

УДК 579.873.71, 582.29

STREPTOMYCES AVERMITILIS: КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ, СВОЙСТВА

© О.С. Бровко¹, Д.В. Жильцов^{1*}, А.Д. Ивахнов^{1,2}, М.В. Богданов^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова РАН, наб. Северной Двины, 23, Архангельск, 163000 (Россия), e-mail: dnorton.usa@gmail.com

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002 (Россия)

Изучен компонентный состав биомассы *S. avermitilis*, включающий авермектин, липиды, белки и полисахаридный комплекс (муреин). Установлено, что в составе липидов *S. avermitilis* присутствуют преимущественно насыщенные жирные кислоты – 86%, содержание мононенасыщенных (пальмитиновая и вакценовая) и полиненасыщенных (линолевая и α -линоленовая) жирных кислот одинаково и составляет около 7%. Следует отметить наличие значительного количества жирных кислот с разветвленной цепочкой (изоформы) – более 70% от общей суммы жирных кислот. Разработана методика выделения полисахаридного комплекса из биомассы *S. avermitilis*. Методом ИК-спектроскопии установлено, что полисахаридный комплекс *S. avermitilis*, как и хитин-глюкановый комплекс, выделенный из таллома эпигейного лишайника вида *Cladonia rangiferina*, построен из звеньев хитина – β -N-ацетилглюкозамина. Показано, что полисахаридный комплекс (муреин) имеет полиамфолитную природу и обладает высокими сорбционными свойствами по отношению к основным (метиленовый голубой) и кислотным (конго красный) красителям. Установлено также, что сорбционная емкость по отношению к изучаемым красителям для полисахаридного комплекса *S. avermitilis* в 2.8–7.6 раз выше, чем для хитин-глюканового комплекса *Cladonia rangiferina*. Это свидетельствует о значительно большем содержании в структуре мурина активных функциональных групп (сорбционных центров), что позволяет рекомендовать его к использованию в качестве эффективного сорбента (энтеросорбента).

Ключевые слова: *Streptomyces avermitilis*, авермектин, жирнокислотный состав липидов, полисахаридный комплекс, лишайник, сорбция.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА РАН «Физико-химические, генетические и морфологические основы адаптации растительных объектов в условиях изменяющегося климата высоких широт» (№ АААА-А18-118012390231-9) с использованием оборудования ЦКП НО "Арктика" САФУ и ЦКП КТ РФ-Арктика (ФИЦКИА РАН)

Введение

Стрептомицеты – широко распространенная группа микроорганизмов, играющих важную роль в трансформации органических соединений и формировании эффективного плодородия почвы. *Streptomyces* – род бактерий семейства *Streptomycetaceae* порядка актиномицетов (*Actinomycetales*) является самым большим родом семейства (около 600 видов), продуцирующим разнообразные антибиотики, активные против

микроскопических грибов, бактерий и опухолевых клеток. До 90% всех антибиотиков получены из *Streptomyces sp.* [1]. Среди представителей рода *Streptomyces* особое значение имеет *S. avermitilis*, который культивируют с целью выделения физиологически активных веществ – антибиотиков авермектинового ряда, обладающих широким спектром инсектицидной, акарицидной и нематоцидной активностей [2]. Авермектины принадлежат к классу 16-членных макролидов, которые в положении C_{13} имеют дисахарид, состоящий из *L*-

Бровко Ольга Степановна – кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, e-mail: brovko-olga@rambler.ru

Жильцов Дмитрий Владимирович – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, e-mail: dnorton.usa@gmail.com

Ивахнов Артем Дмитриевич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, e-mail: ivahnov-tema@yandex.ru

Богданов Михаил Владиславович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, e-mail: bmvmiticha@mail.ru

* Автор, с которым следует вести переписку.

олеандрозы (2,6-дидезокси-3-*O*-метил-*L*-арабиногексозы). Культура продуцента синтезирует комплекс из восьми авермектинов, среди которых выделяют четыре мажорных (A_{1a} , A_{2a} , B_{1a} , B_{2a}) и четыре минорных (A_{1b} , A_{2b} , B_{1b} , B_{2b}) компонентов. Известна также полусинтетическая форма авермектинов – ивермектин, который представляет собой смесь, состоящую из авермектинов B_{1a} и B_{1b} , подвергнутых гидрогенизации в положении 22 и 23. На основе этих соединений в ряде зарубежных стран и в России созданы противопаразитарные препараты и пестициды для применения в ветеринарии и растениеводстве: ивомек, баймек, цевамек, аверсект-1, ниацид, аверсект-2, аверком, ивертин, рустомектин, фитоверм, актофит и др. [3, 4].

Актуальной задачей является рациональное использование биомассы продуцента авермектинов, которая после выделения целевого компонента является отходом производства. В состав биомассы входят также такие биологически активные вещества как липиды, белки, полисахариды, которые также могут найти применение в различных отраслях народного хозяйства. В работе [5] извлекаемые из биомассы *S. avermitilis* липидные фракции рекомендуются для использования в ветеринарии, животноводстве и растениеводстве в качестве ростостимулирующего и иммуномодулирующего средства.

Важнейшим компонентом клеточной стенки бактерий является полисахарид – пептидогликан (муреин), выполняющий механические, защитные, транспортные и антигенные функции. Муреин представляет собой гетерополимер, состоящий из цепочек чередующихся остатков β -N-ацетилглюкозамина и β -N-ацетилмурамовой кислоты (простой эфир молочной кислоты и N-ацетилглюкозамина), соединенных β -(1 \rightarrow 4)-гликозидными связями. Карбоксильная группа молочной кислоты звеньев β -N-ацетилмурамовой кислоты связана амидной связью с пептидом, который соединяет отдельные цепи муреина в трехмерную сетчатую структуру – углевод-белковый комплекс (рис. 1). По своей структуре муреин схож с хитином, формирующим экзоскелет насекомых, ракообразных, а также клеточную стенку грибов и некоторых лишайников. Структурные полисахариды клеточной стенки грибов и лишайников представлены в основном хитином (поли-(N-ацетил-1,4- β -D-глюкопиранозамин)), связанным ковалентной связью с β (1 \rightarrow 3) и β (1 \rightarrow 6) – глюканами, т.е. хитин-глюкановым комплексом (ХГК). Содержание хитина в клеточных стенках грибов различных таксонов существенно варьируется, в том числе и в пределах одного семейства и даже рода, и составляет от 0.2 до 26.2%, а для отдельных видов доходит до 75% от сухой биомассы [6]. Установлено также, что этот полисахарид присутствует и у 29 видов дрожжей в количестве 1–3% общей массы [7]. Для *Streptomyces sp.* в некоторых работах показано присутствие 40% хитина от биомассы [8, 9].

Для выделения ХГК из высших и низших грибов применяются методы кислотного-щелочного гидролиза, отличающиеся числом стадий (деминерализация, депротеинирование) и условиями проведения процесса в зависимости от видовых особенностей и морфологии источников хитина [12].

Благодаря многофункциональной природе полисахаридные хитинсодержащие комплексы, выделяемые из различных источников, могут найти применение в медицине, экологии, пищевой и химической промышленности, в том числе в качестве сорбентов токсикантов различной природы: катионов тяжелых металлов, радионуклидов, органических загрязнителей, канцерогенов [13]. Отмечается биологическая активность хитинсодержащих комплексов, что предопределяет их использование в биомедицине, например, для получения нетканых материалов, обладающих ранозаживляющей активностью, а также в качестве фильтров для очистки жидких и газообразных сред от аэро- и гидрозолей [14].

Целью настоящего исследования является изучение компонентного состава биомассы *S. avermitilis*, выделение и оценка сорбционных свойств полисахаридных компонентов.

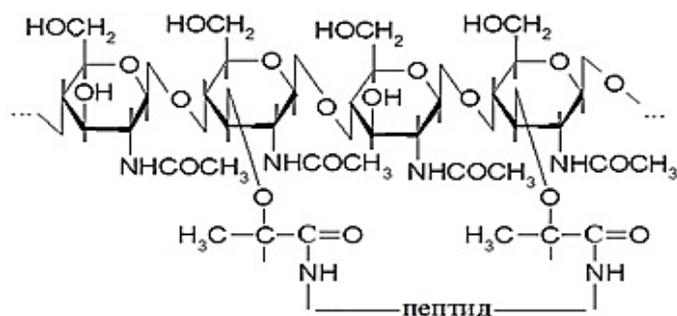


Рис. 1. Схема строения муреина [10, 11]

Экспериментальная часть

Для работы использовали высушенную биомассу *S. avermitilis*, предоставленную ООО НБЦ «Фармбиомед». Согласно [15] определены влажность (5%) и зольность (17.3%) биомассы. Полисахаридный комплекс (ПСК) из биомассы *S. avermitilis* выделяли по методике, применяемой для извлечения ХГК из мицелиального гриба *Aspergillus niger* [16], адаптируя ее к видовым особенностям *S. avermitilis*. Все стадии обработки (рис. 2) модифицировали по температурно-временному режиму и по концентрациям применяемых реагентов. Выход ПСК составил 17.3% от биомассы *S. avermitilis*. После каждой стадии образец промывали дистиллированной водой до pH 7 для удаления продуктов гидролиза, после чего его декантировали на стеклянный фильтр с пористостью 160. Затем осадок смывали следующим реагентом гидролиза.

Идентификацию ПСК проводили методом ИК-спектроскопии (таблетки в KBr). Спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре IRAffinity-1 (*Shimadzu*, Япония) в диапазоне 400–4000 см⁻¹, число сканирований 50, разрешение 4 см⁻¹.

Содержание макро- и микроэлементов в биомассе и ПСК определяли на последовательном волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре Lab Center XRF-1800 (*Shimadzu*, Япония) с использованием метода фундаментальных параметров. Перед анализом образцы измельчали на вибрационной мельнице Retsch MM 400 в размольном стакане из карбида вольфрама объемом 10 мл (шарик диаметром 10 мм, частота колебаний – 30 Гц, продолжительность – 3 мин). Затем измельченные пробы прессовали на таблеточном прессе Retsch PP 25 (давление 516.8 МПа), диаметр таблеток – 13 мм. Параметры измерения: напряжение на рентгеновской трубке – 40 кВ, ток 95 мА, экспозиция – 40 с, измерение фоновых точек – по 20 с. Использовались следующие кристаллы-анализаторы: Ge (для измерения Cl, S, F), PET (Si, Al), TAP (Mg, Na, O) и LiF (для тяжелых металлов). Сцинтилляционный детектор использовался для определения тяжелых металлов, пропорциональный детектор – для остальных элементов. CNH-анализ проводили на элементном анализаторе Euro EA-3000 (конфигурация [CNHS]).

Липиды и авермектины из биомассы *S. avermitilis* выделяли последовательной экстракцией в аппарате Сокслета различными растворителями: гексан, ацетон, 96% водный раствор этанола. При выборе растворителей исходили из их полярности и сродства к липидам и авермектинам.

Качественный состав и содержание жирных кислот в экстракте в виде метиловых эфиров определяли методом газожидкостной хроматографии в системе гексан–эфир (1 : 1) при щелочной реакции среды на приборе Agilent Technologies 7820A GC System Maestro. Внутренний стандарт – C_{19:0}, нонадекановая кислота, не содержится в исследуемом объекте. Для хроматографирования использовали аналитическую капиллярную колонку HP-INNOWAX (60 m × 0,25 mm × 0,50 μm); газ-носитель – азот; пламенно-ионизационный детектор. Начальная температура – 80 °С, конечная – 250 °С. Скорость подъема температуры – 2.5 °С/мин. Скорость газа-носителя в колонке – 2 мл/мин. Поток воздуха 300 мл/мин, водорода 30 мл/мин. Продолжительность анализа – 120 мин. Наличие кислот в пробе подтверждали также методом хромато-масс-спектрометрии (хроматомасс-спектрометр GC-MS QP2010 Plus, *Shimadzu*).

Содержание авермектинов в экстрактах определяли фотометрическим методом с использованием стандарта – авермектина с концентрацией 2 г/л (производитель ООО НБЦ «Фармбиомед»).

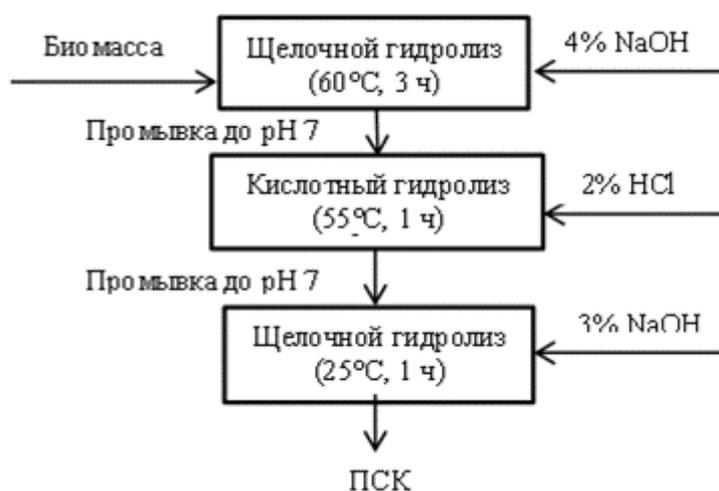


Рис. 2. Схема выделения ПСК из биомассы *S. Avermitilis*

Определение содержания белков в экстрактах проводили фотометрическим методом Бредфорд с использованием красителя Coomassie Brilliant Blue G-250, который образует с белком синие комплексы с максимумом поглощения при длине волны 595 нм (спектрофотометр UV-1800, *Shimadzu*). Калибровку проводили по раствору бычьего сывороточного альбумина ($R^2=0.997$).

Сорбционную способность ПСК оценивали статическим методом по отношению к красителям: метиленовому голубому (МГ), являющемуся аналогом эндотоксинов средней и малой молекулярной массы, и конго красному (КК). Масса сорбента – 50 мг, продолжительность экспозиции – 24 ч, температура – 298 К. Остаточное содержание красителя в растворе после сорбции определяли на спектрофотометре UV-1800, *Shimadzu* при длине волны 400 нм (МГ) и 500 нм (КК) в кюветах с длиной поглощающего слоя 10 мм. Сорбционную емкость (CE , мг/г) вычисляли по формуле:

$$CE = \frac{(C_1 - C_2) \times 0.025}{m},$$

где C_1 (C_2) – массовая концентрация исходного раствора красителя (красителя после сорбции), мг/л; 0.025 – объем раствора красителя, взятый для сорбции, л; m – масса навески сорбента, г.

Обсуждение результатов

Элементный анализ биомассы *S. avermitilis* и ПСК показал, что на каждой стадии гидролиза биомассы удаляется значительное количество органических веществ, что приводит к уменьшению содержания углерода (45.2 и 31.4%) и азота (2.6 и 1.3%) в целевом продукте. Среди макроэлементов выделяется Si, содержание которого в ПСК в 2,5 раза больше (16.1%), чем в исходной биомассе (7.3%). На долю остальных элементов приходится около 1% (Ca, P, K, S, Fe, Al, Mg). Тяжелые металлы (Zn, Cr, Ti, Mo) обнаружены в исходном сырье и ПСК в следовых количествах (менее 0.1%).

В составе органической части биомассы *S. avermitilis* определяли белки, липиды и авермектины. Показано (рис. 3), что степень извлечения авермектина гексаном не превышает 4.4% относительно абсолютно сухой биомассы (а.с.б.), тогда как липидов извлекается этим растворителем 15.7%. Ацетон, как полярный растворитель, извлекает больше авермектинов (6.2%), нежели липидов (5.3%) из оставшихся в биомассе, таким образом, экстракт содержит 54% авермектина и 46% приходится на липиды. На последней стадии экстракции этанолом степень извлечения экстрактивных веществ не превысила 1.7%. Таким образом, для практически исчерпывающей экстракции этих компонентов достаточно двухстадийной последовательной экстракции биомассы гексаном и ацетоном. Выход экстрактивных веществ в ходе последовательной экстракции составил 33.3%, из которых антибиотиков авермектинового ряда – 11%.

Общее содержание белков в биомассе *S. avermitilis* составило 8.5%. В процессе многоступенчатой экстракции гидролизуются часть белков, в ПСК остаточное содержание белков составляет 5%.

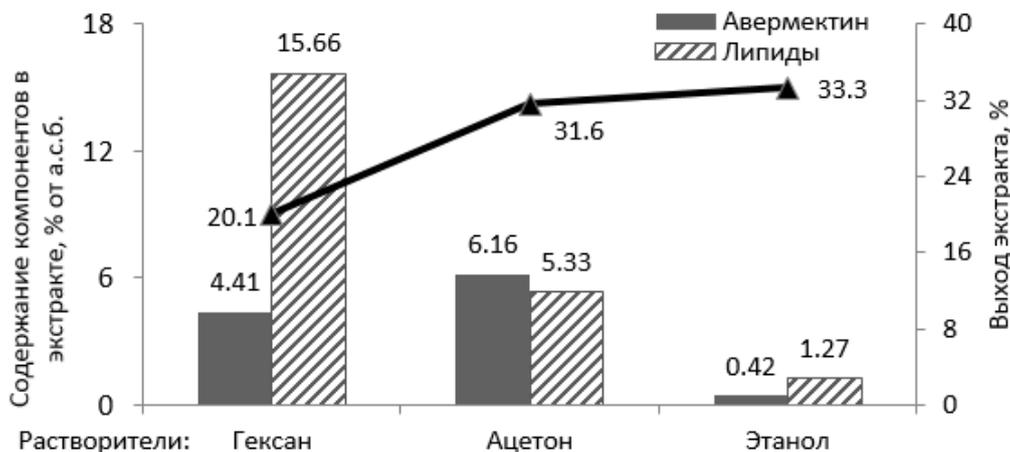


Рис. 3. Состав экстрактов биомассы *S. avermitilis*

Среди веществ, входящих в состав клеток микроорганизмов, особая роль принадлежит липидам. Липиды входят в состав клеточных мембран, митохондрий, являются составной частью ферментов, координируют важнейшие метаболические реакции и обладают антимикробными и антиоксидантными свойствами [17]. Особенно велика роль липидов при стрессе, когда изменение степени ненасыщенности фосфолипидов, обусловленное изменениями в составе их ацетильных цепей, способствует выживанию организма в экстремальных условиях существования [18]. Кроме того, липиды обладают антибактериальной, антимикробной, радиозащитной, иммунологической, противоопухолевой активностью [19, 20].

Липидная фракция *S. avermitilis* неоднородна и в ее состав входят эфиры стерина, свободные жирные кислоты (ЖК), фосфолипиды, стерин, моно-, ди- и триглицериды [21], причем состав фракции зависит, в числе прочего, и от природы экстрагента. Как и у большинства микроорганизмов у *S. avermitilis* в липидной фракции содержатся как насыщенные, так и ненасыщенные ЖК с длиной цепи от 13 до 24 атомов углерода. Ненасыщенные и разветвленные ЖК благодаря особенностям химического строения выполняют адаптивную функцию и увеличивают текучесть и пластичность мембраны микроорганизмов. При этом синтез ненасыщенных и метилразветвленных ЖК регулируется внешними для микроорганизмов факторами: температурой, органическими липофильными соединениями микробного происхождения, наличием разветвленных короткоцепочечных карбоновых кислот и др. [22].

При хроматографировании экстракта липидов биомассы *S. avermitilis* (рис. 4, табл.) выделены насыщенные кислоты: тридекановая (C_{13:0}), миристиновая (C_{14:0}), пальмитиновая (C_{16:0}), маргаритовая (C_{17:0}), стеариновая (C_{18:0}), арахидиновая (эйкозановая) (C_{20:0}) и лигноцериновая (C_{24:0}). Также среди них присутствуют метилированные кислоты или кислоты с разветвленной цепочкой: 12-метилтридекановая (12Me-C_{13:0}), 12-метилмиристиновая (12Me-C_{14:0}), 14-метилмиристиновая (14Me-C_{14:0}), 12-метилпентадекановая (12Me-C_{15:0}), 14-метилпентадекановая (14Me-C_{15:0}), 14-метилпальмитиновая (14Me-C_{16:0}) кислоты. Обнаружена и специфическая циклопропановая кислота: 2-гексил, циклопропанкаприловая. Следует отметить наличие значительного количества ЖК с разветвленной цепочкой (изоформы) – более 70% от общей суммы ЖК. Из мононенасыщенных ЖК у *S. avermitilis* присутствуют: пальмитолеиновая (C_{16:1}) и вакценовая (C_{18:1}) кислоты. Также обнаружены полиненасыщенные незаменимые (эссенциальные) ЖК: линолевая (C_{18:2}), относящаяся к классу омега-6-ненасыщенных ЖК, и α-линоленовая (C_{18:3}), относящаяся к классу омега-3-ненасыщенных ЖК. Содержание эссенциальных ЖК составляет 6.9% от суммы ЖК. Таким образом, в составе липидов *S. avermitilis* присутствуют преимущественно насыщенные ЖК (86%), содержание моно- и полиненасыщенных ЖК примерно одинаково и составляет около 7%.

Строение ПСК *S. avermitilis* оценивали методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры ПСК в сравнении со спектрами ХГК, выделенного из лишайника *Cladonia rangiferina* приведены на рисунке 5.

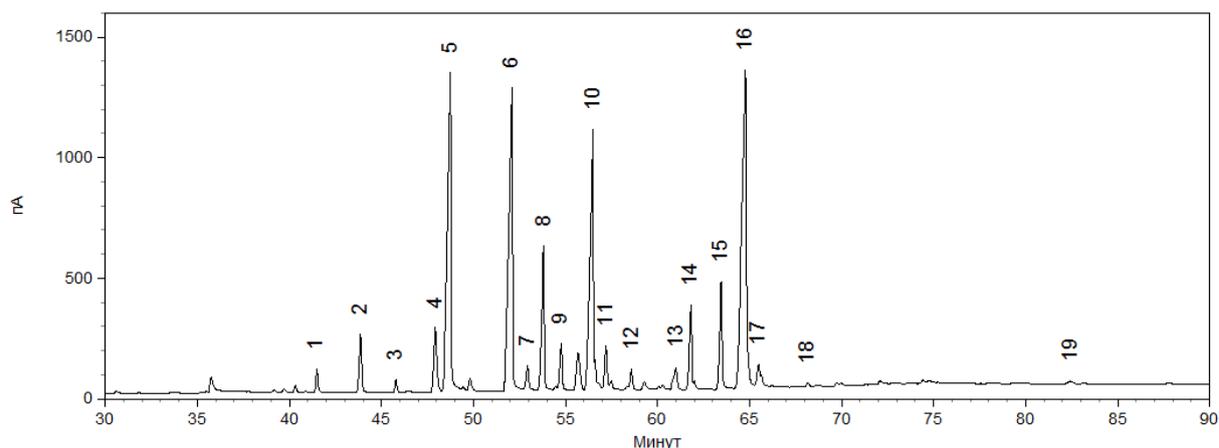


Рис. 4. Хроматограмма жирнокислотного состава липидов, выделенных из биомассы *S. avermitilis*: 1 – C_{13:0}; 2 – 12Me-C_{13:0}; 3 – C_{14:0}; 4 – 12Me-C_{14:0}; 5 – 14Me-C_{14:0}; 6 – 12Me-C_{15:0}; 7 – 14Me-C_{15:0}; 8 – C_{16:0}; 9 – C_{16:1}; 10 – 14Me-C_{16:0}; 11 – C_{17:0}; 12 – 2Гекс-циклопропанкаприловая; 13 – C_{18:0}; 14 – C_{18:1}; 15 – C_{18:2}; 16 – C_{19:0} (нонадекановая – стандарт); 17 – C_{18:3}; 18 – C_{20:0}; 19 – C_{24:0} кислоты

Жирнокислотный состав фракции липидов *S. avermitilis* (экстрагент – гексан)

№ пика (рис. 3)	Наименование кислот	% от ΣЖК	% от биомассы <i>S. avermitilis</i>
1	Тридекановая, C _{13:0}	1.1	0.05
2	12-метилтридекановая, C _{14:0} изо	2.7	0.13
3	Миристиновая, C _{14:0}	0.5	0.03
4	12-метилмиристиновая, C _{15:0} изо	4.3	0.21
5	14-метилмиристиновая, C _{15:0} изо	22.4	1.09
6	12-метилпентадекановая, C _{16:0} изо	22.3	1.08
7	14-метилпентадекановая, C _{16:0} изо	1.1	0.06
8	Пальмитиновая, C _{16:0}	8.1	0.39
9	Пальмитолеиновая, C _{16:1}	2.1	0.10
10	14-метилпальмитиновая, C _{17:0} изо	19.0	0.93
11	Маргариновая, C _{17:0}	1.9	0.09
12	2-гексил, циклопропанкаприловая, C _{17:0} изо	0.9	0.04
13	Стеариновая, C _{18:0}	1.4	0.07
14	Вакценовая, C _{18:1}	4.9	0.24
15	Линолевая, C _{18:2}	5.7	0.28
17	α-Линоленовая, C _{18:3}	1.2	0.06
18	Арахидиновая, C _{20:0}	0.2	0.01
19	Лигноцериновая, C _{24:0}	0.2	0.01
	Σ(НЖК)*	86.1	4.19
	Σ(МНЖК)*	7.0	0.34
	Σ(ПНЖК)*	6.9	0.34

*Σ(НЖК) – сумма насыщенных; Σ(МНЖК) – сумма мононенасыщенных; Σ(ПНЖК) – сумма полиненасыщенных ЖК.

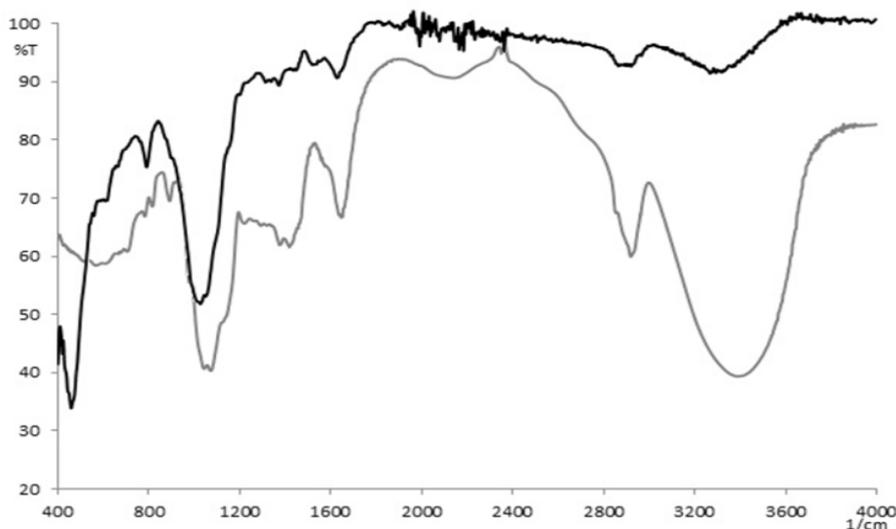


Рис. 5. ИК-спектры ПСК из *S. avermitilis* (верхний) и ХГК из лишайника *C. rangiferina* (нижний)

Следует отметить, что ИК-спектры полисахаридных комплексов *C. rangiferina* и *S. avermitilis* существенно отличаются, однако содержат ряд полос, характерных для хитина, для большинства из которых интенсивность поглощения в спектре ПСК, выделенного из *S. avermitilis*, ниже. Отмечена широкая полоса поглощения в области 3200–3550 см⁻¹ (ν_s и ν_{as} N–H; ν O–H; ν C=NH); полосы 2900 и 2830 см⁻¹ (ν C–H); 1660 см⁻¹ – амид I и 1550 см⁻¹ – амид II (ν C=O и плоск. δ N–H, соответственно); 1010 и 1060 см⁻¹ (ν C–O; C–O–C).

Одно из перспективных направлений применения полученного ПСК – это использование его в качестве сорбента (энтеросорбента). Потенциальными адсорбционными центрами ионов органических загрязнителей могут быть первичные аминогруппы (–NH₂), ацетамидные группы (–NHС(О)СН₃), карбоксильные группы (–СООН), группы –С–О–С–, а также гидроксильные группы (–ОН) глюкопиранозных циклов. В качестве модельных амфифильных органических сорбатов были использованы водорастворимые красители. Катионный сорбат – краситель МГ, который относится к гетероциклическим органическим соединениям фенотиазинового ряда; анионный сорбат – азокраситель КК (динатриевая соль 4,4'-бис-(1-амино-4-сульфо-2-нафтилазо)бифенила). По характеру кривых полученные изотермы сорбции красителей (рис. 6) в соответствии с классификацией Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера относятся к I типу [23].

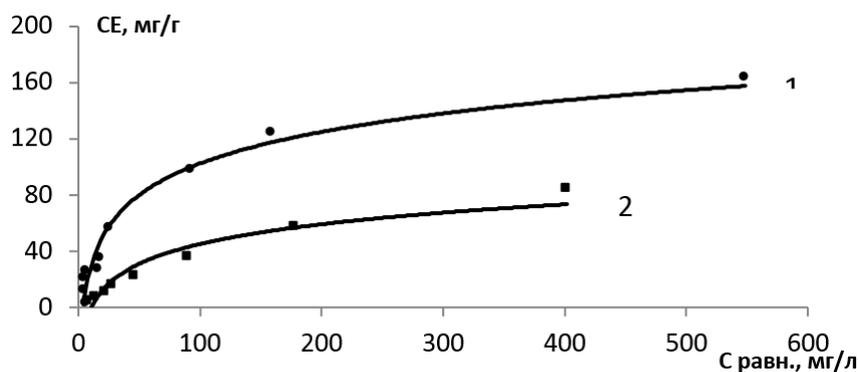


Рис. 6. Изотермы адсорбции МГ(1) и КК(2) на ПСК из водных растворов

По изотермам адсорбции красителей на ПСК с применением модели Ленгмюра рассчитаны константы сорбционного равновесия и предельная сорбционная емкость. Сорбционная емкость ПСК по отношению к катионному красителю (181.8 мг/г) выше, чем по отношению к анионному (138.9 мг/г), при этом энергия взаимодействия (сродство) адсорбата с адсорбтивом, определяемая величиной константы адсорбционного равновесия, выше для анионного красителя (для КК 19.9×10^{-3} , а для МГ – 3×10^{-3} л/мг). В работах [24, 25] изучены сорбционные свойства ХГК, выделенного из таллома лишайника *C. rangiferina* (сорбционная емкость по отношению к МГ – 65.6–67.6 мг/г, а КК – 18.2 мг/г). Проведенные исследования свидетельствуют о полиамфолитной природе ПСК *S. avermitilis* и ХГК *C. rangiferina*, содержащих как основные, так и кислотные функциональные группы, однако сорбционная емкость по отношению к красителям для ПСК *S. avermitilis* существенно выше, что свидетельствует о значительно большем содержании в его структуре активных функциональных групп (сорбционных центров) и открывает широкие перспективы его использования в качестве сорбента (энтеросорбента).

Выводы

Изучен компонентный состав биомассы продуцента авермектинов – *S. avermitilis*, включающий помимо собственно авермектина также липиды, белки и полисахаридный комплекс. Показано, что в составе липидов *S. avermitilis* присутствуют преимущественно насыщенные жирные кислоты (86%), содержание моно- и полиненасыщенных (эссенциальных) жирных кислот одинаково и составляет около 7%. Выявлена специфика жирнокислотного состава липидов *S. avermitilis* – наличие значительного количества жирных кислот с разветвленной цепочкой (более 70% от общей суммы жирных кислот).

Установлено, что выделенный из биомассы *S. avermitilis* полисахаридный (хитиноподобный) комплекс – муреин имеет полиамфолитную природу и обладает высокими сорбционными свойствами по отношению, как к основным, так и к кислотным красителям, что позволяет рекомендовать его к использованию в качестве сорбента (энтеросорбента).

Список литературы

1. Watve M.G., Tickoo R., Jog M.M., Bhole B.D. How many antibiotics are produced by the genus *Streptomyces*? // Arch. Microbiol. 2001. Vol. 176. Pp. 386–390. DOI: 10.1007/s002030100345.
2. Burg R.W., Miller B.M., Baker E.E. et al. Avermectins, new family of potent anthelmintic agents, producing organism and fermentation // Antimicrob. Agents and Chemother. 1979. N15. Pp. 361–367.
3. Белявская Л.А., Галаган Т.А., Болтовская Е.В., Козырицкая В.Е., Валагурова Е.В., Сигарева Д.Д., Иутинская Г.А. Антигельминтные свойства *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 и его авермектинового комплекса – аверкома // Stiinta Agricola. 2009. №1. С. 29–33.
4. Максимов И.В. Биологическая активность хитина и сферы его применения // Известия Уфимского научного центра РАН. 2013. №2. С. 38–61.
5. Шерстнев В.В. Влияние на иммунологический статус свиней препарата ниацид, получаемого по технологической схеме, ориентированной на безотходное производство: дис. ... канд. биол. наук. М., 2002. 110 с.
6. Курченко В.П., Буга С.В., Петрашкевич Н.В., Буткевич Т.В. и др. Технологические основы получения хитина и хитозана из насекомых // Труды БГУ. 2016. Т. 11, ч. 1. С. 110–126.
7. Lipke P.N., Ovalle R. Cell Wall Architecture in Yeast: New Structure and New Challenges // J. of Bacteriology. 1998. Vol. 180. N15. Pp. 3735–3740.

8. Muzzarelli R.A.A., Tanfani F.E.M. The chelating ability of chitinous from *Streptomyces*, *Mucor rouxii*, *Phycomyces blakesleeanus* and *Choanephora cucurbitarum* // J. Appl. Biochem. 1981. Vol. 3. N4. Pp. 322–327.
9. Muzzarelli R.A.A., Tanfani F.E.M. The chelating ability of chitinous materials from *Aspergillus niger*, *Streptomyces*, *Mucor rouxii*, *Phycomyces blakesleeanus* and *Choanephora cucurbitarum* // Proc. 2nd Int. conf. «Chitin and chitosan». Sapporo, 1982. Pp. 183–186.
10. Захарова Н.Г., Вершинина В.И., Ильинская О.Н. Краткий курс по микробиологии, вирусологии и иммунологии. Казань, 2015. 799 с.
11. Гусев М.В., Минеева Л.А. Микробиология. М., 1992. 448 с.
12. Ившин В.П., Артамонова С.Д., Ившина Т.Н., Шарнина Ф.Ф. Методы выделения хитин-глюканового комплекса из нативной биомассы высших грибов // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2007. Т. 49. №12. С. 2215–2222.
13. Унрод В.И., Солодовник Т.В. Хитин- и хитозансодержащие комплексы из мицелиальных грибов: получение, свойства, применение // Биополимеры и клетка. 2001. Т. 17. №6. С. 526–533.
14. Marguerite R. Chitin and chitosan: Properties and applications // Prog. Polym. Sci. 2006. Pp. 603–632. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001.
15. Государственная Фармакопея СССР: Вып. 1. Общие методы анализа МЗ СССР. М., 1987. С. 285–286.
16. Павлова О.В., Белова Е.А., Троцкая Т.П. Сорбционная способность хитин-глюканового комплекса, выделенного из биомассы продуцента лимонной кислоты // Научные труды одесской национальной академии пищевых технологий. 2012. Т. 2, вып. 46. С. 121–124.
17. Бурцева С.А. Аминокислотный и липидный составы биомассы стрептомицетов, выделенных из почв Молдовы // Микробиол. журн. 2000. Т. 62. №3. С. 9–16.
18. Феофилова Е.П. Мицелиальные грибы как источники получения новых лекарственных препаратов с иммуномодулирующей, противоопухолевой и ранозаживляющей активностями // Иммунопатология, аллергология, инфектология. 2004. №1. С. 27–32.
19. Липиды: Структура, биосинтез, превращения и функции. М., 1987. 182 с.
20. Коронелли Т.В. Липиды микробактерий и родственных микроорганизмов. М., 1984. 156 с.
21. Донец А.Т. Изучение биосинтеза липидов у некоторых сапрофитных микробактерий: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Саратов, 1971. 23 с.
22. Будников Г.К. Химический анализ в медицинской диагностике. М., 2010. 504 с.
23. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М., 1984. 306 с.
24. Жильцов Д.В., Бровко О.С., Ивахнов А.Д., Боголицын К.Г., Бойцова Т.А., Паламарчук И.А. Сорбционные свойства хитин-содержащих комплексов, выделенных из талломов лишайников методом сверхкритической флюидной экстракции // Успехи современного естествознания. 2018. №11. С. 210–215.
25. Жильцов Д.В., Бровко О.С., Паламарчук И.А., Бойцова Т.А., Боголицын К.Г., Чухчин Д.Г. Морфология и свойства хитин-глюкановых комплексов, выделенных из различных природных источников // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. №3(3). С. 9–13. DOI: 10.31040/2222-8349-2018-3-3-8-12.

Поступила в редакцию 25 апреля 2019 г.

После переработки 6 июня 2019 г.

Принята к публикации 25 ноября 2019 г.

Для цитирования: Бровко О.С., Жильцов Д.В., Ивахнов А.Д., Богданов М.В. *Streptomyces avermitilis*: компонентный состав, свойства // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 57–66. DOI: 10.14258/jcrpm.2020015500.

Brovko O.S.¹, Zhil'tsov D.V.^{1*}, Ivakhnov A.D.^{1,2}, Bogdanov M.V.^{1,2} STREPTOMYCES AVERMITILIS: COMPONENT COMPOSITION, PROPERTIES

¹ The Federal Center for Integrated Arctic Research of the RAS, nab. Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000 (Russia), e-mail: dnorton.usa@gmail.com

² Northern (Arctic) Federal University, nab. Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 (Russia)

The component composition of *S. avermitilis* biomass was studied, including avermectin, lipids, proteins, and a polysaccharide complex (murein). It was established that the composition of lipids of *S. avermitilis* contains predominantly saturated fatty acids – 86%, the content of monounsaturated (palmitic and vaccenic) and polyunsaturated (linoleic and α -linolenic) fatty acids is the same and is about 7%. It should be noted the presence of a significant amount of branched chain fatty acids (isoforms) – more than 70% of the total amount of fatty acids. A technique has been developed for isolating the polysaccharide complex from *S. avermitilis* biomass. Using IR spectroscopy, it was found that the *S. avermitilis* polysaccharide complex, as well as the chitin-glucan complex isolated from the thallus of the epigeic lichen of the species *Cladonia rangiferina*, is built from chitin units – β -N-acetylglucosamine. It was shown that the polysaccharide complex (murein) has a polyampholytic nature and has high sorption properties with respect to the main (methylene blue) and acid (Congo red) dyes. It was also established that the sorption capacity with respect to the dyes under study for the polysaccharide complex *S. avermitilis* is 2.8–7.6 times higher than for the chitin – glucan complex *Cladonia rangiferina*. This indicates a significantly higher content of active functional groups (sorption centers) in the murein structure, which allows us to recommend it for use as an effective sorbent (entersorbent).

Keywords: *Streptomyces avermitilis*, avermectin, fatty acid composition of lipids, polysaccharide complex, lichen, sorption.

References

1. Watve M.G., Tickoo R., Jog M.M., Bhole B.D. *Arch. Microbiol.*, 2001, vol. 176, pp. 386–390 DOI: 10.1007/s002030100345.
2. Burg R.W., Miller B.M., Baker E.E. et al. *Antimicrob. Agents and Chemother.*, 1979, no. 15, pp. 361–367.
3. Belyavskaya L.A., Galagan T.A., Boltovskaya Ye.V., Kozyrskaya V.Ye., Valagurova Ye.V., Sigareva D.D., Iutinskaya G.A. *Stiinta Agricola*, 2009, no. 1, pp. 29–33 (in Russ.).
4. Maksimov I.V. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, no. 2, pp. 38–61. (in Russ.).
5. Sherstnev V.V. *Vliyaniye na immunologicheskiy status sviney preparata niatsid, poluchayemogo po tekhnologicheskoy skheme, oriyentirovannoy na bezotkhodnoye proizvodstvo: dis. ... kand. biol. nauk.* [The effect on the immunological status of pigs of the drug niacin obtained by the technological scheme, focused on waste-free production: dis. ... cand. biol. sciences]. Moscow, 2002, 110 p. (in Russ.).
6. Kurchenko V.P., Buga S.V., Petrashkevich N.V., Butkevich T.V. i dr. *Trudy BGU*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 110–126 (in Russ.).
7. Lipke P.N., Ovalle R. *J. of Bacteriology*, 1998, vol. 180, no. 15, pp. 3735–3740.
8. Muzzarelli R.A.A., Tanfani F.E.M. *J. Appl. Biochem.*, 1981, vol. 3, no. 4, pp. 322–327.
9. Muzzarelli R.A.A., Tanfani F.E.M. *Proc. 2nd Int. conf. «Chitin and chitosan»*, Sapporo, 1982, pp. 183–186.
10. Zakharova N.G., Verzhinina V.I., Il'inskaya O.N. *Kratkiy kurs po mikrobiologii, virusologii i immunologii.* [Short course in microbiology, virology and immunology]. Kazan', 2015, 799 p. (in Russ.).
11. Gusev M.V., Mineyeva L.A. *Mikrobiologiya.* [Microbiology]. Moscow, 1992, 448 p. (in Russ.).
12. Ivshin V.P., Artamonova S.D., Ivshina T.N., Sharnina F.F. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya B*, 2007, vol. 49, no. 12, pp. 2215–2222 (in Russ.).
13. Unrod V.I., Solodovnik T.V. *Biopolimery i kletka*, 2001, vol. 17, no. 6, pp. 526–533 (in Russ.).
14. Marguerite R. *Prog. Polym. Sci.*, 2006, pp. 603–632. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001.
15. *Gosudarstvennaya Farmakopeya SSSR: Vyp. 1. Obshchiye metody analiza MZ SSSR.* [State Pharmacopoeia of the USSR: Issue. 1. General methods of analysis of the Ministry of Health of the USSR]. Moscow, 1987, pp. 285–286 (in Russ.).
16. Pavlova O.V., Belova Ye.A., Trotskaya T.P. *Nauchnyye trudy odesskoy natsional'noy akademii pishchevykh tekhnologiy*, 2012, vol. 2, no. 46, pp. 121–124 (in Russ.).
17. Burtseva S.A. *Mikrobiol. zhurn.*, 2000, vol. 62, no. 3, pp. 9–16 (in Russ.).
18. Feofilova Ye.P. *Immunopatologiya, allergologiya, infektologiya*, 2004, no. 1, pp. 27–32 (in Russ.).
19. *Lipidy: Struktura, biosintez, prevrashcheniya i funktsii.* [Lipids: Structure, biosynthesis, transformations and functions]. Moscow, 1987, 182 p. (in Russ.).
20. Koronelli T.V. *Lipidy mikrobakteriy i rodstvennykh mikroorganizmov.* [Lipids of microbacteria and related microorganisms]. Moscow, 1984, 156 p. (in Russ.).
21. Donets A.T. *Izucheniyе biosinteza lipidov u nekotorykh saprofitnykh mikrobakteriy: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk.* [The study of lipid biosynthesis in some saprophytic microbacteria: author. dis. ... cand. biol. sciences]. Saratov, 1971, 23 p. (in Russ.).
22. Budnikov G.K. *Khimicheskiy analiz v meditsinskoй diagnostike.* [Chemical analysis in medical diagnostics]. Moscow, 2010, 504 p. (in Russ.).
23. Greg S., Sing K. *Adsorbtsiya, udel'naya poverkhnost', poristost'.* [Adsorption, specific surface area, porosity]. Moscow, 1984, 306 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

24. Zhil'tsov D.V., Brovko O.S., Ivakhnov A.D., Bogolitsyn K.G., Boytsova T.A., Palamarchuk I.A. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2018, no. 11, pp. 210–215 (in Russ.).
25. Zhil'tsov D.V., Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Boytsova T.A., Bogolitsyn K.G., Chukhchin D.G. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2018, no. 3(3), pp. 9–13. DOI: 10.31040/2222-8349-2018-3-3-8-12 (in Russ.).

Received April 25, 2019

Revised June 6, 2019

Accepted November 25, 2019

For citing: Brovko O.S., Zhil'tsov D.V., Ivakhnov A.D., Bogdanov M.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 57–66. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020015500