

УДК 577.15.086.83 : 582.28

## СЕРОСОДЕРЖАЩИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ, ТОКСИНЫ И ФАРМАКОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ МЕТАБОЛИТЫ МАКРОМИЦЕТОВ

© 2021 г. Н. В. Белова<sup>1,\*</sup>, Н. В. Псурцева<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, 197376 Санкт-Петербург, Россия

\* e-mail: cultures@mail.ru

\*\* e-mail: nadyapsu@mail.ru

Поступила в редакцию 15.08.2020 г.

После доработки 15.10.2020 г.

Принята к публикации 19.11.2020 г.

В работе рассмотрены S-содержащие соединения, отвечающие за запах, ядовитые и лекарственные свойства ряда видов макромицетов. Представлены данные о химической структуре и биологической активности органосульфидов, циклических пептидов, эрготионеина и S-содержащих полисахаридов. Приведены виды макромицетов, содержащие сульфиды, токсины, эрготионеин.

**Ключевые слова:** биологическая активность, запахи, макромицеты, органосульфиды, токсины, циклические пептиды, эрготионеин, S-полисахариды

**DOI:** 10.31857/S0026364821010049

### ВВЕДЕНИЕ

Макромицеты синтезируют большое разнообразие вторичных метаболитов, образующихся на путях азотного и углеродного обмена – пигменты, терпеноиды, поликетиды, фенолы и другие соединения (Zhong, Xiao 2009). Многие метаболиты выполняют важные коммуникационные функции, осуществляя взаимодействия грибов с растениями, животными, насекомыми и микроорганизмами. Широкий спектр биологической активности метаболитов макромицетов находит практическое применение при создании разнообразных медицинских препаратов. Что касается S-содержащих метаболитов, то их доля среди всех метаболитов макромицетов пока относительно невелика, однако их роль и биологическая значимость заслуживают особого внимания. Настоящий обзор посвящен S-содержащим метаболитам макромицетов, обладающим выраженной биологической активностью и лекарственными свойствами.

### ОРГАНСУЛЬФИДЫ – ЛЕТУЧИЕ МЕТАБОЛИТЫ МАКРОМИЦЕТОВ

Макромицеты обладают большим разнообразием запахов, за которые отвечают сложные смеси летучих вторичных метаболитов. Типы веществ, их пропорции и концентрации значительно варьируют у разных видов грибов и зависят от возраста организма, субстрата и окружающей среды. Многочисленные исследования съедобных грибов из *Agaricus*, *Boletus*, *Pleurotus* и ряда других ро-

дов подтвердили, что в создании грибного аромата участвуют сложные смеси углеводов, гетероциклов, альдегидов, кетонов, фенолов, а также бензольных и циклогексановых производных, преимущественное присутствие в которых составляют простые спирты, кетоны и альдегиды – производные C8 (Morath et al., 2012; Moliszewska, 2014; Palazzolo et al., 2017). Впервые S-содержащие метаболиты – диметилсульфид и диметилдисульфид – были обнаружены в составе компонентов запаха у съедобных грибов из родов *Phallus* и *Tuber*. В настоящее время различные сульфиды, содержащиеся от одного до четырех сульфидных радикалов, идентифицировали в составе запаха у следующих видов макромицетов: *Clathrus archeri* (Borgkarlson et al., 1994), *Lentinula edodes* (Wu, Wang, 2000; Sneed et al., 2004; Tocco et al., 2015), *Leucangium carthusianum* (El Enshasy et al., 2013), *Mycetinis alliaceus* (Rapior et al., 1997), *M. scorodoni* (Kuo, 2013; Belova et al., 2015), *Phallus impudicus* (Pudil et al., 2014), *Podaxis pistillaris* (Al-Fatimi et al., 2006, 2007), *Pseudocolus fusiformis* (Kakumyan, Matsui, 2009), *Tricholoma matsutake* (Cho et al., 2008), *Tuber aestivum*, *T. magnatum*, *T. melanosporum* (Gioacchini et al., 2008; Splivallo et al., 2011; Torregiani et al., 2015), *T. brumale* (Kiss et al., 2011), *T. japonicum* (Shimokawa et al., 2019, Belova, Zmitrovich, 2020).

Макромицеты рода *Mycetinis*, включая *M. prasio*, *M. applanatipes*, *M. cinnamomeus*, *M. cope*, *M. curraniae*, *M. ignobilis*, *M. kallioneus*, *M. opacus*, *M. prasio*, *M. salalis*, *M. querceus*, *M. subalpinus*, *M. virgultorum*, *M. yunnanensi*, облада-

ют чесночным запахом, что позволяет рассматривать их по аналогии с уже исследованными видами этого рода, как синтезирующие сульфиды (Rapior et al., 1997; Belova et al., 2015).

Подобные S-содержащие структуры объединены в класс органополисульфидов. Эти вещества хорошо изучены у растений, причем наиболее богатыми S-содержащими соединениями являются представители семейства крестоцветных и амариллисовых (Tostno et al., 2015).

Содержание сульфидов в элементном составе соединений, отвечающих за запах, невелико и значительно отличается в зависимости от видов грибов. Присутствие сульфидов различной сложности в сочетании с другими метаболитами создает ароматы плодовых тел: собственно “трюфельный” у видов *Tuber*, варьирующий от оттенков сыра, чеснока, фруктов до фенольного (Gioacchini et al., 2008; Moliszewska; 2014; Shimokawa et al., 2019), “грибной” у *Lentinula edodes* (Wu, Wang, 2000; Sneed et al., 2004); “чесночный” у видов *Mycetinis* (Rapior et al., 1997; Belova et al., 2015) и “цветочный” у *Phallus impudicus* (Borgkarlson et al., 1994; Belova, 2011; Pudil et al., 2014). Химические структуры органополисульфидов макромицетов содержат, как правило, метильную группу в качестве органического радикала, в то время как у растений в качестве такового выступают аллил- и диаллил-, либо метилпропил- и метилпропенил-радикалы. Наряду с линейными сульфидами, среди компонентов аромата плодовых тел *Lentinula edodes* идентифицировали лентионин – сульфид с циклической структурой 1,2,3,5,6-пентатиопана. До настоящего времени исследования органосульфидов грибов ограничены лишь констатацией их наличия, и более детальные исследования в этом направлении отсутствуют (Al-Fatimi et al., 2006, 2007; Kakumyan, Matsui, 2009). В то же время на примере растительных метаболитов изучена активность органосульфидов, для которых доказано проявление широких кардиопротекторных свойств (Tostno et al., 2015; Frankel et al., 2016). Характер такой активности объясняют химической природой органосульфидов и способностью образовывать сероводород ( $H_2S$ ). Долгое время эту небольшую молекулу рассматривали лишь как ядовитый газ с неприятным запахом тухлых яиц, однако в последние годы многочисленными исследованиями доказано, что она служит сигнальной молекулой во многих физиологических и патологических процессах (Kimura et al., 2012; Kimura, 2014). Большинство макромицетов, образующих органосульфиды, являются съедобными грибами и обладают лекарственными свойствами с широким спектром биологической активности, включая противоопухолевую, иммуномодулирующую, антиоксидантную и др. Однако роль сульфидов в проявлении характера активности макромицетов никогда не исследовали.

## ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПЕПТИДЫ – S-СОДЕРЖАЩИЕ ТОКСИНЫ МАКРОМИЦЕТОВ

Природа токсических свойств макромицетов всегда находилась в центре внимания исследователей. Вариабельность токсического действия грибов объясняется присутствием соединений различной химической природы, ядовитые свойства которых чрезвычайно сложны и опасны. Химия, биохимия и молекулярно-биологические аспекты структур токсинов грибов рода *Amanita* были выполнены в основном в лаборатории профессора Wieland (1983, 1986; Liu 2005). Токсины *A. phalloides* относятся к нескольким типам структур. Большинство токсинов представляет собой циклические олигопептиды, небольшие молекулы белковой природы, структуры которых, разделяются на три группы: аматоксины, фаллотоксины и виротоксины. К группе аматоксинов относятся  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\epsilon$ -аманитины, амануллин, амануллиновая кислота, проамануллин и аманин, бициклические пептиды, образующие из восьми аминокислот два цикла, соединенные индолсульфоксидным мостиком. Другую группу циклопептидов – фаллотоксины – составляют фаллоидин, фаллоид, профаллоин, фаллизин, фаллицин, фаллацидин, фаллизацин (Wieland, Faulstich, 1979; Wieland, 1980; Faulstich, 1982; Liu, 2005; Ahmed et al., 2010). Аматоксины и фаллотоксины являются бициклическими окта- и гепта-пептидами, в структуры которых включена двухвалентная сера или сульфоксидная группа. Вывод серы из структур бициклических пептидов ведет к утрате токсичности соединений. Третья, наименее распространенная группа токсинов – виротоксины, включающая виридин, алловироидин, дезоксовироидин, (Ala)виридин, (Ala)дезоксовироидин, вироизин, дезоксовироизин, представлена моноциклическими пептидами. Их токсичность обусловлена присутствием в молекулах 2-метилсульфонилтриптофана или 2-метилсульфокситриптофана (Faulstich et al., 1979, 1980; Liu, 2005). Несмотря на структурную близость, характер токсичности аматоксинов и фаллотоксинов различен: аматоксины являются специфическими ингибиторами RNA полимеразы II, фаллотоксины связывают и стабилизируют F-актин, глобулярный белок полимеризованной формы, из которого образованы микрофиламенты цитоскелета эукариотических клеток (Luo et al., 2009). Наиболее токсичными являются аматоксины, их LD50 составляет 0.1 мг/кг. Токсичность фаллотоксинов составляет 2 мг/кг. Изучению характера токсического действия грибов, способам детоксикации отравлений, а также методам обнаружения циклических пептидов посвящена обширная научная и научно-популярная литература (Wieland, 1983; Hallen et al., 2002, 2007; Musselius, Ryk, 2002; Enjal-

bert et al., 2004; Liu, 2005; Zhang et al., 2010; Tanahashi et al., 2010; Kiyashko, 2015).

Смертельно ядовитые грибы, синтезирующие серосодержащие токсины, относятся к четырем родам макромицетов — *Amanita*, *Conocybe*, *Galerina* и *Lepiota*. Анализ опубликованных данных свидетельствует о том, что среди многочисленных представителей рода *Amanita* Pers., включающего до 1000 видов, циклические пептиды были обнаружены лишь у 14 видов: *Amanita bisporigera* (Enjalbert et al., 2002; Hallen et al., 2007; Luo et al., 2010; McKnight et al., 2010; Walton et al., 2010), *A. decipiens* (Enjalbert et al., 2002), *A. exitialis* (Zhang et al., 2005; Deng et al., 2011; Xue et al., 2011; Hu et al., 2012), *A. hygroskopica* (Johnson, Preston, 1979; Enjalbert et al., 2002), *A. fuliginea* (Zhou et al., 1997; Enjalbert et al., 2002), *A. marmorata* (Hallen et al., 2002), *A. oberwinklerana* (Chen et al., 2003; Yang, 2003), *A. ocreata* (Horgen et al., 1976; Enjalbert et al., 2002), *A. pallidorosea* (Wang et al., 2011), *A. phalloides* (Wieland, 1983, 1986; Ammirati et al., 1985; Bresinsky, Besl, 1990; Gurevich, Zhurkovich, 1995; Konno, 1995; De Haro, 1998; Enjalbert et al., 2002; Hallen et al., 2002, 2007; Liu, 2005; Zhang et al., 2005; Adams 2006; McKnight et al., 2010; Deng et al., 2011; Kaya et al., 2013), *A. suballiacea* (Little, Preston, 1984; Little et al., 1986), *A. tenuifolia* (Block et al., 1955), *A. verna* (Preston et al., 1975; Seeger, Stijve, 1979; Bresinsky, Besl, 1990; Enjalbert et al., 2002), *A. virosa* (Staron, Courtillot, 1975; Faulstich et al., 1979, 1980; Bresinsky, Besl, 1990; Enjalbert et al., 2002; Ahmed et al., 2010). Сравнительно недавно еще у одного из двух новых видов *Amanita* (*A. harkoneniana*), собранных в Африке, идентифицировали аманитины и фаллотоксины. Интересно отметить, что второй из описанных видов (*A. bweyeyensis*) по свидетельствам местного населения не являлся ядовитым, а в его плодовых телах не были обнаружены ни аматоксины, ни фаллотоксины. Однако молекулярный анализ образцов тех же самых плодовых тел показал наличие генов, кодирующих фаллотоксин фаллацидин (Fraiture et al., 2019).

Среди макромицетов рода *Lepiota*, включающего около 400 видов, 23 вида грибов считают ядовитыми, содержащими аманитотоксины: *Lepiota boudieri* (Gerault, Girre, 1975; Besl et al., 1984; Piqueras, 1989, 1992; Enjalbert et al., 2002), *L. brunneoincarnata*, *L. brunneolilacea*, *L. castanea*, *L. citrophylla* (Enjalbert et al., 2002), *L. clypeolaria* (Pond et al., 1986; Enjalbert et al., 2002), *L. clypeolarioides*, *L. felina*, *L. fuscovinacea*, *L. griseovirens*, *L. heimii*, *L. helveola*, *L. helveoloides*, *L. kuehneri*, *L. langei* (Enjalbert et al., 2002), *L. lilacea* (Klan, 1993; Enjalbert et al., 2002), *L. locanensis*, *L. ochraceofulva*, *L. pseudohelveola* (Enjalbert et al., 2002), *L. pseudolilacea* (Esteve-Ravantos, Altes, 1990; Enjalbert et al., 2002), *L. rufescens* (Klan, 1993; Enjalbert et al., 2002), *L. subincarnata* (Gerault, Girre, 1975, 1977; Enjalbert et al., 2002), *L. xanthophylla* (Besl et al., 1984; Enjalbert et al., 2002).

Среди свыше 150 представителей рода *Conocybe* токсины идентифицированы лишь у двух видов: *Conocybe apala* (Hallen et al., 2003; Arnolds, 2005; Luo et al., 2009; Walton et al., 2010) и *C. filaris* (Brady et al., 1975; Enjalbert et al., 2002; Arnolds, 2005).

Род *Galerina*, насчитывающий более 300 видов базидиомицетов, содержит семь видов, у которых идентифицирован аманитин: *Galerina badipes* (Jacobs et al., 1996; Enjalbert et al., 2002); *G. beinrothii* (Enjalbert et al., 2002), *G. fasciculata* (Muraoka et al., 1999; Muraoka, Shinozawa, 2000), *G. helvoliceps* (Muraoka et al., 1999; Enjalbert et al., 2002), *G. marginata* (Benedict et al., 1966; Benedict, Brady, 1967; Jacobs et al., 1996; Enjalbert et al., 2002; 2004; Hallen et al., 2003; Hallen-Adams et al., 2012), *G. sulciceps* (Xiang et al., 2018) и *G. venenata* (Besl, 1981; Besl et al., 1984; Enjalbert et al., 2002).

Интерес исследователей ядовитых макромицетов всегда был направлен как на изучение природы токсинов, так и на возможность культивирования этих грибов с целью изучения продуктов их метаболизма и процессов биосинтеза ядовитых веществ, а также получения самих токсинов для разработок тест-систем и противоядий. Однако большинство смертельно-ядовитых грибов являются эктомикоризными видами, выделение в культуру и последующее культивирование которых представляет определенные трудности. Виды рода *Amanita*, синтезирующие циклические пептиды, с трудом поддаются культивированию, так как даже в случае успешного получения чистой культуры растут очень медленно и продуцируют в культуре значительно меньше искомого продукта, чем природные плодовые тела. Попытки культивирования *Amanita phalloides* были предприняты китайскими исследователями, которые, потерпев неудачу с этим видом, впервые успешно культивировали другой вид аманит, продуцирующий аматоксины, — *A. exitialis*. Штамм выращивали на жидкой картофель-декстрозной среде в колбах в течение 50 дней. В результате было получено 5 г мицелия (сырой биомассы) на 100 мл среды. Этого количества оказалось достаточно для экстракции и количественного анализа токсинов. Оценивая скорость роста культивированного ими штамма как медленный и выход биомассы как низкий по отношению к видам сапротрофных грибов, но приемлемый для видов эктомикоризных грибов, авторы считают, что подбор условий культивирования, и, в частности, оптимизация компонентов питательной среды, может существенно повлиять на скорость роста, накопление биомассы и синтез искомого метаболита (Zhang et al., 2005).

В 2013 г. сотрудниками Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН было проведено целенаправленное исследование по выделению в культуру бледной поганки. В результате многочисленных попыток была получена чистая культура *A. phalloides* LE-BIN 4016 (MW036159). Штамм был

верифицирован методом ПЦР-анализа, а полученная нуклеотидная последовательность ITS участка депонирована в Генбанк NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>). Несмотря на медленный рост и избирательное требование к среде культивирования, штамм сохраняет жизнеспособность при регулярных пересевах и успешно сохраняется в Коллекции культур базидиомицетов БИН РАН с 2014 г.

Однако культивирование сапротрофных видов грибов, синтезирующих циклические пептиды, кажется более доступным, хотя публикаций по культивированию штаммов таких грибов немного. Наиболее перспективным в этом отношении представляется род *Galerina* (Benedict et al., 1966; Besl et al., 1984; Muraoka et al., 1999; Muraoka, Shinozawa, 2000). Авторами этих работ единодушно было показано, что при культивировании штаммы *Galerina* продуцировали внутриклеточные аманитины, при этом состав среды и условия культивирования существенным образом влияли и на накопление биомассы, и на биосинтез токсичных метаболитов. Одним из исследованных и перспективных в этой связи видов является *G. marginata*. Значительное штаммовое разнообразие этого вида (свыше 10 штаммов) сохраняется в Коллекции культур базидиомицетов БИН РАН. Штаммы были верифицированы с применением ПЦР анализа, и полученные ITS сиквенсы депонированы в Генбанк NCBI. В результате изучения ростовых и культурально-морфологических характеристик штаммов *G. marginata*, а также их культивирования на жидких средах, были отобраны штаммы LE-BIN 2545 (KY327297) и LE-BIN 2837 (KY327295) как наиболее перспективные для дальнейших исследований в качестве продуцентов циклических пептидов (Psurteva, Shakhova, 2015).

#### СЕРОСОДЕРЖАЩИЕ МЕТАБОЛИТЫ МАКРОМИЦЕТОВ С ЛЕКАРСТВЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ

В настоящее время высокие диетические достоинства ряда съедобных грибов связывают не только с их ароматом и пищевой ценностью, но и с присутствием биологически активных S-содержащих метаболитов (Eu et al., 2007). Разнообразие терпеноидов, полисахаридов, полифенолов определяет биологическую активность многих грибов. Среди всего спектра биологических эффектов грибов наибольший интерес в настоящее время вызывают антиоксидантные свойства (Kozarski et al., 2015; Ciric et al., 2020). Исследования показали, что антиоксидантная активность ряда видов грибов связана с присутствием таких известных низкомолекулярных S-содержащих метаболитов, как глутатион и эрготионеин (Kalaras et al., 2017). Глутатион – трипептид  $\gamma$ -глутамилцистеинилглицина, определяет окислительно-восстановитель-

ный клеточный баланс в организме. Эрготионеин – S-содержащее производное аминокислоты гистидина, был известен в различных микроорганизмах и несовершенных грибах (Paul, Snyder, 2010; Cheah, Halliwell, 2012; Nguyen et al., 2013). В ходе исследования макромицетов эрготионеин был обнаружен у следующих видов: *Agaricus bisporus*, *A. blazei*, *Armillaria mellea*, *Coprinus comatus*, *Cordyceps militaris*, *Cyclocybe cylindracea*, *Ganoderma lucidum*, *Grifola frondosa*, *Hericium erinaceus*, *Hypsizygus marmoreus*, *Pleurotus eryngii*, *Taiwanofungus camphoratus*, *T. salmoneus*, *Trametes versicolor*, *Tropicoporus linteus* (Chang et al., 2012; Cohen et al., 2014; Kalac 2016) и *Hygrophorus eburneus* (Kosanec et al., 2020). Было показано, что содержание эрготионеина у макромицетов значительно варьирует в зависимости от их видовой принадлежности (Dubost et al., 2007; Chang et al., 2012).

Биологическую активность эрготионеина в настоящее время связывают с его участием в процессах липидного окисления (Agrawal, Dhanasekaran 2019; Kosanic et al., 2020). Полагают, что эрготионеин может быть полезным для предотвращения заболеваний, вызванных различными стрессовыми факторами, в том числе при болезни Альцгеймера (Cheah, Halliwell, 2012; Cheah et al., 2016).

Помимо низкомолекулярных S-содержащих биологически активных метаболитов, высшие грибы продуцируют и высокополимерные соединения, содержащие серу. Впервые сведения о S-полисахаридах были получены при изучении плодовых тел съедобного гриба *Lentinula edodes* (Hobbs, 2000). Сравнительно недавно у двух видов лекарственных грибов *Taiwanofungus camphoratus* и *Wolfiporia extensa* были обнаружены новые S-содержащие активные полисахариды, различающиеся по величине массы и степени активности. Полисахарид из плодовых тел *Taiwanofungus camphoratus* был идентифицирован как сульфатированный 1,6-разветвленный 1,4- $\beta$ -D-галактогликан, (B86-III) (SPSs) с более высоким эффектом ингибирования образования эндотелиальных клеток (EC) в анализе ангиогенеза *in vitro* по сравнению с полисахаридами штамма 35396 и *Wolfiporia extensa* (*Poria cocos*). По мнению исследователей, иммуностимулирующая и противоопухолевая активность грибов может быть связана со способностью сульфатированных полисахаридов ингибировать ангиогенез как ингибированием NF- $\kappa$ B, так и индукцией транслокации NF- $\kappa$ B/Rel (Cheng et al., 2012; Lu et al., 2017). Уже известная ранее противовирусная активность сульфатированных полисахаридов недавно была подтверждена *in vitro* эффективным ингибированием SARS-CoV-2 (Kwon et al., 2020).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, присутствие S-содержащих вторичных метаболитов различной сложности — летучих сульфидов, циклических пептидов, сложных аминокислот и полисахаридов свидетельствует об активной роли серы в метаболизме высших грибов. Биологические эффекты этих соединений полностью еще не изучены. В то время как циклические пептиды ответственны за токсичность смертельно ядовитых грибов, органосульфиды, эрготионеин, глутатион и серосодержащие полисахариды определяют как аромат, вкусовые и диетические достоинства, так и биологическую активность многих видов съедобных и лекарственных макромицетов.

Авторы выражают благодарность И.В. Змитровичу и С.П. Вассеру за ценные замечания, дополнения и помощь в редактировании рукописи статьи. Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН, регистрационный номер темы АААА-А19-119020890079-6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Adams R.I., Hallen H.E., Pringle A.* Primer Note: Using the incomplete genome of the ectomycorrhizal fungus *Amanita bisporigera* to identify molecular polymorphisms in the related *Amanita phalloides* // *Molecular Ecology Notes*. 2006. V. 6. P. 218–220.
- Agrawal D.C., Dhanasekaran M.* Medicinal mushrooms: recent progress in research and development. In: *L-Ergothioneine — a potential bioactive compound from edible mushrooms*. Springer, Singapore, 2019. P. 391–408.
- Ahmed W.H., Gonmori K., Suzuki M. et al.* Simultaneous analysis of  $\alpha$ -amanitin,  $\beta$ -amanitin, and phalloidin in toxic mushrooms by liquid chromatography coupled to time-of-flight mass spectrometry. *Forensic Toxicology*. 2010. V. 28. P. 69–76.
- Al-Fatimi M., Jansen R., Wolf-Dieter J. et al.* Bioactive components of the traditionally used mushroom *Podaxis pistillaris*. *eCAM*. 2006. V. 3. № 1. P. 87–92.
- Al-Fatimi M., Jansen R., Wolf-Dieter J. et al.* Phytochemical and biological investigations of the Yemeni Mushroom *Podaxis pistillaris*. 6th Europ. Colloquium on Ethnopharmacology. Leipzig. 2007.
- Ammirati J.F., Traquair J.A., Horgen P.A.* Poisonous mushrooms of Canada including other inedible fungi. Fitzhenry and Whiteside, Markham, 1985.
- Arnolds E.* *Conocybe* Fay. In: *M.E. Noordeloos, T.W. Kuyper and E.C. Vellinga* (eds.). *Flora Agaricina Neerlandica*. 2005. V. 6. P. 120–179.
- Belova N.V.* Sulfur-containing compounds in the fruit bodies of macromycetes. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2011. V. 15. № 3. P. 201–208 (in Russ.).
- Belova N.V., Sazanova K.V., Shavarda A.L.* Metabolic analysis of mycelium and fruiting bodies of *Mycetinis alliaceus* (Jacq.) Earle ex A.W. Wilson et Desjardin. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2015. V. 49. № 5. P. 305–312 (in Russ.).
- Belova N.V., Zmitrovich I.V.* Organopolysulfides of macromycetes: chemistry, ecological role and biological activity. *Modern mycology in Russia*. 2020. V. 8. Proceedings of the 4th International Mycological Forum. Moscow, 2020. (in Russ.).
- Benedict R.G., Brady L.R.* Further studies on fermentative production of toxic cyclopeptides by *Galerina marginata* (Fr.) Kuhn. *Lloydia*. 1967. V. 30. P. 372–378.
- Benedict R.G., Tyler V.E., Bredy L.R. et al.* Fermentative production of *Amanita* toxins by strain of *Galerina marginata*. *J. Bacteriol.* 1966. V. 91. № 3. P. 1380–1381.
- Besl H.* Amatoxins in greenhouses, *Galerina sulciceps*, a tropical toxic mushroom. *Zeitschr. Mykologie*. 1981. V. 47. № 2. P. 253–256.
- Besl H., Mack P., Schmied-Heckel I.* Gitipilze in den Gattungen *Galerina* und *Lepiota*. *Zeitschr. Mykologie*. 1984. V. 50. P. 183–189.
- Block S.S., Stephens R.I., Barreto A. et al.* Chemical identification of the *Amanita* toxins in mushrooms // *Science*. 1955. V. 121. P. 505–506.
- Borgkarlson A.K., Englund F.O., Unelius C.R.* Dimethyl oligosulphides, major volatiles released from *Sauromatum guttatum* and *Phallus impudicus*. *Phytochemistry*. 1994. V. 35. № 2. P. 321–323.
- Brady L.R., Benedict R.G., Tyler D.E. et al.* Identification of *Conocybe filaris* as a toxic basidiomycete. *Lloydia*. 1975. V. 38. P. 172–173.
- Bresinsky A., Besl H.* A colour atlas of poisonous fungi. Wolfe Publishing Ltd., 1990.
- Chang Y.L., Lin S.Y., Ulzijiargal E. et al.* Comparative study of contents of several bioactive components in fruiting bodies and mycelia of culinary-medicinal mushrooms. *Int. J. Medicinal Mushrooms*. 2012. V. 14. № 4. P. 357–363.
- Cheah I.K., Feng L., Tang R.M.Y. et al.* Ergothioneine levels in an elderly population decrease with age and incidence of cognitive decline; a risk factor for neurodegeneration? *Biochem. Biophysical Res. Communications*. 2016. V. 478. № 1. P. 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.07.074>
- Cheah L.K., Halliwell B.* Ergothioneine; antioxidant potential, physiological function and role in disease. *Biochimica et Biophysica Acta*. 2012. № 5. P. 784–793.
- Chen Z.H., Hu J.S., Zhang Z.G. et al.* Determination and analysis of the main amatoxins and phallotoxins in 28 species of *Amanita* from China. *Mycosystema*. 2003. V. 22. P. 565–573.
- Cheng J.-J., Chang C.-C., Chao C.-H.* Characterization of fungal sulfated polysaccharides and their synergistic anticancer effects with doxorubicin. *Carbohydrate Polymers*. 2012. V. 90. № 1. P. 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.005>
- Cho I.H., Namgung H.J., Choi H.K. et al.* Volatiles and key odorants in the pileus and stipe of pine-mushroom (*Tricholoma matsutake* Sing.). *Food Chemistry*. 2008. V. 106. № 1. P. 71–76.
- Ciric M.Z., Dabetic N., Todorovic V.* Beta-glucan content and antioxidant activities of mushroom-derived food supplements. *J. Serbian Chemical Society*. 2020. V. 85. № 4. P. 439–451.
- Cohen N., Cohen J, Asatiani M.D. et al.* Chemical composition and nutritional and medicinal value of fruit bodies and submerged cultured mycelia of culinary-medicinal

- Higher Basidiomycetes mushrooms. *Int. J. Medicinal Mushrooms* 2014. V. 16. № 3. P. 273–291.
- De Haro L., Jouglard J., Arditti J. et al. Acute renal insufficiency caused by *Amanita proxima* poisoning: Experience of the Poison Center of Marseille. *Nephrologie*. 1998. V. 19. № 1. P. 21–24.
- Deng W.Q., Li T.H., Xi P.G. et al. Peptide toxin components of *Amanita exitialis* basidiocarps. *Mycologia*. 2011. V. 103. № 5. P. 946–949.  
<https://doi.org/10.3852/10-319>
- Dubost N.J., Ou B., Beelman R.B. Quantification of polyphenols and ergothioneine in cultivated mushrooms and correlation to total antioxidant capacity. *Food Chemistry*. 2007. V. 105. P. 727–735.
- El Enshasy H., Elsayed E.A., Aziz R. et al. Mushrooms and truffles: historical biofactories for complementary medicine in Africa and in the Middle East. *Evid Based Complement Alternat Med*. 2013.  
<https://doi.org/10.1155/2013/620451>
- Enjalbert F., Cassanas G., Rapior S. et al. Amatoxins in wood-rotting *Galerina marginata*. *Mycologia*. 2004. V. 96. № 4. P. 720–729.
- Enjalbert F., Rapior S., Nouguier-Soule J. et al. Treatment of amatoxin poisoning: 20-year retrospective analysis. *Clinical Toxicology*. 2002. V. 40. № 6. P. 715–757.
- Esteve-Ravantos F., Altes A. Tres interesantes *Lepiotas* toxicas en la Provincia de Madrid. *Bol. Soc. Micologica de Madrid*. 1990. V. 14. P. 161–168.
- Ey J., Schömig E., Taubert D.J. Dietary sources and antioxidant effects of ergothioneine. *Agrical Food Chemistry*. 2007. V. 55. № 16. P. 6466–6474.  
<https://doi.org/10.1021/jf071328f>
- Faulstich H., Buku A., Bodenmuller H. et al. New toxic cyclopeptides from *Amanita virosa* mushroom. *Struct. Act. Nat. Pept. Proc. Fall Meet. Ges. Boil. Chem*. 1979. P. 189–199.
- Faulstich H., Buku A., Bodenmuller H. et al. Virotaxins: actin binding cyclic peptides of *Amanita virosa* mushrooms. *Biochemistry*. 1980. V. 19. P. 3334–3343.
- Fraiture A., Amalfi M., Raspé O. et al. Two new species of *Amanita* sect. *Phalloideae* from Africa, one of which is devoid of amatoxins and phallotoxins. *MycKeys*. 2019. V. 53. P. 93–125.  
<https://doi.org/10.3897/mycokeys.53.34560>
- Frankel F., Priven M., Richard E. et al. Health functionality of organosulfides: a review. *Int. J. Food Properties*. 2016. V. 19. № 3. P. 537–548.
- Gerault A., Girre L. Miss au Point sur les intoxications par les champignons superieurs. *Bull. Soc. Mycol. France*. 1977. V. 93. № 3. P. 373–404.
- Gerault A., Girre L. Recherches toxicologique sur le genre *Lepiota* Fries. *Comptes Rendus de l'Académie Sci. Paris*. 1975. V. 280. № 25. P. 2841–2843.
- Gioacchini A.M., Menotta M., Guescini M. et al. Geographical traceability of Italian white truffle (*Tuber magnatum* Pico) by the analysis of volatile organic compounds. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2008. V. 22. P. 3147–3153.
- Gurevich L.S., Zhurkovich I.K. Toxins of some species of the genus *Amanita* Pers. *Mikologiya i fitopatologiya*. 1995. V. 29. № 1. P. 41–50 (in Russ.).
- Hallen H.E., Adams G.C., Eicker A. Amatoxins and phallotoxins in indigenous and introduced South African *Amanita* species. *Southern African J. Botany*. 2002. V. 68. P. 322–326.
- Hallen H.E., Luo H., Scott-Craig J.S. et al. Gene family encoding the toxins of lethal *Amanita* mushrooms. *PNAS USA*. 2007. V. 104. № 48. P. 19097–19101.
- Hallen H.E., Watling R., Adams G.C. Taxonomy and toxicity of *Conocybe lactea* and related species. *Mycol. Res*. 2003. V. 107. P. 969–979.
- Hallen-Adams H.E., Scott-Craig J.S., Walton J.D. et al. Use of *Galerina marginata* genes and proteins for peptide production. US patent № 20120276588, 2012.
- Hobbs C.R. Medicinal value of *Lentinus edodes* (Berk.) Sing. (*Agaricomycetidae*). A literature review. *Int. J. Medicinal Mushrooms*. 2000. V. 2. № 2. P. 287–302.
- Horgen P.A., Ammirati J.F., Their H.D. Occurrence of amatoxins in *Amanita ocreata*. *Lloydia*. 1976. V. 39. P. 368–371.
- Hu J., Zhang P., Zeng J. Determination of amatoxins in different tissues and development stages of *Amanita exitialis*. *J. Science Food Agric*. 2012. V. 92. P. 2664–2667.
- Jacobs J., Von Behren J., Kreuzer R. Serious mushroom poisonings in California Requiring Hospital Admission, 1990–1994. *West Indian Medical J*. 1996. V. 165. P. 283–288.
- Johnson B.C., Preston J.F. Unique amanitin resistance of RNA synthesis in isolated nuclei from *Amanita* species accumulating amanitins. *Archives of Microbiology*. 1979. V. 122. P. 163–167.
- Kakumyan P., Matsui K. Characterization of volatile compounds in *Astraeus* spp. *Biosci. Biotechnol. Bioshem*. 2009. V. 73. № 12. P. 2742–2745.
- Kalac P. Edible mushrooms. Chemical composition and nutritional value. Elsevier, 2016
- Kalaras M.D., Richie J.P., Calcagnotto A. et al. Mushrooms: A rich source of the antioxidants ergothioneine and glutathione. *Food Chemistry*. 2017. V. 15. № 233. P. 429–433.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.109>
- Kaya E., Karahan S., Bayram R. et al. Amatoxin and phalloxin concentration in *Amanita phalloides* spores and tissues. *Toxicology and Industrial Health*. 2013. P. 1–6.
- Kimura H. Antioxid redox signal. Production and physiological effects of hydrogen sulfide. 2014. V. 20. № 5. P. 783–793.  
<https://doi.org/10.1089/ars.2013.5309>
- Kimura H., Shibuya N., Kimura Y. Hydrogen sulfide is a signaling molecule and a cytoprotectant. *Antioxidants and redox signaling*. 2012. V. 17. № 1. P. 45–57.  
<https://doi.org/10.1089/ars.2011.4345>
- Kiss M., Csóka M., Györfi J. et al. Comparison of the fragrance constituents of *Tuber aestivum* and *Tuber brumale* gathered in Hungary. *J. Applied Botany and Food Quality*. 2011. V. 84. P. 102–110.
- Kiyashko A.A. The word concerning toadstools. *Planeta Gribov. St. Petersburg Mycological Society*. 2015. V. 1. № 7. C. 27–42 (in Russ.).
- Klan J. Prehleb hub obsahujících amanitiny a faloidiny (the survey of fungi containing amanitins and phalloidins). *Cas Lek Cesk*. 1993. V. 132. № 15. P. 449–451.

- Konno K. Biologically active components of poisonous mushrooms. *Food Reviews Int.* 1995. V. 11. № 1. P. 83–107.
- Kosanic M.M., Šeklic D.S., Jovanovic M.M. *Hygrophorus eburneus*, edible mushroom, a promising natural bioactive agent. *EXCLI Journal.* 2020. V. 31. № 19. P. 442–457.  
<https://doi.org/10.17179/excli2019-2056>
- Kozarski M., Klaus A., Jakovljevic D. Antioxidants of edible mushrooms. *Molecules.* 2015. V. 20. № 10. P. 19489–19525.  
<https://doi.org/10.3390/molecules201019489>
- Kuo M. *Mycetinis scorodoni*. Retrieved from the MushroomExpert.Com Web site. 2013, January.  
[http://www.mushroomexpert.com/mycetinis\\_scorodoni.html](http://www.mushroomexpert.com/mycetinis_scorodoni.html)
- Kwon P.S., Oh H., Kwon S.-J. et al. Sulfated polysaccharides effectively inhibit SARS-CoV-2 invitro. *Cell Discovery.* 2020. V. 6. N. 50.  
<https://doi.org/10.1038/s41421-020-00192-8>
- Little M.C., Preston J.F., Jackson C. Alloviroidin, the naturally occurring toxic isomer of the cyclopeptide viroidin. *Biochemistry.* 1986. V. 25. P. 2867–2872.
- Little V.C., Preston J.F. The fluorimetric detection of amatoxins, phallotoxins and other peptides in *Amanita suballiacea*. *J. Natural Products.* 1984. V. 47. P. 93–99.
- Liu J.K. N-Containing compounds of macromycetes. *Chemical Reviews.* 2005. V. 105. № 7. P. 2723–2744.
- Lu M.K., Lin T.Y., Chao C.H. et al. Molecular mechanism of *Antrodia cinnamomea* sulfated polysaccharide on the suppression of lung cancer cell growth and migration via induction of transforming growth factor  $\beta$  receptor degradation. *J. Biological Macromolecules.* 2017. V. 95. P. 1144–1152.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2016.11.004>
- Luo H., Hallen-Adams H.E., Scott-Craig J.S. et al. Colocalization of amanitin and a candidate toxin-processing prolyl oligopeptidase in *Amanita basidiocarps*. *Eukaryotic Cell.* 2010. P. 1891–1900.
- Luo H., Hallen-Adams H.E., Walton J.D. Processing of the phalloidin proprotein by prolyl oligopeptidase from the mushroom *Conocybe albipes*. *J. Biological Chemistry.* 2009. V. 284. № 27. P. 18070–18077.
- McKnight T.A., McKnight K.B., Skeels M.C. Amatoxin and phallotoxin concentration in *Amanita bisporigera* spores. *Mycologia.* 2010. V. 102. № 4. P. 763–765.
- Moliszewska E. Mushroom flavor. *Folia Biologica et Oecologica.* 2014. № 10. P. 80–88.
- Morath S.U., Hung R., Bennet J.W. Fungal volatile organic compounds: A review with emphasis on their biotechnological potential. *Fungal Biology Reviews.* 2012. V. 26. № 73. P. 355–383.
- Muraoka S., Fukamachi N., Mizumoto K. et al. Detection and identification of amanitins in the wood-rotting fungi *Galerina fasciculata* and *Galerina helvoliceps*. *Appl. Environmental Microbiology.* 1999. V. 65. № 9. P. 4207–4210.
- Muraoka S., Shinozawa T. Effective production of amanitins by two-step cultivation of the basidiomycete, *Galerina fasciculata* GF-060. *J. Bioscience and Bioengineering.* 2000. V. 89. № 1. P. 73–76.
- Musselius S.G., Ryk A.A. Mushroom poisoning. Moscow, 2002 (in Russ.).
- Nguyen H., Nagasaka R., Ohshima T. Lipid oxidation challenges in food systems. The natural antioxidant ergothioneine: resources, chemical characterization, and applications. 2013. P. 381–415.
- Palazzolo E., Saiano F., Laudicina V.A. et al. Volatile organic compounds in wild fungi from Mediterranean forest ecosystems. *J. Essential Oil Research.* 2017. V. 29. P. 385–390.
- Paul B.D., Snyder S.H. The unusual amino acid L-ergothioneine is a physiologic cytoprotectant. Cell death and differentiation. 2010. V. 17. № 7 P. 1134–1140.  
<https://doi.org/10.1038/cdd.2009.163>
- Piqueras J. Hepatotoxic mushroom poisoning: diagnosis and management. *Mycopathologia.* 1989. V. 105. P. 99–110.
- Piqueras J. Terapeutica de la intoxicacion par *Amanita phalloides*. *Atencion Farmaceutica: European Journal.* 1992. V. 9. № 3. P. 221–228.
- Pond S.M., Olson K.R., Woo O.F. et al. Amatoxin poisoning in Northern California. 1982–1983. *West Indian Medical J.* 1986. V. 145. № 2. P. 204–209.
- Preston J.F., Stark H.J., Kimbrough J.W. Quantitation of amatoxins in *Amanita verna* with calf thymus RNA polymerase B. *Lloydia.* 1975. V. 38. P. 153–161.
- Psurtsseva N.V., Shakhova N.V. Growth and morphological features of *Galerina marginata* (Batsch) Kühner strains producing cyclic peptides under surface and submerged cultivation. *Modern mycology in Russia.* 2015. V. 5. № 6, pp. 345–347 (in Russ.).
- Pudil F., Uvira R., Janda V. Volatile compounds in stinkhorn (*Phallus impudicus* L. ex Pers.) at different stages of growth. *European Scientific Journal.* 2014. V. 10. P. 1857–1881.
- Rapier S., Breheret S., Talou T. et al. Volatile flavour constituents of fresh *Marasmius alliaceus* (Garlic Marasmius). *J. Agricultural and Food Chemistry.* 1997. V. 45. P. 820–825.
- Seeger R., Stijve T. Amanitin content and toxicity of *Amanita verna*. *Bull. Zeitschr. Naturforschung. C.* 1979. V. 34. № 5–6. P. 330–333.
- Shimokawa T., Kinoshita A., Kusumoto N. Component feature, odor-active volatiles, and acute oral toxicity of novel white-colored truffle *Tuber japonicum* native to Japan. *Food Science Nutrition.* 2019. P. 1–9.
- Sneeden E.Y., Harris H.H., Pickering I.J. et al. The sulfur chemistry of Shiitake mushroom. *J. American Chemical Society.* 2004. V. 126. P. 458–459.
- Splivallo R., Ottonello S., Mello A. et al. Truffle volatiles: from chemical ecology to aroma biosynthesis. *New Phytologist.* 2011. V. 189. № 3. P. 688–699.  
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03523.x>
- Staron T., Courtillot M. Quelques donnees nouvelles sur les toxins d'*Amanita virosa* et d'*A. phalloides*. *Bull. Soc. Mycol. France.* 1975. V. 91. P. 556–559.
- Tanahashi M., Kaneko R., Hirata Y. et al. Simple analysis of  $\alpha$ -amanitin and  $\beta$ -amanitin in human plasma by liquid chromatography-mass spectrometry. *Forensic Toxicology.* 2010. V. 28. № 2. P. 1–5.
- Tozmo R., Liang D., Lin Y. et al. Chemical and biochemical mechanisms underlying the cardioprotective roles of

- dietary organopolysulfides. *Frontiers in Nutrition*. 2015. V. 2. P. 1–18.
- Torregiani E., Lorier S., Sagratini G. et al. Comparative analysis of the volatile profile of 20 commercial samples of truffles, truffle sauces, and truffle-flavored oils by using HS-SPME-GC-MS. *Food Analytical Methods*. 2017. V. 10. P. 1857–1869. <https://doi.org/>  
<https://doi.org/10.1007/s12161-016-0749-2>
- Walton J.D., Hallen-Adams H.E., Luo H. Ribosomal biosynthesis of the cyclic peptide toxins of *Amanita* mushrooms. *Peptide Science*. 2010. V. 94. № 5. P. 659–664.
- Wang Y., Bao H., Xu L. et al. Determination of main peptide toxins from *Amanita pallidorosea* with HPLC and their antifungal action on *Blastomyces albicans*. *Acta Microbiologica Sinica*. 2011. V. 51. № 9. P. 1205–1211.
- Wieland T. Peptides of poisonous *Amanita* mushrooms. Springer, Berlin, 1986.
- Wieland T. The chemistry of *Amanita* toxins. Amanitoxins: Structure and RNA polymerase B inhibition, in: Faulstich, Kommerell, Wieland. 1980. P. 22–32.
- Wieland T. The toxic peptides from *Amanita* mushrooms. *Int. J. Peptide and Protein Research*. 1983. V. 22. P. 257–276.
- Wieland T., Faulstich H. Amatoxins, phallotoxins, phallolysin and antamanide: the biologically active components of poisonous *Amanita* mushrooms. *CRC Crit. Rev. Biochem.* 1978. V. 5. № 3. P. 185–260.
- Wu C.M., Wang Z. Volatile compounds in fresh and processed shiitake mushrooms (*Lentinus edodes* Sing.). *Food Science and Technology Research*. 2000. V. 6. № 3. P. 166–170.
- Xiang H., Zhou Y., Zhou C. et al. Investigation and analysis of *Galerina sulciiceps* poisoning in a canteen. *Journal Clinical Toxicology*. 2018. V. 56. № 5. <https://doi.org/10.1080/15563650.2017.1388386>
- Xue J.H., Wu P., Chi Yu.L. et al. Cyclopeptides from *Amanita exitialis*. *Notes Products Bioprospect*. 2011. № 1. P. 53–56.
- Yang Y.-B., Hu J.-S., Chen Z.-H. et al. Amatoxins from *Amanita fuliginea*. *Natural Product Research and Development*. 2003. V. 5.
- Zhang P., Chen Z.-H., Hu J.-S. et al. Production and characterization of amanitin toxins from a pure culture of *Amanita exitialis*. *FEMS Microbiology Letters*. 2005. V. 252. P. 223–228.
- Zhang P., Chen Z.-H., Xiao B. et al. Lethal amanitas of East Asia characterized by morphological and molecular data. *Fungal Diversity*. 2010. V. 42. P. 119–133.
- Zhong J.-J., Xiao J.-H. Secondary metabolites from higher fungi: discovery, bioactivity, and bioproduction, *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*. 2009. V. 113. P. 79–150. [https://doi.org/10.1007/10\\_2008\\_26](https://doi.org/10.1007/10_2008_26)
- Zhou Z.Z., Li S., Li C. et al. Studies on *Amanita fuliginea* and its toxicity. *Acta Scientiarum Naturalium Universtis Normalis Hunanensis. J. Nat. Sci. Hunan Normal University*. 1997.
- Белова Н.В. (Belova) Серосодержащие соединения в плодовых телах макромицетов // Микология и фитопатология. 2011. Т. 15. № 3. С. 201–208.
- Белова Н.В., Змитрович И.В. (Belova, Zmitrovich) Органополисульфиды макромицетов: химия, экологическая роль и биологическая активность // Современная микология в России. 2020. Т. 8. Материалы 4-го Международного микологического форума. М.: Национальная академия микологии, 2020. 460 с.
- Белова Н.В., Сазанова К.В., Шаварда А.Л. (Belova et al.) Метаболомный анализ мицелия и плодовых тел *Mycetinis alliaceus* (Jacq.) Earle ex A.W. Wilson et Desjardin // Микология и фитопатология. 2015. Т. 49. № 5. С. 305–312.
- Гуревич Л.С., Журкович И.К. (Gurevich, Zhurkovich) Токсины некоторых видов рода *Amanita* Pers. // Микология и фитопатология. 1995. Т. 29. № 1. С. 41–50.
- Кияшко А.А. (Kiyashko) Слово о поганках // Планета грибов. Научно-популярный журнал Санкт-Петербургского микологического общества. 2015. Т. 1. № 7. С. 27–42.
- Мусселиус С.Г., Рык А.А. (Musselius, Ryk) Отравления грибами. М., 2002. 324 с.
- Псурцева Н.В., Шахова Н.В. (Psurtseva, Shakhova) Ростовые и морфологические особенности штаммов *Galerina marginata* (Batsch) Kühner, продуцирующих циклические пептиды, в условиях поверхностного и глубинного культивирования // Современная микология в России. 2015. Т. 5. С. 345–347.

## Sulfur-Containing Aromatic Compounds, Toxins and Pharmacologically Active Metabolites of Macromycetes

N. V. Belova<sup>a,#</sup> and N. V. Psurtseva<sup>a,##</sup>

<sup>a</sup> Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup> e-mail: cultures@mail.ru

<sup>##</sup> e-mail: nadyapsu@mail.ru

The paper deals with S-containing compounds involved in the creation of odor, toxic properties and medical value of macromycetes. Data on the chemical structure and biological activity of organosulfides, cyclic peptides, ergothioneine and S-containing polysaccharides are analyzed. Macromycete species containing sulfides, toxins and ergothioneine are presented.

**Keywords:** biological activity, cyclic peptides, ergothioneine, macromycetes, odors, organosulfides, S-polysaccharides, toxins