

УДК 582.28:579:551.35(262.5)

## НОВЫЕ НАХОДКИ КУЛЬТИВИРУЕМЫХ МИКРОМИЦЕТОВ В ГЛУБОКОВОДНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЧЕРНОГО МОРЯ

Н. И. Копытина<sup>1,\*</sup>, Е. А. Бочарова<sup>2</sup>, Л. В. Гулина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: \*kopytina\_n@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр

<sup>2</sup> Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН

299011 г. Севастополь, пл. Нахимова, 2

Поступила в редакцию 22.02.2024

В Черном море 24 августа 2011 г в рейсе № 70 НИС “Профессор Водяницкий”, на станции с координатами 44°40'70"N, 31°51'70"E, проведен отбор донных отложений из сероводородной зоны на глубине 756 м. Проба взята в районе континентального склона коробчатым дночерпателем конструкции фирмы “Shelf” (США). Из дночерпателя был вырезан столбик осадков высотой 40 см и разрезан по горизонтам с шагом в 5 см (8 образцов). В осадках обнаружено 18 видов грибов, до рода идентифицировано 3, таксоны отнесены к 11 родам, 10 семействам, 10 порядкам, 7 классов из отделов Ascomycota, Basidiomycota и Mucoromycota. В таксономическом составе микокомплексов осадков доминировали представители классов Eurotiomycetes (8) и Dothideomycetes (4). Численность микромицетов варьировала от 40 (горизонт 15.1–20 см) до 3300 КОЕ-г/сух. осадка (горизонт 5.1–10 см), максимальное количество таксонов обнаружено в горизонте 25–30 см – 5. В образцах осадков по численности доминировали представители отдела Ascomycota – 91.23%.

**Ключевые слова:** глубоководные донные отложения, сероводородная зона, подстилающие слои, микромицеты, возраст осадков.

DOI: 10.47021/0320-3557-2024-45-53

### ВВЕДЕНИЕ

Приблизительно 87% объема вод Черного моря заражены сероводородом и лишены кислорода. В других морях Мирового океана также известны зоны с содержанием сероводорода, но, как правило, его скопление носит временный характер и периодически окисляется кислородом, содержащимся в вышележащих слоях. Между кислородной и сероводородной зоной находится промежуточная – субоксидная. Ранее считалось, что в сероводородной зоне Черного моря живут лишь серобактерии. В последнее время исследования в субоксидной и сероводородной зонах установили встречаемость некоторых организмов из кислородного слоя, а также новых, не известных науке [Зайцев и др., 1987 (Zaitsev et al., 1987); Sergeeva, Smyrnova, 2020; Иванова, Гулин, 2022 (Ivanova, Gulin, 2022)].

Первое изучение микобиоты в пелагиали сероводородной зоны моря выполнено в 1946–1955 гг. [Крисс и др., 1952 (Criss et al., 1953); Крисс, 1959 (Criss, 1959)], продолжено в 1965 г. [Meyers et al., 1967]. Были обнаружены аскомицетовые дрожжи – *Candida diddensii* (Phaff, Mraak & O.B. Williams) Fell & S.A. Mey. 1967, *C. pulcherrima* (Lindner) Windisch, 1940, *Cystofilobasidium infirmominiatum* (Fell, I.L. Hunter & Tallman) Hamam., Sugiy. & Komag., 1988, *Debaryomyces hansenii*

(Zopf) Lodder & Kreger-van Rij, 1984, *D. hansenii* (Zopf) Lodder & Kreger-van Rij 1984, базидиомицетовые дрожжи – *Cryptococcus aerius* (Saito) Nann., 1927, *C. laurentii* (Kuff.) C.E. Skinner, 1950, *Rhodotorula aurantiaca* (Saito) Lodder, 1934, *R. colostri* (T. Castelli) Lodder, 1934, *R. glutinis* (Fresen.) F.C. Harrison, 1928, *R. mucilaginosa* (A. Jörg.) F.C. Harrison, 1928, *R. rubra* (Schimon) F.C. Harrison [1928], *Sporobolomyces salmonicolor* (B. Fisch. & Brebeck) Kluuyver & C.B. Niel, 1924 [Крисс и др., 1952 (Criss et al., 1953); Крисс, Новожилова, 1954 (Kriss, Novozhilova, 1954); Крисс, 1959 (Criss et al., 1959); Meyers, et al., 1967], а также мицелиальные грибы – *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl., 1912, *A. tenuissima* (Kunze) Wiltshire, 1933, *Aspergillus niger* Tiegh., 1867, *Cladosporium cladosporioides* (Fresen.) G.A. de Vries, 1952, *C. herbarum* (Pers.) Link 1816, *Penicillium citrinum* (Saito) Lodder, 1934 [Meyers, et al., 1967].

В осадках с глубин 1800 и 2250 м (сероводородная зона) были описаны 2 формы бентосных организмов [Сергеева, Заика, 1999 (Sergeeva, Zaika, 1999)], которые позже были определены, как микромицеты рода *Aspergillus* [Зайцев, Копытина, 2008 (Zaitsev, Kopytina, 2008)].

В районе пролива Босфор, в донных отложениях на глубинах 117, 150, 252, 263 м (зона перехода от кислородных к сероводородным условиям) и 2250 м (сероводородная зона), методом прямого микрокопирования, выявлены плотные скопления септированных гиф разного строения. В некоторых агрегациях мицелия присутствовали фрагменты раковин двусторчатых моллюсков и пустые створки диатомовых водорослей (*Coscinodiscus*) [Sergeeva, Korytina, 2014]. Также на глубине 250 м найдены особи живых нематод *Axonolaimus setosus* Filipjev 1918 с гифами грибов во внутренней полости и на кутикуле [Копытина, Сергеева, 2023 (Korytina, Sergeeva, 2023)].

В результате исследований донных отложений в сероводородной зоне Черного моря на глубинах от 800 до 2100 м, выполненных в 2005 г., обнаружены споры (цисты) организмов-оксибионтов, из которых вырастили живые культуры бактерий, грибов, однокле-

точных водорослей, обитающих в верхней кислородной зоне [Зайцев и др., 2007 (Zaitsev et al., 2007)]. Дальнейшие исследования подтвердили вывод, что дно сероводородной области – это “банк спор” оксибионтов, способных прорасти и развиваться при перенесении их в кислородную среду. Доказательство – выделение 12 таксонов водорослей и 21 таксона грибов из донных отложений в горизонте 0–5 см [Зайцев и др., 2007, 2008; (Zaitsev et al., 2007, 2008); Zaitsev, Polikarpov, 2008].

Другие исследования донных отложений в сероводородной зоне моря, для выявления микобиоты, нам неизвестны.

Цель этой работы – проверить/подтвердить способность микромицетов выживать в подстилающих слоях глубоководных донных отложений, зараженных сероводородом, глубиной до 40 см от границы вода-дно, выявить таксономический состав и структуру комплексов грибов, используя метод культивирования.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Черном море 24 августа 2011 г в рейсе № 70 НИС “Профессор Водяницкий”, на станции с координатами 44°40'70"N, 31°51'70"E, был проведен отбор осадков на глубине 756 м (сероводородная зона). Проба взята в районе континентального склона автоматическим коробчатым дночерпателем конструкции фирмы “Shelf” (США) (площадь захвата 0.12 м<sup>3</sup>). Дночерпатель изготовлен в мастерских Woods-Hool и предназначен для вертикального отбора проб мягких донных отложений с сохраненной стратификацией [Поликарпов и др., 2008 (Polikarpov et al., 2008)]. Из донных отложений пластиковой трубкой с внутренним диаметром 58 мм, обработанной 96% спиртом, был вырезан столбик отложений высотой 40 см, и разрезан по горизонтам с шагом в 5 см (8 образцов). Тип грунта – темно-серый ил с тонкими полосками белого цвета и запахом сероводорода, в верхних слоях ил имел полужидкую консистенцию, с увеличением глубины – более плотную.

Суспензии отложений посеяны в микробиологическом боксе судна в день отбора проб. Грибы выделяли методом посева суспензий осадков, на агаризованные среды Чапека и Сабуро, приготовленных на природной морской воде (22‰), по две повторности на каждой среде. Руководствовались общепринятым методом выделения грибов из грунта [Методы..., 1982 (Methods..., 1982)]. Культивирование грибов проводили в аэробных и анаэробных условиях при тем-

пературе 18–20°C. Анаэробные условия были созданы в микробиологическом анаэротате Mikrobiologie Anaerotest (производство Германия), при помощи реактивов, поглощающих кислород из воздуха, той же фирмы. Отсутствие кислорода в объеме анаэротата проверяли с помощью тест полосок, которые в отсутствие кислорода изменяют цвет с голубого на белый.

Микромицеты идентифицировали по морфолого-культуральным характеристикам, используя определители [Билай, Коваль, 1988 (Bilal, Koval' 1988); De Hoog et al., 2000]. Названия грибов и таксономическая принадлежность проверены по электронной базе данных Index Fungorum<sup>1</sup>.

Полученные данные обработаны с помощью компьютерных программ MS Excel и PRIMER<sup>®</sup> 5.2.8. Индекс Шеннона микокомплексов по горизонтам отложений вычислен по числу таксонов и их численности (функция DIVERSE). Сходство видового состава (присутствие/отсутствие вида) в комплексах грибов по горизонтам оценено по коэффициенту Брэя–Кертиса (функция Similarity) [Clarke et al., 2014].

Долю численности грибов, принадлежащих к разным отделам, вычисляли исходя из общей численности таксонов отдела к общей численности, выделенных в образцах грунта.

<sup>1</sup> <http://www.indexfungorum.org/names/Names.asp> (accessed on 29.02.24)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Послойные исследования глубоководных донных отложений, находящиеся в сероводородной зоне ниже границы вода-дно до глубины 40 см в Черном море выполнены нами впервые. В анаэробных условиях не наблюдали рост грибов при инкубации чашек Петри в течение восьми недель. После нарушения анаэробных условий культивирования в чашках начался рост микромицетов. Таксономический состав грибов, выделенных в аэробных условиях, а также выделенных после последующей инкубации материала, находящегося в анаэробном состоянии, как правило, совпал. На данном этапе исследования можно только констатировать, что микромицеты сохраняют жизнеспособность в донных отложениях сероводородной зоны Черного моря в течение длительного периода времени.

Микромицеты были отнесены к представителям отделов Ascomycota, Basidiomycota и Mucoromycota, до вида идентифицированы 15 таксонов, до рода 3 (табл. 1) и стерильный мицелий (терригенные виды грибов).

Скорость осадконакопления в зоне континентального склона составляет 2.2 мл в год [Мирзоева и др., 2018 (Mirzoeva et al., 2018)]. Следовательно, в исследуемых образцах осадков, грибы сохраняли жизнеспособность более 180 лет. Наибольшее количество таксонов грибов выделили в слоях 25–30 см – 5, в остальных – 1–4. Численность микромицетов варьировала от 40 (горизонт 15.1–20 см) до 3300 КОЕ·г/сух. осадка (горизонт 5.1–10 см) (табл. 2).

**Таблица 1.** Видовой состав, численность и распределение грибов по горизонтам осадков в Черном море (0–40 см)

**Table 1.** Species composition, abundance and distribution of fungi along sediment horizons in the Black Sea (0–40 cm)

Вид микромицета Fungal species	Горизонт осадка, см Horizon, cm	Численность, КОЕ г/сухого осадка, мин.–макс. Total abundance, CFU g/dry sediment, min–max
Отдел Ascomycota, класс Dothideomycetes Phylum Ascomycota, class Dothideomycetes		
<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl. 1912	0–5	31
<i>A. chlamydospora</i> Mouch. 1973	35–40	86
<i>Cladosporium herbarum</i> (Pers.) Link 1816	25–30	1512
<i>C. sphaerospermum</i> Penz. 1882	5–10	220
Класс Eurotiomycetes / Class Eurotiomycetes		
<i>Aspergillus candidus</i> Link 1809	26–30, 30–35	108
<i>A. fumigatus</i> Fresen. 1863	25–30	36
<i>A. niger</i> Tiegh. 1867	25–30	36
<i>A. terreus</i> Thom 1918	30–35	500
<i>A. versicolor</i> (Vuill.) Tirab. 1908	30–35	1000
<i>Exophiala dermatitidis</i> (Kano) de Hoog 1977	30–35	1000
<i>Penicillium brevicompactum</i> Dierckx 1901	15–20	41
<i>P. citrinum</i> Thom 1910	20–25	535
Класс Sordariomycetes / Class Sordariomycetes		
<i>Botryotrichum murorum</i> (Corda) X.Wei Wang et Samson 2016	1–5	960
<i>Stachybotrys chartarum</i> (Ehrenb.) S. Hughes 1958	1–5	31
Класс Saccharomycetes / Class Saccharomycetes		
<i>Metschnikowia</i> sp. 1	10–15	500
Отдел Basidiomycota, класс Malasseziomycetes Phylum Basidiomycota, class Malasseziomycetes		
<i>Malassezia</i> sp. 1	5–10	220
Класс Microbotryomycetes / Class Microbotryomycetes		
<i>Rhodotorula</i> sp.1	0–5, 5–10	110–220
Отдел Mucoromycota, класс Mucoromycetes Phylum Mucoromycota, class Mucoromycetes		
<i>Rhizopus arrhizus</i> A. Fisch. 1892	25–30	30
Неидентифицированные таксоны Unidentified taxon		
Стерильный мицелий 1	0–5; 5–10	960–2640
Стерильный мицелий 2	10–15	1200

**Таблица 2.** Показатели количественного развития и таксономического разнообразия грибов в горизонтах глубоководных донных отложений Черного моря (0–40 см)

**Table 2.** Indicators of quantitative development and taxonomical diversity of fungi in the horizons of deep-sea bottom sediments of the Black Sea (0–40 cm)

Горизонт, см Horizon, cm	Количество таксонов Number of taxa	Численность, КОЕ г/сух. осадка Total abundance, CFU g <sup>-1</sup> /dry sediment	Индекс Шеннона, $H'(\log_e)$ Shannon Index, $H'(\log_e)$	Возраст осадков, лет Precipitation age, years
0–5	4	1982	0.832	<22
5.1–10	4	3300	0.720	22–45
10.1–15	3	1810	0.798	45.5–68
15.1–20	1	40	0.000	68.2–90
20.1–25	1	535	0.000	90.9–113
25.1–30	5	1728	0.532	113.7–136
30.1–35	3	2500	0.960	136.4–159
35.1–40	1	86	0.000	159.1–181

Сходство видового состава по коэффициенту Брея-Кертиса между горизонтами осадков в большинстве случаев составляло – 0, так как в них не было выделено общих видов. В горизонтах до 15 см сходство видового состава было: 0–5 см и 5.1–10 см – 25.0%; 0–5 см и 10.1–15 см – 28.6%; 5.1–10 см и 10.1–15 см – 57.1%.

Виды *Alternaria chlamyospora*, *Aspergillus niger*, *Botryotrichum murorum*, *Penicillium citrinum*, *Stachybotrys chartarum*, в осадках Черного моря, зараженных сероводородом, выделены как в этом исследовании, так и ранее [Зайцев и др. 2007, 2008 (Zaitsev et al., 2007, 2008); Zaitsev, Polikarpov, 2008]. В глубоководных донных отложениях сероводородной зоны впервые обнаружили микромицеты: *Aspergillus candidus*, *A. fumigatus*, *A. versicolor*, *A. terreus*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Penicillium brevicompactum*, *Rhizopus arrhizus*. Перечисленные виды известны в прибрежной зоне Краснодарского края, полуострова Крым и северо-западной части моря: в планктоне, в донных отложениях, на створках устриц и на макрофитах [Бубнова, 2014 (Bubnova, 2014); Копытина, 2018, 2020 (Kopytina, 2018, 2020); Копытина и др., 2023а (Kopytina et al., 2023)]. Следовательно, споры или фрагменты мицелия, обитающие в верхних слоях моря, оседают на дно, и длительное время сохраняют жизнеспособность. Дрожжи рода *Rhodotorula* неоднократно отмечали в пелагиали сероводородной зоны моря, также получено доказательство их жизнеспособности и броидильной функции на больших глубинах Черного моря [Крисс и др., 1952 (Kriss et al., 1952); Крисс, Новожилова, 1954 (Kriss, Novozhilova, 1954); Крисс, 1959 (Kriss, 1959); Meyers, et al., 1967].

В пробах по численности доминировали представители отдела Ascomycota 91.23%.

В распределении количества видов и численности грибов по горизонтам отложений не было выявлено, какой-либо закономерности.

Известно, что некоторые дрожжевые и мицелиальные грибы – факультативные анаэробные микроорганизмы, которые легко адаптируются к постоянным или временным условиям аноксии, используя кислород из пораженного ими материала [Daiber et al., 2005; Кураков и др. 2008, 2011 (Kurakov et al., 2008, 2011); Jebaraj et al., 2010]. Анаэробный рост установлен у представителей 21 рода аскомицетных дрожжей [Кураков, 2013 (Kurakov, 2013)]. Транскриптомный анализ свидетельствует, что грибы активно функционируют в различных горизонтах глубоководных отложений, разлагают углеводородные соединения и жирные кислоты [Rédou et al., 2015; Pachiadaki et al., 2016].

В нашем исследовании по численности (91.23%) и количеству видов (83.3%) преобладали грибы из отдела Ascomycota из классов Dothideomycetes, Eurotiomycetes, Sordariomycetes, Saccharomycetes, а наиболее представлены виды рода *Aspergillus* (5). Данные совпадают с результатами, полученными в подобных экосистемах Мирового океана [Alexander et al., 2009; Jebaraj et al., 2010; Rédou et al., 2015; Xu et al., 2019; Rojas-Jimenez et al., 2020; Florio Furno et al., 2022]. Из подстилающих слоев глубоководных осадков, в том числе и зараженных сероводородом, обычно выделяют микромицеты, принадлежащие к родам *Alternaria*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Acremonium* и дрожжи *Metschnikowia* (Ascomycota), *Cryptococcus*, *Malassezia*, *Rhodotorula*, *Trichosporon* (Basidiomycota) [Rédou et al., 2014, 2015; Pachiadaki et al., 2016; Xu et al., 2019; Rojas-Jimenez et al., 2020].

В образцах осадков Черного моря обнаружены виды, зарегистрированные в глубоководных

водных донных отложениях других районов Мирового океана: *As. fumigatus* – Тихий океан (Новая Зеландия) [Rédou et al., 2015], *As. terreus* – Индийский океан (центральная часть) [Damare et al., 2006]; Тихий океан (Новая Зеландия) [Rédou et al., 2015]; *Cladosporium sphaerospermum* – Индийский океан (Юго-Западный Индийский хребет) [Xu et al., 2018]. В осадках также выявлены дрожжи: роды *Metschnikowia* – Тихий океан (Коста-Рика, Перу) [Rédou et al., 2014; Pachiadaki et al., 2016; Rojas-Jimenez et al., 2020], *Malassezia* – Северный Ледовитый океан (Шпицберген) [Zhang et al., 2015], *Rhodotorula* – Тихий океан (Новая Зеландия, Коста-Рика, Перу) [Rédou et al., 2014, 2015; Pachiadaki et al., 2016; Rojas-Jimenez et al.,

2020] и Индийский океан (Юго-Западный Индийский хребет) [Xu et al., 2018]. Таким образом, в структуре микокомплексов исследованных отложений прослеживаются общие черты, характерные для донных осадков Мирового океана. Наши исследования подтверждают, что глубина моря, отсутствие кислорода, высокое давление не являются лимитирующим фактором для комплексов грибов из подстилающих отложений, что согласуется с другими исследованиями [Rojas-Jimenez et al., 2020].

В комплексах грибов исследуемых подстилающих отложений авторы выявили общие закономерности, характерные для подобных мест обитания в Мировом океане.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В подстилающих горизонтах глубоководных донных отложений из сероводородной зоны выделены грибы из отделов Ascomycota, Basidiomycota, Mucoromycota и стерильный мицелий, что подтверждает сохранение жизнеспособности микромицетов до глубины 40 см в осадках возрастом более 180 лет, а также их культуральной способности в присутствии кислорода.

Не было выявлено закономерности в распределении количества таксонов и чис-

ленности грибов по глубине горизонта осадков. Выявлены общие черты структуры микокомплексов исследованных осадков с комплексами подстилающих слоев грунта из других районов Мирового океана. Необходимы дополнительные исследования глубоководных отложений Черного моря для установления видового состава и дополнительного подтверждения жизнеспособности грибов в условиях сероводородной зоны.

Исследование проведено за счет государственных заданий: “Института биологии внутренних вод имени Д.И. Папанина РАН” “Разнообразие, структура, функционирование и роль вирусов, прокариотных и эукариотных микроорганизмов в формировании биологического режима континентальных вод” (№ 124032500012-6) и ФИЦ “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН” “Комплексное исследование механизмов функционирования биотехнологических комплексов с целью получения активных веществ из гидробионтов” (№ 124022400152-1); “Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозкологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях” (№ 124030100127-7).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают сердечную признательность С.Б. Гулину, доктору биологических наук, профессору, за отбор проб, помощь и поддержку в исследовании морских микромицетов. С.Б. Гулин в период с 04.2015 по 05.2016 гг. исполнял обязанности директора Института морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН, а до 27.09.2018 г. занимал должность директора этого Института (в настоящее время Федеральный исследовательский центр “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН” г. Севастополь). Также выражаем благодарность В.Ю. Проскуруину за содействие в проведении заборных работ, капитану НИС “Профессор Водяницкий” В.Г. Тыниники и экипажу судна.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Билай В.И., Коваль Э.З. Аспергиллы. Киев: Наукова Думка, 1988. 204 с.  
 Бубнова Е.Н. Грибы прибрежной зоны Черного моря в районе Голубой бухты (восточное побережье, окрестности г. Геленджика) // Микология и фитопатология. 2014. Т. 48, Вып. 1. С. 20–30.  
 Зайцев Ю.П., Анцупова Л.В., Воробйова Л.В., Гаркава Г.П., Кулакова И.Л., Руснак Е.М. Нематоды у глубоководной зоне Чорного моря // Доповіді Академії наук Української РСР. Сер. Б. 1987. № 11. С. 77–79.  
 Зайцев Ю.П., Копытина Н.И. Высшие грибы из донных отложений сероводородной батиаля Черного моря / “Современная микология в России” тез. докл. 2-го съезда микологов России, (Москва, 16–18 апр., 2008 г.). М.: Национальная академия микологии, 2008. Т. 2. С. 386–387.

- Зайцев Ю.П., Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Александров Б.Г., Гаркуша О.П., Копытина Н.И., Курилов А.В., Нестерова Д.А., Нидзвецкая Л.М., Никонова С.Е., Поликарпов И.Г., Поповичев В.Н., Руснак Е.М., Стокозов Н.А., Теплинская Н.Г., Теренько Л.М. Средоточие останков оксибионтов и банк живых спор высших грибов и диатомовых в донных отложениях сероводородной батиаля Черного моря // Доповіді Національної Академії наук України. 2007. № 7. С. 159–164.
- Зайцев Ю.П., Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Копытина Н.И., Курилов А.В., Нестерова Д.А., Нидзвецкая Л.М., Поликарпов И.Г., Стокозов Н.А., Теплинская Н.Г., Теренько Л.М. Биологическое разнообразие оксибионтов (в виде жизнеспособных спор) и анаэробов в донных осадках сероводородной батиаля Черного моря // Доповіді Національної Академії наук України. 2008. № 5. С. 168–173.
- Иванова Е.А., Гулин М.Б. Функционально-трофические группы сообщества нематод бентали в редокс-зоне в северо-восточном секторе Черного моря // Экосистемы. 2022. № 29. С. 123–129.
- Копытина Н.И. Водная микобиота заказника “Бухта Казачья” (Черное море, Крым) // Биота и среда заповедных территорий. 2018. № 4. С. 49–68.
- Копытина Н.И. Микобиота пелагиали Одесского региона северо-западной части Черного моря // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 52. С. 140–163. DOI: 10.17223/19988591/52/8.
- Копытина Н.И., Сергеева Н.Г. Ассоциации грибов и нематод в Черном море // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2023. Вып. 102(105). С. 36–46. DOI: 10.47021/0320-3557-2023-36-46.
- Копытина Н.И., Родионова Н.Ю., Бочарова Е.А. Влияние абиотических факторов на структуру комплексов грибов в пелагиали Черного и Азовского морей летом 2019 г. // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2023а. № 62. С. 109–128. DOI: 10.17223/19988591/62/6.
- Крисс А.Е. Морская микробиология (глубоководная). М.: Изд-во АН СССР, 1959. 455 с.
- Крисс А.Е., Рукина Е.А., Тихоненко А.С. Распространение дрожжевых организмов в море // Журнал общей биологии. 1952. Т. 8, № 3. С. 232–242
- Крисс А.Е., Новожилова М.И. Являются ли дрожжевые организмы обитателями морей и океанов? // Микробиология. 1954. Т. 23, вып. 6. С. 667–683.
- Кураков А.В., Лаврентьев Р.Б., Нечитайло Т.Ю., Гольшин П.Н., Звягинцев Д.Г. Разнообразие факультативно-анаэробных мицелиальных микроскопических грибов в почвах // Микробиология. 2008. Т. 77, № 1. С. 103–112.
- Кураков А.В., Хидиров К.С., Садыкова В.С., Звягинцев Д.Г. Способность к анаэробному росту и активность спиртового брожения у микроскопических грибов // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47, № 2. С. 187–193.
- Кураков А.В. Разнообразии, рост и метаболизм грибов в анаэробных условиях // Проблемы микологии и фитопатологии в XXI веке: материалы международной научной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР, профессора Артура Артуровича Ячевского (Санкт-Петербург, 2–4 октября 2013 г.). Санкт-Петербург: ООО “Копи-Р Групп”, Национальная академия микологии, БГС, Дизайн-студия “Дозор”. 2013. С. 166–168.
- Методы экспериментальной микологии. Справочник / В.И. Билай (ред.). Киев: Наукова думка, 1982. 550 с.
- Мирзоева Н.Ю., Гулин С.Б., Сидоров И.Г., Гулина Л.В. Оценка скорости седиментации и осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Черного моря с использованием природных и антропогенных (Чернобыльских) радионуклидов // Система Черного моря / отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Научный мир, 2018. Гл. 7.5. С. 659–670. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.659.
- Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Стокозов Н.А., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Цыцугина В.Г., Кулебакина Л.Г., Поповичев В.Н., Коротков А.А., Евтушенко Д.Б., Жерко Н.В., Малахова Л.В. Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Г.Г. Поликарпов, В.Н. Егоров ред. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 667 с.
- Сергеева Н.Г., Заика В.Е. Донные стадии *Krassilnikoviae* в сероводородной зоне Черного моря // Экология моря. 1999. Вып. 48. С. 83–86.
- Alexander E., Stock A., Breiner H.W., Behnke A., Bunge J., Yakimov M. M., Stoeck T. Microbial eukaryotes in the hypersaline anoxic L'Atalante deep-sea basin. *Environmental microbiology*. 2009. Vol. 11, № 2. P. 360–381. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2008.01777.x.
- Clarke K.R., Gorley R.N., Somerfield P.J., Warwick R.M. Change In Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation (3rd edition). PRIMER-E Ltd: Plymouth, 2014. 262 p.
- Daiber A., Shoun H., Ullrich V. Nitric oxide reductase (P450nor) from *Fusarium oxysporum*. *Journal of inorganic biochemistry*, 2005, vol. 99, no. 1, pp. 185–193. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2004.09.018.
- Damare S., Raghukumar C., Raghukumar S. Fungi in deep-sea sediments of the Central Indian Basin. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*. 2006. Vol. 53. № 1. P. 14–27. DOI: 10.1016/j.dsr.2005.09.005.
- De Hoog G.S., Guarro J., Gene J., Figueras M.J. Atlas of clinical fungi. Utrecht: CBS; Spain: Reus, 2000. 1126 p.
- Florio Furno M., Poli A., Ferrero D., Tardelli F., Manzini C., Oliva M., Pretti C., Campani T., Casini S., Fossi, M.C., Varese G.C., Prigione V. The Culturable Mycobiota of Sediments and Associated Microplastics: From a Harbor to a Marine Protected Area, a Comparative Study. *Journal of fungi* (Basel, Switzerland). 2022. Vol. 8. № 9. P. 927. DOI: 10.3390/jof8090927.
- Jebaraj C.S., Raghukumar C., Behnke A., Stoeck T. Fungal diversity in oxygen-depleted regions of the Arabian Sea revealed by targeted environmental sequencing combined with cultivation. *FEMS microbiology ecology*. 2010. Vol. 71. № 3. P. 399–412. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2009.00804.x.

- Meyers S.P., Ahearn D.G., Roth F.J. Mycological investigations of the Black Sea. *Bulletin of Marine Science*. 1967. Vol. 17. № 3. P. 576–596.
- Pachiadaki M.G., Rédou V., Beaudoin D.J., Burgaud G., Edgcomb V.P. Fungal and Prokaryotic Activities in the Marine Subsurface Biosphere at Peru Margin and Canterbury Basin Inferred from RNA-Based Analyses and Microscopy. *Frontiers in microbiology*. 2016. Vol. 7. Article 846. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00846.
- Rédou V., Ciobanu M.C., Pachiadaki M.G., Edgcomb V., Alain K., Barbier G., Burgaud G. In-depth analyses of deep subsurface sediments using 454-pyrosequencing reveals a reservoir of buried fungal communities at record-breaking depths. *FEMS Microbiology Ecology*. 2014. Vol. 90. № 3. P. 908–921. DOI: 10.1111/1574-6941.12447.
- Rédou V., Navarri M., Meslet-Cladière L., Barbier G., Burgaud G. Species richness and adaptation of marine fungi from deep-subseafloor sediments. *Applied and environmental microbiology*. 2015. Vol. 81. P. 3571–3583. DOI: 10.1128/AEM.04064-14.
- Rojas-Jimenez K., Grossart H.-P., Cordes E., Cortés J. Fungal Communities in Sediments Along a Depth Gradient in the Eastern Tropical Pacific. *Frontiers in microbiology*. 2020. Vol. 11. Article 575207. DOI: 10.3389/fmicb.2020.575207.
- Sergeeva N.G., Kopytina N.I. The First Marine Filamentous Fungi Discovered in the Bottom Sediments of the Oxidic/Anoxic Interface and in the Bathyal Zone of the Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2014. Vol. 14. № 1–2. P. 497–505. DOI: 10.4194/1303-2712-v14\_2\_21.
- Sergeeva N.G., Smyrnova L.L. Unusual Benthic Morphotypes Typical of Permanent Hydrogen Sulfide Zone of the Black Sea: Hypotheses of Their Origin and Perspectives of Study. *Paleontological Journal*. 2020. Vol. 54, iss. 8. P. 889–895. DOI: 10.1134/S0031030120080158.
- Xu W., Gong L.-f., Pang K.-L., Luo Z.-H. Fungal diversity in deep-sea sediments of a hydrothermal vent system in the Southwest Indian Ridge. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018. Vol. 131. P. 16–26. DOI: 10.1016/j.dsr.2017.11.001.
- Xu W., Gao Y., Gong L., Li M., Pang K.L., Luo Z.H. Fungal diversity in the deep-sea hadal sediments of the Yap Trench by cultivation and high throughput sequencing methods based on ITS rRNA gene. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2019. Vol. 145. P. 125–136. DOI: 10.1016/j.dsr.2019.02.001.
- Zaitsev Y.P., Polikarpov G.G. Recently Discovered New Biospheric Pelocontour Function in the Black Sea Reductive Bathyal Zone. *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*. 2008. Vol. 14. Issue 3. P. 151–165.
- Zhang T., Wang N.F., Zhang Y.Q., Liu H.Y., Yu L.Y. Diversity and distribution of fungal communities in the marine sediments of Kongsfjorden, Svalbard (High Arctic). *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. Article 14524. DOI: 10.1038/srep14524.

## REFERENCES

- Alexander E., Stock A., Breiner H.W., Behnke A., Bunge J., Yakimov M.M., Stoeck T. Microbial eukaryotes in the hypersaline anoxic L'Atalante deep-sea basin. *Environmental microbiology*, 2009, vol. 11, no. 2, pp. 360–381. doi: 10.1111/j.1462-2920.2008.01777.x
- Bilai V.I., Koval' E.Z. *Aspergilly*. Kiev: Naukova Dumka, 1988. 204 p. (In Russian)
- Bubnova E. N. Fungi of the Blue Bay (Black Sea, Eastern coast near the town of Gelendzhik). *Mikologia i fitopatologia*, 2014, vol. 48, iss. 1, pp. 103–112. (In Russian)
- Clarke K.R., Gorley R.N., Somerfield P.J., Warwick R.M. *Change In Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation* (3rd edition). PRIMER-E Ltd: Plymouth, 2014, 262 p.
- Daiber A., Shoun H., Ullrich V. Nitric oxide reductase (P450nor) from *Fusarium oxysporum*. *Journal of inorganic biochemistry*, 2005, vol. 99, no. 1, pp. 185–193. doi: 10.1016/j.jinorgbio.2004.09.018.
- Damare S., Raghukumar C., Raghukumar S. Fungi in deep-sea sediments of the Central Indian Basin. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 2006, vol. 53, no. 1, pp. 14–27. doi: 10.1016/j.dsr.2005.09.005.
- De Hoog G.S., Guarro J., Gene J., Figueras M.J. *Atlas of clinical fungi*. Utrecht: CBS; Spain: Reus, 2000, 1126 p.
- Florio Furno M., Poli A., Ferrero D., Tardelli F., Manzini C., Oliva M., Pretti C., Campani T., Casini S., Fossi, M.C., Varese G.C., Prigione V. The Culturable Mycobiota of Sediments and Associated Microplastics: From a Harbor to a Marine Protected Area, a Comparative Study. *Journal of fungi (Basel, Switzerland)*, 2022, vol. 8, no. 9, pp. 927. doi: 10.3390/jof8090927.
- Ivanova E.A., Gulina M.B. Functional-trophic groups of the benthic nematode community in the redox zone in the northeastern sector of the Black Sea. *Ekosistemy*, 2022, iss. 29, pp. 123–129.
- Jebaraj C.S., Raghukumar C., Behnke A., Stoeck T. Fungal diversity in oxygen-depleted regions of the Arabian Sea revealed by targeted environmental sequencing combined with cultivation. *FEMS microbiology ecology*, 2010, vol. 71, no. 3, pp. 399–412. doi: 10.1111/j.1574-6941.2009.00804.x.
- Kopytina N.I. Aquatic Mycobiota of the Nature Reserve (Zakaznik) “Kazachya Bay” (Black Sea, Crimea). *Biodiversity and environment of protected areas*, 2018, no. 4, pp. 49–68. (In Russian)
- Kopytina N.I. Mycobiota of the pelagic zone of Odessa region in the northwestern Black Sea. *Tomsk State University Journal of Biology*, 2020, no. 52, pp. 140–163. doi: 10.17223/19988591/52/8. (in Russia)
- Kopytina N.I., Rodionova N.Ju., Bocharova E.A. Effects of abiotic factors on the structure of fungal complexes in the pelagial of the Black and Azov Seas in summer 2019. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, no. 62, pp. 109–128. doi: 10.17223/19988591/62/6. (In Russian)
- Kopytina N.I., Sergeeva N.G. Associations of fungi and nematodes in the Black sea. *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod im. I.D. Papanina RAN*, 2023, iss. 102(105), pp. 36–46. doi: 10.47021/0320-3557-2023-36-46. (In Russian)

- Kriss A.E. *Morskaya mikrobiologiya (glubokovodnaya)*. M., Iz-vo AN SSSR, 1959. 455 p. (In Russian)
- Kriss A.E., Novozhilova M.I. Yavlyayutsya li drozhzhevye organizmy obitatelnyami morei i okeanov. *Mikrobiologiya*, vol. 23, iss. 6, pp. 667–683. (In Russian)
- Kriss A.E., Rukina E.A., Tikhonenko A.S. Rasprostranenie drozhzhevykh organizmov v more. *Zhurnal obshchei biologii*, 1952, vol. 8, pp. 232–242. (In Russian)
- Kurakov A.V. Raznoobrazie, rost i metabolismm gribov v anaerobnykh usloviyakh. *Problemy mikologii i fitopatologii v XXI veke: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 150-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta AN SSSR, professora Artura Arturovicha Yachevskogo* (Sankt-Peterburg, 2–4 oktyabrya 2013 g.). Sankt-Peterburg: OOO “Kopi-R Grupp”, Natsional'naya akademiya mikologii, BGS, Dizain-studiya “Dozor”, 2013, pp. 166–168. (In Russian)
- Kurakov A.V., Khidirov K.S., Sadykova V.S., Zvyagintsev D.G. Anaerobic growth ability and alcohol fermentation activity of microscopic fungi. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 187–193. (In Russian)
- Kurakov A.V., Lavrent'ev R.B., Nechitailo T.Yu., Golyshin P.N., Zvyagintsev D.G. Diversity of facultatively anaerobic microscopic mycelial fungi in soils. *Mikrobiologiya*, 2008, vol. 77, no. 1, pp. 103–112. (In Russian)
- Methods of experimental mycology. Guide. Bilai V.I. (red.). Kiev, Naukova dumka, 1982. 550 p. (In Russian)
- Meyers S.P., Ahearn D.G., Roth F.J. Mycological investigations of the Black Sea. *Bulletin of Marine Science*, 1967, vol. 17, no. 3, pp. 576–596.
- Mirzoeva N.Yu., Gulina S.B., Sidorov I.G., Gulina L.V. Otsenka skorosti sedimentatsii i osadkonakopleniya v pribrezhnykh i glubokovodnykh akvatoriyakh Chernogo morya s ispol'zovaniem prirodnykh i antropogennykh (Chernobyl'skikh) radionuklidov. *Sistema Chernogo morya*. Moskva, Nauchnyi mir, 2018. Gl. 7.5, pp. 659–670. doi: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.659. (In Russian)
- Pachiadaki M.G., Rédou V., Beaudoin D.J., Burgaud G., Edgcomb V.P. Fungal and Prokaryotic Activities in the Marine Subsurface Biosphere at Peru Margin and Canterbury Basin Inferred from RNA-Based Analyses and Microscopy. *Frontiers in microbiology*, 2016, vol. 7, article 846. doi: 10.3389/fmicb.2016.00846.
- Polikarpov G.G., Egorov V.N., Gulina S.B., Stokozov N.A., Lazorenko G.E., Mirzoeva N.Yu., Tereshchenko N.N., Tsyugina V.G., Kulebakina L.G., Popovichev V.N., Korotkov A.A., Evtushenko D.B., Zherko N.V., Malakhova L.V. *Radioekologicheskii otklik Chernogo morya na chernobyl'skuyu avariuyu*. G.G. Polikarpov, V.N. Egorov red. Sevastopol', EKOSI-Gidrofizika, 2008. 667 p. (In Russian)
- Rédou V., Ciobanu M.C., Pachiadaki M.G., Edgcomb V., Alain K., Barbier G., Burgaud G. In-depth analyses of deep subsurface sediments using 454-pyrosequencing reveals a reservoir of buried fungal communities at record-breaking depths. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, vol. 90, no. 3, pp. 908–921. doi: 10.1111/1574-6941.12447.
- Rédou V., Navarri M., Meslet-Cladière L., Barbier G., Burgaud G. Species richness and adaptation of marine fungi from deep-subseafloor sediments. *Applied and environmental microbiology*, 2015. vol. 81, pp. 3571–3583. doi: 10.1128/AEM.04064-14.
- Rojas-Jimenez K., Grossart H.-P., Cordes E., Cortés J. Fungal Communities in Sediments Along a Depth Gradient in the Eastern Tropical Pacific. *Frontiers in microbiology*, 2020, vol. 11, article 575207. doi: 10.3389/fmicb.2020.575207.
- Sergeeva N.G., Zaika V.E. Donnye stadii Krassilnikoviae v serovodorodnoi zone Chernogo morya. *Ekologiya moray*, 1999, iss. 48, pp. 83–86. (In Russian)
- Sergeeva N.G., Kopytina N.I. The First Marine Filamentous Fungi Discovered in the Bottom Sediments of the Oxidic/Anoxic Interface and in the Bathyal Zone of the Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2014, vol. 14, no. 1–2, pp. 497–505. doi: 10.4194/1303-2712-v14\_2\_21.
- Sergeeva N.G., Smyrnova L.L. Unusual Benthic Morphotypes Typical of Permanent Hydrogen Sulfide Zone of the Black Sea: Hypotheses of Their Origin and Perspectives of Study. *Paleontological Journal*, 2020. vol. 54, iss. 8. pp. 889–895. doi: 10.1134/S0031030120080158.
- Xu W., Gonga L.-f., Pang K.-L., Luo Z.-H. Fungal diversity in deep-sea sediments of a hydrothermal vent system in the Southwest Indian Ridge. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2018, vol. 131, pp. 16–26. doi: 10.1016/j.dsr.2017.11.001.
- Xu W., Gao Y., Gong L., Li M., Pang K.L., Luo Z.H. Fungal diversity in the deep-sea hadal sediments of the Yap Trench by cultivation and high throughput sequencing methods based on ITS rRNA gene. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2019, vol. 145, pp. 125–136. doi: 10.1016/j.dsr.2019.02.001.
- Zaitsev Y.P., Antsupova L.V., Vorobyova L.V., Harkava G.P., Kulakova I.I., Rusnak E.M. Nematodes in the deep-water zone of the Black Sea. *Dopovidi Akademii nauk Ukrain'skoi RSR. Ser. B*, 1987, no. 11, pp. 77–79.
- Zaitsev Yu.P., Polikarpov G.G., Egorov V.N., Aleksandrov B.G., Garkusha O.P., Kopytina N.I., Kurilov A.V., Nesterova D.A., Nidzetskaya L.M., Nikonova S.E., Polikarpov I.G., Popovichev V.N., Rusnak E.M., Stokozov N.A., Teplinskaya N.G., Teren'ko L.M. Sredotochie ostankov oksibiontov i bank zhivykh spor vysshikh gribov i diatomovykh v donnykh otlozheniyakh serovodorodnoi batiali Chernogo moray. *Dopovidi Natsional'noi Akademii nauk Ukraini*. 2007, no. 7, pp. 159–164. (In Russian)
- Zaitsev Y.P., Polikarpov G.G. Recently Discovered New Biospheric Pelocontour Function in the Black Sea Reductive Bathyal Zone. *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*, 2008, vol. 14, iss. 3, pp. 151–165.
- Zaitsev Yu.P., Kopytina N.I. Vysshie griby iz donnykh otlozhenii serovodorodnoi batiali Chernogo morya. “Sovremennaya mikologiya v Rossii” tez. dokl. 2-go s'ezda mikologov Rossii, (Moskva, 16–18 apr., 2008 g.). M., Natsional'naya akademiya mikologii, 2008, vol. 2, pp. 386–387. (In Russian)



- Zaitsev Yu.P., Polikarpov G.G., Egorov V.N., Gulin S.B., Kopytina N.I., Kurilov A.V., Nesterova D.A., Nidzvetskaya L.M., Polikarpov I.G., Stokozov N.A., Teplinskaya N.G., Teren'ko L.M. Biologicheskoe raznoobrazie oksibiontov (v vide zhiznesposobnykh spor) i anaerobov v donnykh osadkakh serovodorodnoi batiali Chernogo morya. *Dopovidi Natsional'noi Akademii nauk Ukraini*, 2008, no. 5, pp. 168–173. (In Russian)
- Zhang T., Wang N.F., Zhang Y.Q., Liu H.Y., Yu L.Y. Diversity and distribution of fungal communities in the marine sediments of Kongsfjorden, Svalbard (High Arctic). *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, article 14524. doi: 10.1038/srep14524.

## NEW FINDINGS OF CULTURED MICROMYCETES IN THE DEEP-SEA SEDIMENTS OF THE BLACK SEA

N. I. Kopytina<sup>1,\*</sup>, E. A. Bocharova<sup>2</sup>, L. V. Gulina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences,  
152742 Borok, Russia, e-mail: \*kopytina\_n@mail.ru*

<sup>2</sup> *A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 299011 Sevastopol, Russia*

Revised 22.02.2024

On August 24, 2011, during the cruise of R/V Professor Vodyanitsky in the Black Sea, bottom sediments were sampled from the hydrogen sulfide zone at a depth of 756 m at the station with coordinates 44°40'70"N, 31°51'70"E. The sample was taken using an automatic "Shelf" box corer (United States). A sediment core of 40 cm high was cut out of the box corer. The sediment core is further cut horizontally in 5 cm (8 samples). The sediment is homogeneous dark gray silt with thin white stripes and the smell of hydrogen sulfide. Eighteen species of fungi were found in sediments, 3 taxa were identified to genus level, the taxa were assigned to 11 genera, 10 families, 10 orders, 7 classes from the phyla Ascomycota, Basidiomycota and Mucoromycota. Representatives of the classes Eurotiomycetes (8) and Dothideomycetes (4) dominated in the taxonomic composition of mycocomplexes of sediments in the Black Sea. The abundance of micromycetes varied from 40 (horizon 15.1–20 cm) to 3300 CFU g<sup>-1</sup> dry sediment (horizon 5.1–10 cm); the maximum number of taxa (5) was recorded in the horizon of 25.1–30 cm. The representatives of the phylum Ascomycota dominated in the samples in terms of the number of taxa – 91.23%.

*Keywords:* deep-sea bottom sediments, hydrogen sulfide zone, subsurface layers, micromycetes, sediment age