

ОРИГИНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

УДК 582.28

ПЕРВОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЩЕЛОЧЕУСТОЙЧИВЫХ ГРИБОВ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ХЛОРИДНОГО ОЗЕРА БАСКУНЧАК

С.А. Бондаренко^{1,2,*}, М.Л. Георгиева^{1,3}, Л.Ю. Кокаева¹, Е.Н. Биланенко¹

¹Кафедра микологии и альгологии, биологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12;

²Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33, стр. 2;

³Научно-исследовательский институт по изысканию новых антибиотиков имени Г.Ф. Гаузе, Россия, 119021, г. Москва, ул. Большая Пироговская, д. 11, стр. 1

*e-mail: bond.sonia@gmail.com

Статья посвящена первому исследованию щелочеустойчивых грибов в условиях нейтрального засоления на примере хлоридного озера Баскунчак (Астраханская область, Россия). Проведены: выделение грибов из хлоридных почв побережья озера на щелочной агар (рН 10,0–10,5); их идентификация с использованием морфолого-культуральных и молекулярно-генетических признаков; филогенетический анализ и исследование характера адаптации к факторам рН, солености. Показано, что щелочеустойчивые грибы на побережье озера – полифилетическая группа аскомицетов из классов Sordariomycetes (9 видов), Dothideomycetes (5 видов), Eurotiomycetes (3 вида), а также стерильные мицелии (15 изолятов). Изучение роста грибов в широком диапазоне значений рН показало, что среди изолятов есть как алкалотолерантные грибы, так и алкалофильные. Подтверждена устойчивость изолятов к повышенным концентрациям хлористого натрия. Неожиданным стало обнаружение в условиях нейтрального засоления редкой группы грибов – облигатных алкалофилов. Проведены филогенетические построения, облигатно алкалофильные изоляты охарактеризованы как новый вид рода *Sodiomyces*. Обсуждается возможная экологическая роль щелочеустойчивых грибов в засоленных местообитаниях.

Ключевые слова: экстремофилы, алкалофильные грибы, алкалотолерантные грибы, *Sodiomyces*, соленые озера, озеро Баскунчак, галотолерантные грибы

Направление исследования грибов, способных развиваться в крайне щелочных условиях, достаточно новое для микологии. Его активное развитие приурочено к началу XXI века [1–6]. У грибов обнаружены разные типы адаптации к высоким значениям рН: алкалотолеранты могут развиваться в щелочных условиях, но предпочитают нейтральные или кислые значения рН среды, алкалофилы предпочитают щелочные значения рН выше 8. Если грибы могут расти в кислых условиях (при рН до 5–5,5), они считаются факультативными алкалофилами, если же способность к росту в кислых условиях утрачена, такие грибы называют облигатными алкалофилами. Предыдущие исследования показали, что облигатная алкалофилия – редкое явление среди грибов, оно подтверждено для родов *Thielavia* и *Sodiomyces*. Распространение облигатных алкалофилов связывают со стабильно щелочными почвами содовых озер и солончаков, где значения рН держатся на уровне 10–12 [5]. Факультативные алкалофилы

и алкалотолеранты распространены шире, они встречаются даже в кислых и нейтральных почвах [7], где такое звено деструкторов востребовано при локальном защелачивании.

До настоящего времени комплексных исследований (которые бы включали молекулярно-генетическую идентификацию и физиологическую характеристику) щелочеустойчивого звена микобиоты в условиях нейтрального засоления не проводилось. Озеро Баскунчак (Россия) – объект мирового значения, уникальное месторождение пищевой соли, запас которой ежегодно восстанавливается за счет поступления природных высокоминерализованных растворов и последующего их испарения в котловине озера в течение летнего периода. Поверхностные залежи соли на озере составляют 10–18 м, в то время как общая глубина залегания соли достигает 6 км. Значения рН воды озера околонеутральные (6–7), общее содержание растворенных солей около 390 г/л [8, 9]. По концентрации растворенных солей это

озеро Астраханской области России сравнимо с Мертвым морем в Израиле, хотя состав солей у них различен. Исследованию галофильных и галотолерантных микромицетов из Мертвого моря посвящен ряд работ [10–13]. Мицелиальные и дрожжевые грибы были выделены из воды и окружающей почвы, среди них наиболее часто встречались виды из родов *Aspergillus* и *Eurotium* [13, 14]. Большинство изолированных из воды и почвы видов распространены широко и относятся к эвритопным видам, *Gymnascella marismortui* отнесена к эндемичным видам. Среди грибов побережья не были обнаружены галофильные и термофильные изоляты [14]. Результаты обширных исследований свидетельствуют о том, что прямых доказательств гетеротрофной активности выявленных грибов в районе Мертвого моря нет, однако предполагается возможное локальное и временное их влияние на экосистему озера за счет активных ферментов [13].

Данные по микобиоте озера Баскунчак (как воды озера, так и прибрежной почвы) на удивление единичны [9, 12]. Подобного рода исследования актуальны в свете растущего интереса к экологии, эволюции и биотехнологическому потенциалу экстремофильных организмов.

Материалы и методы

Материалы. Материал собран на побережье хлоридного озера Баскунчак (Астраханская область, Россия, N48.21° E46.84°) в июне 2016 г. Всего было отобрано 20 образцов следующих субстратов – почва под кустарником *Halocnemum strobilaceum* в 5–6 м от уреза воды; верхний слой соли, песчанисто-глинистая почва и песок в зоне заплеска (не более 50 см от воды); илистые донные отложения до 50 см глубиной в двух метрах от берега. Верхний (5 см) слой субстрата собирали в крафтовые пакеты, высушивали. Для каждого образца измеряли pH в лабораторных условиях.

Методы выделения, культивирования и хранения микромицетов. Для селективного выделения и культивирования щелочеустойчивых грибов использовали щелочной агар на основе суслы и карбонатно-бикарбонатного буфера (ЩА; pH 10,2) с добавлением антибиотика рифампицина (2 г/л) [5]. Посев проводили методом почвенных комочков (около 2 г почвы на 3 чашки Петри), чашки инкубировали при температуре 24°C. Для каждого выделенного вида грибов определяли встречаемость (как отношение числа образцов, в которых отмечен вид, к общему числу образцов, выраженное в %). Получены моноспоровые культуры всех изолятов. Культуры включены в коллекцию грибов экстремальных местообитаний кафедры микологии и альгологии МГУ имени М.В. Ломоносова. Часть культур депонирована в коллекцию

CBS (Утрехт, Нидерланды).

Идентификация изолятов по морфолого-культуральным признакам. Для идентификации микромицетов, выделенных в чистую культуру, использовали определители и статьи по таксономии грибов отечественных и зарубежных авторов. Названия и систематическое положение грибов в статье приведены в соответствии с базой Species Fungorum (<http://www.speciesfungorum.org/>). Для изучения микроморфологии использовали как световой микроскоп (СМ), так и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ).

Идентификация изолятов молекулярными методами. Выделение ДНК и амплификацию проводили на базе лаборатории фитопатологии кафедры микологии и альгологии МГУ им. М.В. Ломоносова и на базе отдела эволюционной биохимии НИИ физико-химической биологии имени А.Н. Белозерского МГУ имени М.В. Ломоносова.

Биомассу мицелия наращивали на чашках Петри на целлофановой мембране. Для выделения ДНК брали около 0,1 г сырого мицелия. Экстракцию проводили при помощи набора реагентов Diatom DMA Prep 100 (Изоген, Россия), следуя инструкции производителя.

Были проанализированы последовательности гена, кодирующего транскрибируемый спейсерный участок ядерной рибосомальной ДНК (ITS rDNA). Итоговая смесь для полимеразной цепной реакции (ПЦР) содержала на 20 мкл: 2 мкл 10X буфера Encyclo (Евроген, Россия), 0,4 мкл 50X dNTP, по 0,5 мкл 10 пМ праймеров (ITS1f TCC GTAGGTGAACCTTGCGTCCTCCGCTTATTGATA TGC и ITS4r TCCTCCGCTTATTGATATGC или 18d05 GTCCCTGCCCTTTGTACACACCCGCCCG и 28r3-3v2 ACTCCTYRGTCCTGTTTCA), 0,4 мкл 10X полимеразы Encyclo (Promega, США), 1 мкл ДНК образца. Амплификацию проводили по схеме: 3 мин при 95°C; 35 циклов по 30 с при 95°C, 30 с при 55°C и 1,5 мин при 72°C. В конце ПЦР-смесь выдерживалась еще 5 мин при 72°C. Продукты амплификации просматривали на 0,7–1%-ном агарозном геле с бромистым этидием и очищали методом прямого переосаждения ДНК в мягких условиях (<http://www.genome-centre.ru/cleaning.html>). Секвенирование проводилось в центре коллективного пользования «Геном» (Институт молекулярной биологии имени В.А. Энгельгардта) с прямыми и обратными праймерами.

Видовую принадлежность определяли с помощью программы BLAST (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) и филогенетических построений для отдельных изолятов методами байесовского анализа и максимального правдоподобия [7].

Исследование особенностей физиологии. Характер адаптации к щелочным условиям определяли по разработанной ранее методике, измеряя ско-

рость линейного роста грибов в трубках со средой с разными значениями pH [5]. Для опытов использовали среды на основе солодового экстракта, различные значения pH сред поддерживали за счет буферных компонентов: 0,2 М цитратного (pH 4,0; 5,2; 5,6), 0,2 М фосфатного (pH 7,0; 8,0) и 0,2 М карбонатно-бикарбонатного (pH 9,2; 10,2; 10,6) буферов. Культуры инкубировали в темноте в термостате при 28°C. Для отдельных изолятов определяли скорость роста при разных концентрациях (от 0 до 2 М) хлорида натрия в среде (ЩА) на чашках Петри.

Результаты

Характеристика образцов почвы и количественная оценка грибов. Отобранные образцы почвы характеризуются околонеутральными значениями pH – от 7,5 до

7,9 (в среднем $7,7 \pm 0,1$). 7 из 20 исследованных образцов (верхний слой соли, некоторые образцы песка) прибрежных почв озера Баскунчак не содержали грибных зачатков. В 1 г сухой почвы в среднем отмечено около 19 колониеобразующих единиц щелочеустойчивых грибов. На ЩА выделено 17 видов грибов и 15 неидентифицированных стерильных мицелиев (всего 55 изолятов). Встречаемость отдельных видов на ЩА варьировала от 5% до 25%.

Таксономическое разнообразие микромицетов. Морфолого-культуральные и молекулярно-генетические исследования показали, что щелочеустойчивые изоляты относятся к нескольким классам аскомицетов – среди них есть представители из Dothideomycetes (семейства Cladosporiaceae, Pleosporaceae), Eurotiomycetes (Trichocomaceae, Onygenaceae) и Sordariomycetes (Hypocreales, Microascaceae, Plectosphaerellaceae, Chaetomiaceae) (таблица). Стерильные изоляты, скорее всего, также относятся к аскомицетам.

Данные анализа транскрибируемого спейсерного участка рибосомальной ДНК (ITS) показали, что 4 изолята из почв побережья озера Баскун-

чак относятся к облигатно алкалофильному роду *Sodiomyces* (Plectosphaerellaceae, Sordariomycetes). Согласно филогенетическим построениям они находятся в базальной части рода и не образуют обособленной клады внутри (рис. 1). Новые

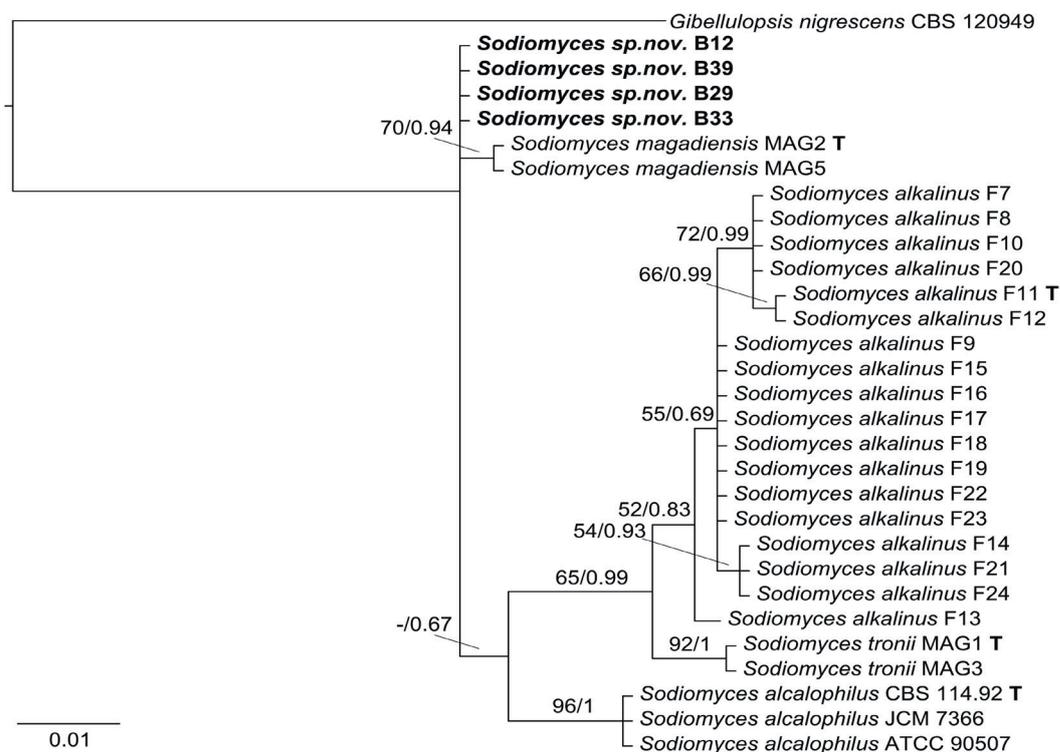


Рис. 1. Филогенетическое положение новых видов внутри рода *Sodiomyces*. Байесовское консенсусное дерево (50% majority rule), основанное на анализе последовательности транскрибируемого спейсерного участка ядерной рибосомальной ДНК. Т – типовые изоляты.

изоляты голоморфные, по морфологии бесполого и полового спороношения хорошо отличаются от известных видов этого рода. Для дальнейшего описания их в качестве нового вида требуются новые филогенетические построения с использованием дополнительных генетических локусов.

Особенности физиологии изолятов. Для отдельных изолятов были проведены ростовые эксперименты в широком диапазоне значений pH (рис. 2), которые показали присутствие в почвах нейтрального засоления алкалофилов – как факультативных (*Emericellopsis* sp., *Sarocladium kiliense*), так и облигатных (*Sodiomyces* sp. nov.). В почве отмечены и алкалотолеранты – сильные (*Acremonium sclerotigenum*), умеренные (*Aspergillus* sect. *Flavipedes*, *Microascus alveolaris*) и слабые (*Alternaria chlamydospora*).

Для *Sodiomyces* sp. nov. и *Emericellopsis* sp. была изучена зависимость скорости роста от концентрации NaCl в среде. Исследованные изоляты устойчивы к повышенным концентрациям хлористого натрия в среде (рис. 3), что позволяет отнести их к галотолерантам. Облигатный алкалофил *Sodiomyces* sp. nov. предпочитает расти на среде

Таблица

Видовой состав и встречаемость микромицетов, изолированных на щелочной агар из засоленных почв побережья озера Баскунчак

Таксономическая принадлежность гриба	Встречаемость, %
ASCOMYCOTA Dothideomycetes Capnodiales, Cladosporiaceae	
<i>Cladosporium</i> sp.	5
Pleosporales, Pleosporaceae	
<i>Alternaria</i> sect. <i>Alternata</i>	30
<i>Alternaria chlamydospora</i> Mouch.	20
<i>Alternaria</i> sp.	5
<i>Pleosporales</i> sp.	5
Eurotiomycetes Eurotiales, Trichocomaceae	
<i>Aspergillus sclerotiorum</i> G.A. Huber	15
<i>Aspergillus</i> sect. <i>Flavipedes</i>	5
Onygenales, Onygenaceae	
<i>Chrysosporium lobatum</i> Scharapov	5
Sordariomycetes Hypocreales, Incertae sedis	
<i>Acremonium</i> sp.	10
<i>Acremonium sclerotigenum</i> (Moreau & R. Moreau ex Valenta) W. Gams	5
<i>Emericellopsis</i> sp.	40
<i>Sarocladium kiliense</i> (Grütz) Summerb.	15
Hypocreales, Nectriaceae	
<i>Fusarium sporotrichioides</i> Sherb.	40
Microascales, Microascaceae	
<i>Microascus alveolaris</i> Sand.-Den., Gené & Guarro	10
Glomerellales, Plectosphaerellaceae	
<i>Chordomyces antarcticus</i> Bilanenko, Georgieva & Grum-Grzhim.	15
<i>Sodiomyces</i> sp.nov.	25
Chaetomiaceae, Sordariales	
<i>Chaetomium murorum</i> Corda	15
INSERTAE SEDIS	
<i>Mycelia sterilia</i>	60

без добавления NaCl, но сохраняет рост (хотя и очень слабый) в присутствии 2 М NaCl. Факультативный алкалофил *Emericellopsis* sp. лучше растет при концентрации NaCl в среде 0,4 М и не так значительно снижает скорость роста при концентрации хлорида натрия в среде 2 М.

Обсуждение

Число пропагул щелочеустойчивых грибов в почвах нейтрального засоления на побережье озера невелико (19 колониеобразующих единиц на грамм сухой почвы) и сравнимо с таковым в экстремально щелочных местообитаниях. Среди идентифицированных изолятов большинство принадлежит Sordariomycetes (Plectosphaerellaceae, Microascaceae, Chaetomiaceae, Hypocreales), от-

дельные представители — из Cladosporiaceae, Pleosporaceae, Trichocomaceae, Onygenaceae. Такое таксономическое распределение, в особенности обилие представителей Sordariomycetes, характерно для щелочеустойчивого звена ранее изученных сообществ содовых озер и солончаков, кислых дерново-подзолистых и нейтральных окультуренных почв [5–7].

Анализ скорости роста изолятов в широком диапазоне pH подтвердил наличие в нейтральных гиперсоленых почвах грибов с разными типами адаптации к pH, в том числе и алкалофилов — как факультативных (*Emericellopsis* sp.), так и облигатных (*Sodiomyces* sp. nov.).

Обнаружение облигатных алкалофилов в условиях нейтрального засоления стало неожидан-

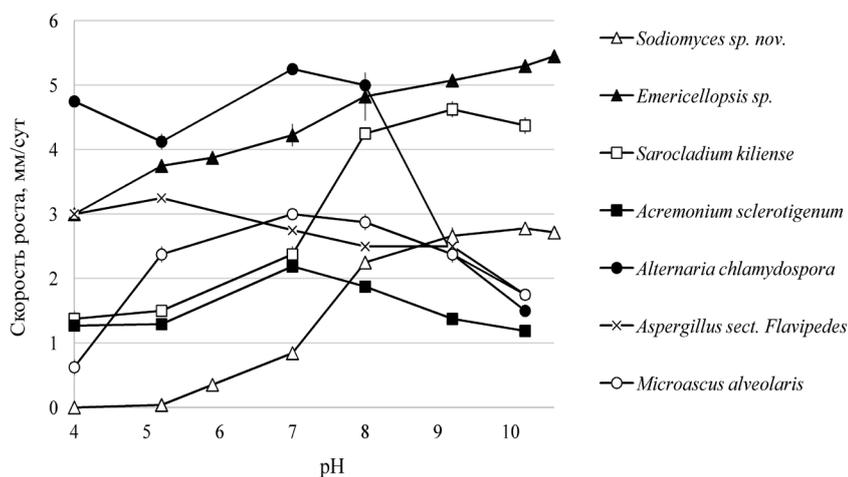


Рис. 2. Зависимость скорости линейного роста изолятов, выделенных на щелочной агар из засоленной почвы побережья озера Баскунчак, от pH среды.

ностью, поскольку явление облигатной алкалофилии крайне редко для грибов. Ранее род *Sodiomyces* было предложено считать индикатором стабильного содового засоления [3, 5]. Сравнительно высокая встречаемость (25%) *Sodiomyces sp. nov.* отвергает случайность обнаружения. По физиологическим особенностям (зависимость роста от pH, NaCl) *Sodiomyces sp. nov.* из озера Баскунчак не отличается от других видов рода. Мы предполагаем, что представители рода *Sodiomyces* обладают схожей субстратной приуроченностью. Ранее было показано, что в геноме у типового вида *Sodiomyces alkalinus* гораздо меньше генов, кодирующих ферменты, которые участвуют в деградации растительной клеточной стенки, чем у его фитопатогенных родственников. В щелочных условиях гриб обладает очень высокой протеолитической активностью. В геноме *Sodiomyces* присутствуют гены, полученные грибом в результате горизонтального переноса и участвующие в метаболизме аминокислот и белков, а также бактериальной клеточной стенки [15]. Все данные указывают на то, что *S. alkalinus* предпочитает высокобелковые субстраты, которые в содовых озерах представлены прокариотами и ракообразными [3, 18].

В нашем случае гриб был выделен из образцов, отобранных в непосредственной близости от уреза воды, где отсутствовали какие-либо растения или их видимые корни. Мы предполагаем, что

Sodiomyces sp. nov. может быть связан с цианобактериальными пленками и матами, которые развиваются на побережье озера [9]. Локальное защелачивание в сообществах цианобактерий, которое возникает в процессе фотосинтеза [16], могло бы объяснить присутствие облигатно алкалофильного гриба в почвах нейтрального засоления.

Другой интересный гриб, выделенный из почв побережья озера Баскунчак – факультативный алкалофил *Emericellopsis sp.* Его приуроченность к засоленным условиям подтверждается физиологическими характеристиками – изоляты имеют оптимум роста при 0,4 М NaCl в среде и выдерживают большие, в сравнении с другими из-

ученными нами алкалофилами, концентрации хлорида натрия. В литературе имеются указания на возможную деструкцию грибами *Emericellopsis* поверхностных слоев цианобактериальных матов

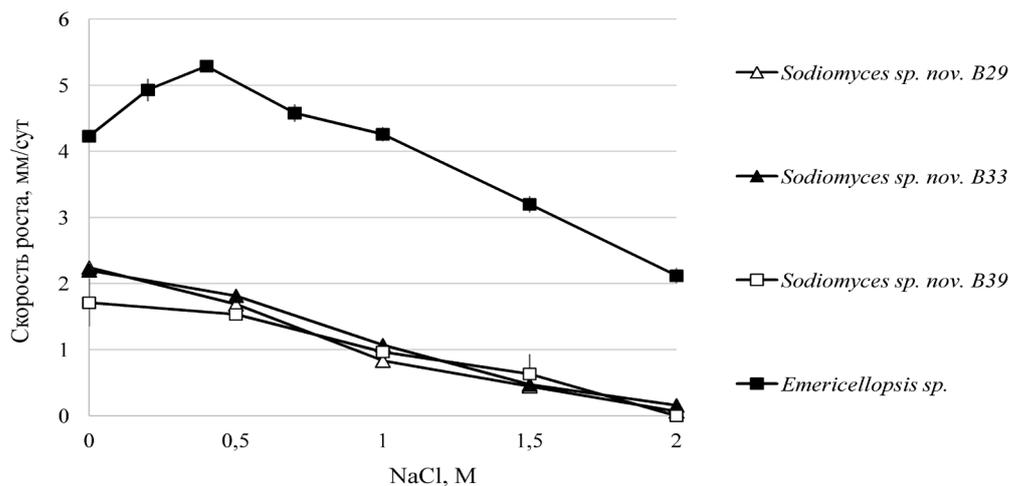


Рис. 3. Зависимость скорости линейного роста алкалофильных изолятов от концентрации NaCl в среде.

[17], которые активно развиваются, в том числе, и в озере Баскунчак. Грибы этого рода представляют большой интерес как продуценты новых антибиотиков, в частности, с выраженной антимикотической активностью [18].

Изоляты, имеющие алкалотолерантный тип адаптации к pH, относятся к видам, которые широко распространены и занимают различные экологические ниши. В основном это сапротрофы и патогены растений, такие как *Aspergillus*, *Alternaria*, *Chaetomium* [19, 20]; *Sarocladium kiliense* известен как эндофит, но может быть и возбудителем микозов человека [21]. Многие виды отмечены в засоленных местообитаниях не впервые [5, 13, 14]. Виды родов *Aspergillus* и *Acremonium* были выделены из сообществ цианобактерий искусственно

созданного гиперсоленого озера Мраморное, расположенного рядом с озером Баскунчак, но чуть менее соленого [9].

Таким образом, впервые нам удалось выделить и охарактеризовать щелочеустойчивое звено микобиоты в условиях нейтрального засоления на примере побережья хлоридного озера Баскунчак. Были выделены аскомицеты с разными типами адаптации к щелочным условиям – алкалотолеранты и алкалофилы. Показано, что алкалофилы являются галотолерантами, т.е. устойчивы к повышенным концентрациям хлористого натрия. На побережье озера обнаружен новый вид облигатно алкалофильного рода *Sodiomyces*, что значительно расширяет представления об этой редкой

группе грибов. Дальнейшие исследования экологической роли и ассоциативных связей облигатно алкалофильных грибов могут послужить ключом к пониманию функционирования и эволюции сообществ гиперсоленых местообитаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-34-00779 мол_а).

Исследования выполнены без использования животных и без привлечения людей в качестве испытуемых. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bilanenko E.N., Sorokin D.Y., Ivanova M.L., Kozlova M.V. *Heleococcum alkalinum*, a new alkalitolerant ascomycete from saline soda soils // Mycotaxon. 2005. Vol. 91. N 1. P. 497–507.
2. Georgieva M.L., Lebedeva M.P., Bilanenko E.N. Mycelial fungi in saline soils of the western Transbaikalian region // Eurasian Soil Sci. 2012. Vol. 45. N 12. P. 1159–1168.
3. Grum-Grzhimaylo A.A., Debets A.J.M., van Diepeningen A.D., Georgieva M.L., Bilanenko E.N. *Sodiomyces alkalinus*, a new alkaliphilic ascomycete within the Plectosphaerellaceae // Persoonia. 2013. Vol. 31. P. 147–158.
4. Grum-Grzhimaylo A.A., Georgieva M.L., Debets A.J.M., Bilanenko E.N. Are alkalitolerant fungi of the Emericellopsis lineage (Bionectriaceae) of marine origin // IMA fungus. 2013. Vol. 4. N 2. P. 213–228.
5. Grum-Grzhimaylo A.A., Georgieva M.L., Bondarenko S.A., Debets A.J.M., Bilanenko E.N. On the diversity of fungi from soda soils // Fungal Divers. 2016. Vol. 76. N 1. P. 27–74.
6. Bondarenko S.A., Georgieva M.L., Bilanenko E.N. Fungi inhabiting the coastal zone of Lake Magadi // Contemp. Probl. Ecol. 2018. Vol. 11. N 5. P. 439–448.
7. Bondarenko S.A., Georgieva M.L., Bilanenko E.N. Alkalitolerant micromycetes in acidic and neutral soils of the temperate zone // Microbiology. 2016. Vol. 85. N 6. P. 737–744.
8. Зеленковский П.С., Куриленко В.В. Природно-техногенная система соляного озера Баскунчак и особенности эксплуатации её ресурсов // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геол. Геогр. 2013. № 4. С. 33–52.
9. Bataeva Y.V., Dzerzhinskaya I.S., Astafyeva O.V., Satkalieva M.C., Yakovleva L.V., Kondratenko E.I., Magzanova D.K., Baimuhambetova A.S. Investigation of specific microorganisms in the salt lakes of Southern Russia // Afr. J. Microbiol. Res. 2015. Vol. 38. N 9. P. 2051–2056.
10. Buchalo A.S., Nevo E., Wasser S.P., Oren A., Molitoris H.P. Fungal life in the extremely hypersaline water of the Dead Sea: first records // Proc. Biol. Sci. 1998. Vol. 265. N 1404. P. 1461–1465.
11. Kis-Papo T., Oren A., Wasser S.P., Nevo E. Survival of filamentous fungi in hypersaline Dead Sea water // Microbial Ecol. 2003. Vol. 45. N 2. P. 183–190.
12. Smolyanyuk E.V., Bilanenko E.N. Communities of halotolerant micromycetes from the areas of natural salinity // Microbiology. 2011. Vol. 80. N 6. P. 877–883.
13. Oren A., Gunde-Cimerman N. Fungal life in the Dead Sea // Biology of Marine Fungi / Eds. C. Raghukumar. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P. 115–132.
14. Grishkan I., Nevo E., Wasser S.P. Soil micromycete diversity in the hypersaline Dead Sea coastal area, Israel // Mycol. Prog. 2003. Vol. 2. N 1. P. 19–28.
15. Grum-Grzhimaylo A.A., Falkoski D.L., van den Heuvel J., et al. The obligate alkalophilic soda-lake fungus *Sodiomyces alkalinus* has shifted to a protein diet // Mol. Ecol. 2018. Vol. 27. N 23. P. 4808–4819.
16. Kevbrin V.V. Isolation and cultivation of alkaliphiles // Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology / Eds. T. Scheper. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019. P. 1–32.
17. Carreira C., Staal M., Falkoski D., Vries R.P., Middelboe M., Brussaard C.P. Disruption of photoautotrophic intertidal mats by filamentous fungi // Environ. Microbiol. 2015. Vol. 17. N 8. P. 2910–2921.
18. Rogozhin E.A., Sadykova V.S., Baranova A.A., Vasilchenko A.S., Lushpa V.A., Mineev K.S., Georgieva M.L., Kul'ko A.B., Krashennnikov M.E., Lyundup A.V., Vasilchenko A.V., Andreev Y.A. A novel lipopeptaibol emericellipsin A with antimicrobial and

antitumor activity produced by the extremophilic fungus *Emericellopsis alkalina* // *Molecules*. 2018. Vol. 23. N 11. E2785.

19. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.H. Compendium of soil fungi. Second edition. Eching: IHW-Verlag & Verlagsbuchhadlung, 2007. 700 pp.

20. Zare R., Gams W.D., Starink-Willemsse M., Summerbell R.C. *Gibellulopsis*, a suitable genus for *Verticillium nigrescens*, and *Musciellium*, a new genus for *V. theobromae* // *Nova Hedwigia*. 2007. Vol. 85.

N 3–4. P. 463–489.

21. Giraldo A., Genù J., Sutton D.A., Madrid H., De Hoog G.S., Cano J., Decock C., Crous P.W., Guarro J. Phylogeny of *Sarocladium* (Hypocreales) // *Persoonia*. 2015. Vol. 34. P. 10–24.

Поступила в редакцию 22.03.2019 г.

После доработки 24.04.2019 г.

Принята в печать 06.05.2019 г.

RESEARCH ARTICLE

FIRST DISCOVERY OF ALKALI-RESISTANT FUNGI ON THE COAST OF CHLORIDE LAKE BASKUNCHAK

S.A. Bondarenko^{1,2,*}, M.L. Georgieva^{1,3}, L.Y. Kokaeva¹, E.N. Bilanenko¹

¹*Department of Mycology and Algology, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye gory 1–12, Moscow, 119234, Russia;*

²*Federal Research Centre «Fundamentals of Biotechnology», Russian Academy of Sciences, Leninsky prospect 33–2, Moscow, 119071 Russia;*

³*Gause Institute of New Antibiotics, Bolshaya Pirogovskaya 11–1, Moscow, 119021 Russia*

*e-mail: bond.sonia@gmail.com

This is the first study of alkali-resistant fungi in the conditions of neutral salinization at the Lake Baskunchak (Astrakhan region, Russia). Fungi were isolated from the lake coast chloride soils on alkaline agar medium (pH 10.0–10.5); isolates were characterized by morphological, cultural, and molecular genetic features; phylogenetic analysis and analysis of adaptation to pH and salinity were performed. It has been shown that alkali-resistant fungi at the lake coast is a polyphyletic group of Ascomycetes from Sordariomycetes (9 species), Dothideomycetes (5 species), Eurotiomycetes (3 species), and also sterile mycelium (15 isolates). The study of the growth rates in a wide range of pH has shown that among the isolates there are both alkalotolerant fungi and alkaliphilic one. The tolerance of isolates to elevated concentrations of sodium chloride was confirmed. The discovery of obligate alkaliphiles, under conditions of neutral salinization, was unexpected. Phylogenetic reconstructions were carried out, obligate alkaliphilic isolates were characterized as a new species of the genus *Sodiomyces*. In the article, we discuss the possible ecological role of alkali-resistant fungi in saline habitats.

Keywords: *extremophiles, alkaliphilic fungi, alkalotolerant fungi, Sodiomyces, salt lakes, Lake Baskunchak, halotolerant fungi*

Сведения об авторах

Бондаренко София Андреевна – канд. биол. наук, мл. науч. сотр. кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-54-82; e-mail: bond.sonia@gmail.com

Кокаева Людмила Юрьевна – канд. биол. наук, науч. сотр. кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-54-82; e-mail: kokaeval@gmail.com

Георгиева Марина Леонидовна – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-54-82; e-mail: i-marina@yandex.ru

Биланенко Елена Николаевна – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-54-82; e-mail: e_bilanenko@mail.ru