие. Как видно на электронных микрофотографиях, споры овальные и шаровидные с плотной оболочкой, размером 0.5–1.0 × 1.0–1.1 мкм (рис. 1).

Исследование физиолого-биохимических признаков показало, что штамм не выделяет сероводород; использует органический азот (пептон); восстанавливает нитраты в нитриты; развивается на среде с мальтозой, глюкозой, фруктозой, лактозой, сахарозой, маннитом; не растет на средах с ксилитом, арабинозой, раффинозой, ионозитом.

Штамм депонирован в ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения (ФГБНУ “Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии”, г. Пушкин) под номером RCAM04697 и в государственной коллекции патогенных микроорганизмов и клеточных культур “ГКПМ-Оболенск” (ФБУН “Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии”) под номером SCPM-O-B-9993.

Для хранения штамма используется метод периодических пересевов (4–6 раз в год) на крахмально-казеиновой среде.

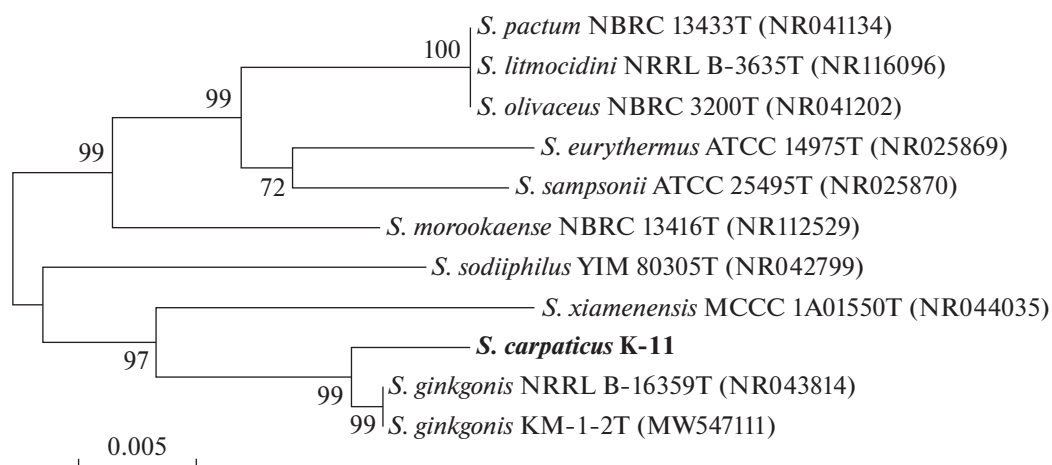


Рис. 2. *Rrs*-филограмма, отражающая таксономическое положение штамма К-11 в пределах рода *Streptomyces*. Полу-жирным шрифтом выделен изученный в данной работе штамм; литерой “Т” отмечены типовые штаммы; указаны уровни поддержки кластеров (более 30%).

Генотипическая характеристика. Анализ гена *16S rPHK*

С помощью метода секвенирования обнаружено, что фрагмент *rrs* гена штамма К-11 имеет уровень сходства 100% с аналогичным фрагментом типового штамма *Streptomyces carpaticus*, что позволяет отнести изучаемый штамм к данному виду (рис. 2).

Штамм К-11 сформировал единый кластер с типовым штаммом *S. ginkgonis* KM-1-2Т при высоком уровне поддержки 99%.

Результаты полногеномного секвенирования

В результате полногеномного секвенирования на платформе Illumina MiSeq получено 916371 коротких прочтений (533 148 207 п.н.), на платформе MinION – 103 371 (24 766 704 п.н.). Впервые в базе данных NCBI GenBank задепонирована полногеномная последовательность штамма *Streptomyces carpaticus* под номером CP104005.1 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/CP104005.1>). Аннотация осуществлена в NCBI Prokaryotic Genome Annotation Pipeline (PGAP) GeneMarkS-2+ (revision 6.2). Финальная сборка генома состояла из одной линейной хромосомы размером 5 968 715 п.н. (G + C) состав – 72.84%. В процессе аннотации и анализа генома было определено 5206 последовательности, кодирующие белки, 60 последовательностей тРНК, 15 – рРНК (5 – 5S, 5 – 16S, 5 – 23S) и 8 CRISPR-локусов.

Биологическая активность штамма *S. carpaticus* RCAM04697

Суспензию и экстракты штамма *S. carpaticus* RCAM04697 исследовали на биологическую ак-

тивность: фитотоксическую, антифунгальную, противовирусную, антиоксидантную и инсектицидную.

Фитотоксичность штамма. Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 не оказал токсического действия на растения. Выявлено, что с обработкой всеми экстрактами при концентрации 0.5 мг/мл, в отличие от концентрации 1 мг/мл, наблюдалось увеличение всхожести семян редиса, что говорит о повышении ингибирующего эффекта при увеличении концентрации изучаемых образцов (табл. 1).

Наиболее высокие биометрические показатели растений, характеризующиеся длиной корня, выявлены в гексановом экстракте штамма *S. carpaticus* RCAM04697 2.67–2.82 см, превышающем контроль на 2.55 и 2.53 см – 2.38 и 2.40 см, и водно-спиртовом экстракте 80 : 20 в концентрации 0.5 мг/мл – 2.44 см, превышающем контроль на 2.15–2.17 см. Проявление высокой фитостимулирующей активности у гексановых экстрактов может быть связано с присутствием соединений стероидной природы, которые обладают высокой биологической активностью. В основном в литературе встречаются сведения о защитных свойствах стрептомицетов, используемых для борьбы с фитопатогенами (Pacios-Michelena et al., 2021). Но стрептомицеты также играют важнейшую роль в создании почвенного плодородия и оптимизации условий произрастания растений, что проявляется в стимуляции их роста, развития и увеличении урожайности в 2–2.5 раза (Бурцева и соавт., 2014; Чулуун и соавт., 2014; Pylro et al., 2019).

Противовирусная активность. После искусственного заражения растений вирусами и опрыскивания суспензией штамма определяли количество бессимптомных растений. Обнаружено, что суспензия исследуемого штамма проявляет про-

Таблица 1. Влияние штамма *S. carpaticus* RCAM04697 на биометрические характеристики редиса

| Вариант | Средняя всхожесть, % | | Средняя длина корня, см | |
|------------------------------------|----------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 |
| Концентрация, мг/мл | | | | |
| Гексановый экстракт | 90.1 ± 1.21 | 87.5 ± 0.25 | 2.82 ± 0.22 | 2.67 ± 1.21 |
| Метанольный экстракт | 59.2 ± 0.20 | 57.0 ± 0.11 | 0.41 ± 1.14 | 0.31 ± 0.14 |
| Водно-спиртовой экстракт (20 : 80) | 75.7 ± 0.61 | 70.8 ± 0.34 | 1.85 ± 0.23 | 0.33 ± 0.62 |
| Водно-спиртовой экстракт (50 : 50) | 74.1 ± 2.30 | 73.8 ± 1.31 | 1.39 ± 0.25 | 1.15 ± 0.85 |
| Водно-спиртовой экстракт (80 : 20) | 86.6 ± 2.11 | 84.1 ± 1.21 | 2.44 ± 0.36 | 0.98 ± 0.92 |
| Культуральная жидкость | 75.5 ± 1.54 | | 1.78 ± 1.14 | |
| Контроль № 1 | 42.1 ± 0.22 | | 0.27 ± 1.32 | |
| Контроль № 2 | 44.4 ± 1.63 | | 0.29 ± 2.10 | |

Таблица 2. Противовирусная активность суспензии штамма *S. carpaticus* RCAM04697 в лабораторных условиях

| Вариант эксперимента | Количество инокулированных растений, шт. | Количество растений без симптомов | |
|---|--|-----------------------------------|------|
| | | шт. | % |
| Томаты | | | |
| Контроль при инокуляции ВОМ | 80 | 2 | 2.5 |
| Контроль при инокуляции ВМТо | 80 | 4 | 5.0 |
| <i>S. carpaticus</i> RCAM04697 | | | |
| Бактеризация суспензией штамма растений после инокуляции ВОМ | 80 | 32 | 40.0 |
| Бактеризация суспензией штамма растений после инокуляции ВМТо | 80 | 26 | 32.5 |
| Картофель | | | |
| Контроль при инокуляции УВК | 80 | 3 | 3.8 |
| Контроль при инокуляции ХВК | 80 | 2 | 2.5 |
| <i>S. carpaticus</i> RCAM04697 | | | |
| Бактеризация суспензией штамма растений после инокуляции УВК | 80 | 41 | 51.3 |
| Бактеризация суспензией штамма растений после инокуляции ХВК | 80 | 33 | 41.3 |

тивовирусную активность в отношении ВОМ, ВМТо, УВК и ХВК (табл. 2).

При бактерилизации томатов, зараженных ВОМ, суспензией штамма количество бессимптомных растений составило 40.0%, зараженных ВМТо – 32.5%, в то время как в контроле это количество было 2.5 и 5.0% соответственно. Изучение противовирусной активности штамма на картофеле методами иммунострипов и ПЦР-диагностики показало количество бессимптомных растений, зараженных УВК – 51.3%, зараженных ХВК – 41.3%. В литературе редко встречается информация о проявлении активности микроорганизмов в отношении вирусов растений. Известен штамм *Streptomyces chrysomallus* P-21 с фиторегуляторной активностью, который проявлял свойства против вируса мозаики костра на ячмене (патент № 2226214).

Таким образом, лабораторные опыты по изучению противовирусных свойств исследуемого

штамма свидетельствует о подавлении развития вирусных патогенов ВОМ, ВМТо, УВК, ХВК.

Антиоксидантная, антифунгальная, инсектицидная активности. Антиоксиданты – вещества, которые задерживают, предотвращают или ингибируют окислительное повреждение молекул. Физиологическая роль антиоксидантов заключается в предотвращении повреждения клеточных компонентов в результате химических реакций, в которых участвуют свободные радикалы. Суспензия и экстракты штамма обладали антиоксидантной активностью, которая варьировала от 35.2% (водно-спиртовой экстракт 80 : 20) до 88.8% (суспензия штамма *S. carpaticus* RCAM04697), что существенно выше контроля (аскорбиновой кислоты) – 12.5%. Наибольшую антиоксидантную активность проявила суспензия штамма *S. carpaticus* RCAM04697 – 88.8%. Среди трех разных вариантов водно-спиртовых экстрактов достаточно высокий процент отме-

Таблица 3. Биологическая активность штамма *S. carpaticus* RCAM04697

| Вариант опыта | Антифунгальная активность, ДЗЗР* <i>F. sporotrichioides</i> , мм | Инсектицидная активность, % относ. <i>A. fabae</i> через 6 ч обработки | Антиоксидантная активность, % |
|------------------------------------|--|--|-------------------------------|
| Гексановый экстракт | 25.3 ± 1.24 | 100.0 | 37.2 ± 0.15 |
| Метанольный экстракт | 17.4 ± 3.20 | 100.0 | 56.1 ± 0.18 |
| Водно-спиртовой экстракт (20 : 80) | 28.1 ± 0.23 | 72.5 | 76.0 ± 0.08 |
| Водно-спиртовой экстракт (50 : 50) | 17.5 ± 1.12 | 100.0 | 63.5 ± 0.05 |
| Водно-спиртовой экстракт (80 : 20) | 14.2 ± 2.14 | 100.0 | 35.2 ± 0.12 |
| Суспензия | 31.4 ± 1.11 | 100.0 | 88.8 ± 0.09 |
| Контроль | 0 | 0 | 12.5 ± 0.07 |

* ДЗЗР – диаметр зоны задержки роста микромицета.

чен в модификации 20 : 80 штамма *S. carpaticus* RCAM04697 – 76.0%.

Суспензия и все экстракты штамма *S. carpaticus* RCAM04697 в различной степени ингибировали рост фитопатогенного гриба *F. sporotrichioides*. Наибольшее антагонистическое действие оказала суспензия и водно-спиртовой экстракт (20 : 80) с ДЗЗР гриба 31.4 и 28.1 мм соответственно (табл. 3). Микроскопирование показало лизис мицелия. Стрептомицеты широко известны своей антифунгальной активностью, например, против листовой и стеблевой ржавчины пшеницы, листовой ржавчины и септориоза ячменя, корневой гнили овса и др. (Широких и соавт., 2020). Присутствие у стрептомицетов первичных метаболитов – хитиназ, определяет ингибирование ими роста грибов путем разрушения клеточной стенки. Увеличение количества клеток, снижение разнообразия почвенного прокариотического комплекса с одновременным снижением количества грибов связано с развитием селективной группы гидролитического комплекса хитин-деградирующих микроорганизмов (Manucharova et al., 2016).

Инсектицидная активность в отношении бобовой тли *A. fabae* через 6 ч обработки составила 100% в вариантах: суспензия, водно-спиртовой (80 : 20, 50 : 50), метанольный и гексановый экстракты. Полученные данные свидетельствуют о том, что штамм *S. carpaticus* RCAM04697 способен к синтезу метаболитов с инсектицидной активностью (Григорян и соавт., 2020).

Таким образом, исследование показало, что суспензия и экстракты штамма *S. carpaticus* RCAM04697 обладали выраженной антиоксидантной, антифунгальной, инсектицидной активностью, ингибировали развитие фитопатогенного гриба *F. sporotrichioides* и бобовой тли *A. fabae*.

Компонентный состав вторичных метаболитов штамма

В экстрактах и суспензии штамма *S. carpaticus* RCAM04697 исследовали присутствие гликозидов, сапонинов, алкалоидов, флавоноидов. В составе метаболитов обнаружены флавоноиды, алкалоиды и гликозиды. Наличие флавоноидов установлено во всех исследуемых образцах, за исключением гексанового экстракта. Флавоноиды являются эффективными противомикробными агентами против широкого спектра микроорганизмов: бактерий, грибов, водорослей, а также обладают антиоксидантными свойствами (Karak, 2019). Алкалоиды присутствовали в гексановом и водно-спиртовом (20 : 80) экстрактах. Алкалоиды представляют собой большую и структурно разнообразную группу соединений, которые известны своей способностью усиливать действие антибиотиков. Изучено влияние алкалоидов на системы регуляции генов вирулентности. Например, синтетический изохинолиновый алкалоид вирстатин ингибировал регулятор транскрипции ToxT у *Vibrio cholerae*, предотвращая экспрессию холерного токсина и фимбрий и обеспечивая *in vivo* защиту от кишечной колонизации (Cushnie et al., 2014). Гликозиды выявлены во всех изучаемых пробах, за исключением гексанового и метанольного экстрактов штамма. Гликозиды характеризуются высокой фунгицидной и ростстимулирующей активностью (Толкачева и соавт., 2014). Результаты качественных реакций свидетельствуют об отсутствии сапонинов во всех исследуемых образцах.

Методом ВЭЖХ обнаружено наличие шести органических кислот в водно-спиртовых экстрактах штамма (табл. 4). Уксусная и фумаровая кислоты выявлены во всех экстрактах. Уксусная кислота в наибольшем количестве содержалась в водно-спиртовом экстракте (50 : 50) – 21.277 г/л. Широко известны антибактериальные, антифунгальные и противовирусные свойства уксусной кислоты (Zinn, Vockmühl, 2020). Фумаровая кис-

Таблица 4. Органические кислоты водно-спиртовых экстрактов штамма *S. carpaticus* RCAM04697

| Тривиальное название | Название по ИЮПАК | Содержание, г/л | | |
|-------------------------|--|-----------------|---------|---------|
| | | 20 : 80 | 80 : 20 | 50 : 50 |
| Изолимонная кислота | 1-Гидрокси-1,2,3-пропантрикарбоновая кислота | – | 0.484 | – |
| Уксусная кислота | Этановая кислота | 20.395 | 19.443 | 21.277 |
| Фумаровая кислота | <i>Транс</i> -бутендиовая кислота | 0.004 | 0.004 | 0.004 |
| Молочная кислота | 2-Гидроксипропановая кислота | 0.270 | – | – |
| Пировиноградная кислота | 2-Оксопропановая кислота | – | 0.082 | – |
| Яблочная кислота | 2-Гидроксипропановая кислота | 0.063 | – | 0.009 |

лота обнаружена в концентрации 0.004 г/л во всех экстрактах. Она обладает антиоксидантным и бактериостатическим эффектом. Обработка пищевой продукции фумаровой кислотой приводила к снижению общего количества мезофильных и психротрофных бактерий, бактерий, продуцирующих H₂S, и *Pseudomonas* spp. (Remya et al., 2022). Изолимонная кислота с содержанием 0.484 г/л обнаружена в водно-спиртовом экстракте (80 : 20), в котором также установлено присутствие пировиноградной кислоты (0.082 г/л). Молочная кислота, известная противомикробными свойствами, зафиксирована в водно-спиртовом экстракте (20 : 80) в количестве 0.270 г/л. Яблочная кислота присутствовала в двух образцах: водно-спиртовой экстракт (20 : 80) с содержанием 0.063 г/л и водно-спиртовой экстракт (50 : 50) с содержанием 0.009 г/л. Обнаруженные органические кислоты обладают мощными антиоксидантными и противомикробными свойствами (Рыжкова и соавт., 2018).

ГХ/МС-анализ показал наличие в составе вторичных метаболитов – спиртов, альдегидов, углеводов, эфиров, серосодержащих соединений и других групп низкомолекулярных органических соединений (НОС) (табл. 5) (Батаева и соавт., 2021). При всех вариантах экстракции в составе НОС преобладали спирты и эфиры. Доминирующими соединениями в суспензии, в гексановом и водно-спиртовом экстракте были 3-бутенилпентилового эфира и 2-метилпентан-2,4-диол (1,2-гександиол). Их содержание в суспензии составило 32.17 и 23.20%, в гексановом экстракте – 19.49 и 20.69% и в водно-спиртовом экстракте – 15.59 и 18.91% соответственно.

В метанольном экстракте преобладал 5-(пиридин-4-ил)-1Н-пиразол-3-карбоксилат (57.8% от суммарного содержания НОС). По данным Kagouchi и соавт. (2018) вещества, содержащие пиразол, характеризуются противовирусными, противомикробными и противоопухолевыми свойствами. 1,2-Гександиол обладает широким антимикробным спектром действия, нарушает потенциал цитоплазматической мембраны и эффективен против как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий.

Возможные биологические активности 3-бутенилпентилового эфира не изучены. Хорошим решением исследования его потенциальных свойств мог бы стать метод QSAR (Quantitative Structure-Activity Relationship), позволивший, в частности, выявить наиболее перспективные метаболиты высших водных растений, обладающих противовоспалительной, антифунгальной и антибактериальной активностями (Kurashov et al., 2016).

Таким образом, изучен синтез штаммом *S. carpaticus* RCAM04697 химических соединений различных групп: флавоноидов, алкалоидов, гликозидов, спиртов, альдегидов, углеводов, эфиров, серосодержащих соединений; органических кислот (изолимонная, уксусная, фумаровая, молочная, пировиноградная, яблочная); 3-бутенилпентилового эфира, 1,2-гександиола, 5-(пиридин-4-ил)-1Н-пиразол-3-карбоксилата. Высокие противомикробные свойства органических кислот биологического происхождения хорошо известны, и они рассматриваются как перспективные соединения для защиты семян, кормов и растений (Рыжкова, 2018).

В биологической борьбе с фитопатогенами стрептомицеты играют регуляторную роль. Одновременный биосинтез вторичных метаболитов широкого спектра действия, по-видимому, определяет стратегию их воздействия на другие организмы и способность к высоким адаптационным возможностям и высокой конкурентоспособности в различных экологических нишах.

Штамм был запатентован в Российской Федерации в качестве средства для защиты от насекомых-вредителей, грибных, вирусных болезней и стимуляции роста томатов (патент РФ № 2695157).

Проведенные исследования показали, что бактерии рода *Streptomyces* являются богатым источником комплексных метаболитов, проявляющих высокую биологическую активность, и могут служить основой для разработки полифункциональных биопрепаратов для растениеводства с фитостимулирующими, противовирусными, ан-

тифунгальными, антиоксидантными и инсектицидными свойствами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках реализации проекта “Разработка экологически безопасного средства защиты растений на основе почвенных актинобактерий для восстановления агроэкосистем” по Программе развития Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева на 2021–2030 гг. (“Приоритет 2030”), а также в рамках исследований, проводимых по теме № 0154-2019-0002 ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит результатов исследований с использованием животных в качестве объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

В настоящей статье отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимова О.С. *Streptomyces loidensis* и *Streptomyces herbaricolor*: биологическое обоснование использования вторичных метаболитов для создания новых инсекто-акарицидных биопрепаратов. Автореферат дис. ... канд. биол. наук, 24.07.2008. Санкт-Петербург: Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 2008. 19 с.
- Батаева Ю.В., Григорян Л.Н., Курашов Е.А., Крылова Ю.В., Федорова Е.В., Явид Е.Я., Ходонович В.В., Яковлева Л.В. Изучение метаболитов *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 для создания экологически безопасных средств защиты растений // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 172–178. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-172-178>
- Бурцева С.А., Пойрас Н.А., Бырса М.Н., Пойрас Л.Н. Эффект предпосевной обработки семян томатов метаболитами стрептомицетов почв Молдовы // Материалы II Всеросс. научно-практ. конф. с межд. участием “Биоразнообразие и рациональное использование природных ресурсов”. Махачкала, 2014. С. 213–216.
- Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. М.: Наука, 1983. 248 с.
- Григорян Л.Н., Батаева Ю.В., Шляхов В.А. Влияние штамма бактерий *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 на фитостимуляцию, фитовирусы томата и насекомых-вредителей в лабораторных условиях // Естественные и технические науки. 2020. № 6(144). С. 58–61.
- Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Стариков П.А., Горностаева Е.А., Ашихмина Т.Я. Микробы-антагонисты против фитопатогенных бактерий и грибов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 6–14.
- Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Starikov P.A., Gornostayeva E.A., Ashikhmina T.Ya. Microbes-antagonists against of phytopathogenic bacteria and fungi (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. № 2. P. 6–14. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-2-006-014>
- Егорова А.М., Тарчевский И.А. Праймин-сигнальная функция антибиотиков, продуцируемых стрептомицетами // Экобиотех. 2019. Т. 2. № 4. С. 504–509. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-4-504-509>
- Методы общей бактериологии / Под ред. Герхардт Ф.М. М.: Мир, 1984. Т. 1–3.
- Патент РФ № 2156301. 2000. Штамм актиномицета *Streptomyces avermitilis* ССМ 4697 – продуцент авермектинов.
- Патент РФ № 2226214. 2004. Штамм актиномицета *Streptomyces chrysomallus* P-21 для получения биопрепарата полифункционального действия.
- Патент РФ № 2243259. 2002. Штамм актиномицета *Streptomyces hygrosopicus* subsp. ЦКМ В-4561, обладающий фунгицидными, бактерицидными и инсектицидными свойствами.
- Патент РФ № 2695157. 2019. Штамм *Streptomyces carpaticus* для защиты от насекомых-вредителей, грибных, вирусных болезней и стимуляции роста томатов.
- Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Выделение почвенных стрептомицетов – продуцентов комплексных антибиотиков // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова. 2017. Т. 13. С. 18–24.
- Рыжкова Е.П., Данилова И.В., Шамрайчук И.Л., Кураков А.В., Нетрусов А.И. Антифунгальная активность штамма *Propionibacterium freudenreichii* представителя рода *Lactobacillus* // Микология и фитопатология. 2018. Т. 52. С. 144–149.
- Ryzhkova E.P., Danilova I.V., Shamraichuk I.L., Kurakov A.V., Netrusov A.I. Antifungal activity of *Propionibacterium freudenreichii* and several *Lactobacillus* species // Mycology and Phytopathology. 2018. V. 52. P. 144–149.
- Толкачева Н.В., Комаровская-Порохнявец Е.З., Новиков В.П. Биологическая активность стероидных гликозидов, выделенных из луковок *Allium cyrillii* ten. (Alliaceae) // Фармация и фармакология. 2014. № 6(7). С. 29–32.
- Tolkachova N.V., Komarovskaya-Porokhnyavets E.Z., Novikov V.P. Biological activity of steroid glycosides from bulbs of *Allium cyrillii* ten. (Alliaceae) // Pharmacy and Pharmacology. 2014. № 6(7). P. 29–32. [https://doi.org/10.19163/2307-9266-2014-2-6\(7\)-29-32](https://doi.org/10.19163/2307-9266-2014-2-6(7)-29-32)
- Чулуун Б., Сапармырадов А., Алимова Ф.К., Миндубаев А.З. Сравнение показателей фитотоксичности, фунгицидной и бактерицидной активности стрептомицетов из различных местообитаний // Бултеровские сообщения. 2014. Т. 38. № 6. С. 147–152.
- Широких И.Г., Бакулина А.В., Назарова Я.И., Широких А.А., Козлова Л.М. Влияние *Streptomyces castelarensis* A4 на заболеваемость и урожайность зерновых культур полевого севооборота // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. С. 59–66.
- Shirokikh I.G., Bakulina A.V., Nazarova Ya.I., Shirokikh A.A., Kozlova L.M. The influence of *Streptomyces castelarensis* A4 on the incidence and yield of grain crops of field crop rotation // Mycology and Phytopathology. 2020. V. 54. P. 59–66. <https://doi.org/10.31857/S0026364820010080>

- Cho J.Y., Kim M.S. Antibacterial benzaldehydes produced by seaweed-derived *Streptomyces atrovirens* PK288-21 // Fisheries Science. 2012. V. 78. P. 1065–1073. <https://doi.org/10.1007/s12562-012-0531-3>
- Cushnie T., Cushnie B., Lamb A.J. Alkaloids: An overview of their antibacterial, antibiotic-enhancing and antivirulence activities // Int. J. Antimicrob. Agents. 2014. V. 44. P. 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2014.06.001>
- Grigoryan L.N., Bataeva Y.V., Andreeva E.D., Zakar'yeva D.Kh., Turaeva Z.O., Antonova S.V. Study of the component structure of the metabolites of bacteria *Nocardioopsis umidischolae* in the search for eco-friendly plant protection agents // Russ. J. Gen. Chem. 2020. V. 90. P. 2531–2541. <https://doi.org/10.1134/S1070363220130010>
- Karak P. Biological activities of flavonoids: an overview // Int. J. Pharm. Sci. Res. 2019. V. 10. P. 1567–1574. [https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.10\(4\).1567-74](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.10(4).1567-74)
- Karrouchi K., Radi S., Ramli Y., Taoufik J., Mabkhot Y.N., Al-aizari F.A. Synthesis and pharmacological activities of pyrazole derivatives // Molecules. 2018. V. 23. Art. 134. P. 1–85. <https://doi.org/10.3390/molecules23010134>
- Korkmaz M.O., Erturk D. Gurel insecticidal activity of some strains of streptomycetes isolated from the soil against larvae and adults of the Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata*) // Turkey: Bitki Koruma Bul. 2015. V. 55. P. 73–84. <https://doi.org/10.3923/jm.2017.218.228>
- Kurashov E.A., Fedorova E.V., Krylova J.V., Mitrukova G.G. Assessment of the potential biological activity of low molecular weight metabolites of freshwater macrophytes with QSAR // Scientifica. 2016. V. 2016. Art. 1205680. <https://doi.org/10.1155/2016/1205680>
- Manucharova N.A., Troshcheva E.V., Kol'tsova E.M., Demkina E.V., Karaevskaya E.V., Rivkina E.M., Mardanov A.V., El'-Registan G.I. Characterization of the structure of the prokaryotic complex of antarctic permafrost by molecular genetic techniques // Microbiology (Moscow). 2016. V. 85. P. 102–108. <https://doi.org/10.7868/S0026365616010055>
- Pacios-Michelen S., Aguilar González C.N., Alvarez-Perez O.B., Rodriguez-Herrera R., Chávez-González M., Arredondo Valdés R., Ascacio Valdés J.A., Govea Salas M., Ilyina A. Application of *Streptomyces* antimicrobial compounds for the control of phytopathogens // Front. Sustain. Food Syst. 2021. V. 5. Art. 696518. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.696518>
- Pylro V.S., Dias A.C.F., Andreote C.C.F., Andreote F.D., Melo D.E., Varani A., Figueiredo D.E., Ribeiro I.A., Kitano I.T., Almeida D.E., Bernardo E.R. Draft genomic sequences of *Streptomyces misionensis* ACT66 and *Streptomyces albidoflavus* act77, bacteria with potential application for phytopathogen biocontrol // Microbiol. Resour. Announc. 2019. V. 8. № 36. P. 118–125. <https://doi.org/10.1128/MRA.00949-19>
- Remya S., Sivaraman G.K., Joseph T.C., Parmar E., Sreelakshmi K.R., Mohan C.O., Ravishankar C.N. Influence of corn starch based bio-active edible coating containing fumaric acid on the lipid quality and microbial shelf life of silver pomfret fish steaks stored at 4°C // J. Food Sci. Technol. 2022. V. 59. P. 3387–3398. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05322-y>
- Řezanka T., Spížek Přikrylová J., Prell A., Dembitsky V.M. Five new derivatives of nonactic and homo-nonactic acids from *Streptomyces globisporus* // Tetrahedron. 2004. V. 60. P. 4781–4787. <https://doi.org/10.1016/J.TET.2004.04.006>
- Zinn M.-K., Bockmühl D. Did granny know best? Evaluating the antibacterial, antifungal and antiviral efficacy of acetic acid for home care procedures // BMC Microbiology. 2020. V. 20. Art. 265. P. 1–9.

Biological Activity and Composition of Metabolites of Potential Agricultural Application from *Streptomyces carpaticus* K-11 RCAM04697 (SCPM-O-B-9993)

Yu. V. Bataeva^{1, *}, L. N. Grigoryan¹, A. G. Bogun², A. A. Kislichkina², M. E. Platonov², E. A. Kurashov³, J. V. Krylova⁴, A. G. Fedorenko⁵, and M. P. Andreeva¹

¹Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, 414056 Russia

²State Scientific Center of Applied Microbiology and Biotechnology, Rospotrebnadzor, Obolensk, 142279 Russia

³Institute of Limnology, a Separate Subdivision of the St. Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 196105 Russia

⁴Saint-Petersburg Branch of the All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (L.S. Berg GosNIORKh), Saint-Petersburg, 199004 Russia

⁵Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006 Russia

*e-mail: aveatab@mail.ru

Received November 2, 2022; revised November 28, 2022; accepted January 10, 2023

Abstract—Strain K-11 was isolated from the highly saline brown semi-desert soil of the Astrakhan region. Based on analysis of the 16S rRNA gene sequence, this strain was identified as *Streptomyces carpaticus* K-11 RCAM04697 (SCPM-O-B-9993). Whole genome sequencing of the strain was performed. Phytotoxicity, antiviral, antioxidant, antifungal, and insecticidal activities of the strain were studied. All extracts and suspensions of *S. carpaticus* strain RCAM04697 had plant-stimulating activity. Antiviral properties was exhibited as suppression of development and propagation of viral pathogens in laboratory conditions: *Tomato Mosaic Virus* (ToMV) – 26.3%, *Cucumber Mosaic Virus* (CMV) – 33.8%, *Y-Potato Virus* (YVK) (*Potato Y potyvirus*, PVY) – 51.3%, *Potato X-Virus* (PVX) (*Potato X potyvirus*, PVX) – 41.3%. The highest antioxidant activity was shown by a suspension of *S. carpaticus* strain RCAM04697 (88.8%) and its aqueous-alcoholic (20 : 80) extract

(76.0%). The strain inhibited growth of the phytopathogenic fungus *Fusarium sporotrichioides* to varying degrees. The insecticidal activity against *Aphis fabae* after 6 h of treatment was 100% in the variants with suspension treatment, water-alcohol (80 : 20, 50 : 50), methanol, and hexane extracts. The metabolites of the *S. carpaticus* RCAM04697 strain included flavonoids, alkaloids, glycosides, organic acids (isocitric, acetic, fumaric, lactic, pyruvic, and malic), alcohols, aldehydes, hydrocarbons, ethers, sulfur-containing compounds, and other groups of low-molecular weight organic compounds.

Keywords: streptomycetes, *Streptomyces*, actinobacteria, antioxidant activity, antifungal activity, antiviral activity, metabolites, extract, mass spectrometry