

НОВЫЕ НАХОДКИ И МОРФОЛОГИЯ *CHRYSOCOCCUS FURCATUS* (CHRYSOPHYCEAE, CHROMULINALES) В ВОДОЕМАХ ЮЖНОГО УРАЛА

© 2024 г. Л. В. Снитко¹, *, В. П. Снитко¹

¹Южно-Уральский ФНЦ Минералогии и Геоэкологии УрО РАН
Терр. Ильменский заповедник, 1, Миасс, Челябинская обл., 456317, Россия

*e-mail: lvs223@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.03.2023 г.
Получена после доработки 23.02.2024 г.
Принята к публикации 19.03.2024 г.

Представлены данные о находках вегетативных клеток и стоматоцист *Chrysococcus furcatus*, полученные с применением сканирующей электронной микроскопии. Вид впервые указывается для Урала. Изучены экологические условия вегетации клеток и массового формирования стоматоцист в природных водоемах, показано увеличение содержания кремния в зрелых стоматоцистах методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. В южноуральской популяции отмечены морфотипы стоматоцист с высоким обратноконическим воротничком, орнаментацией коническими выростами, бифуркатным или одним игольчатым шипом. Обнаружена новая форма со множественными иглообразными шипами, расположенными на заднем полюсе стоматоцисты. Описания иллюстрированы микрофотографиями. Полученные результаты дополняют сведения о флоре водорослей России и могут быть использованы в экологическом мониторинге водоемов и палеореконструкциях.

Ключевые слова: золотистые водоросли, стоматоцисты, *Chrysococcus furcatus*, морфология, экология, национальный парк “Таганай”, Южный Урал

DOI: 10.31857/S0006813624050078, EDN: QJPCAI

Хризифитовые — одноклеточные или колониальные водоросли, характеризующиеся способностью формировать эндогенные кремнистые стоматоцисты (статоспоры) в определенные стадии своего развития или под воздействием изменений окружающей среды (Duff et al., 1995). Морфология стоматоцист видоспецифична, но большинство из них не соотнесено с конкретными видами. Определить видовую принадлежность стоматоцист возможно в случае наблюдения их формирования в природных водоемах или при культивировании (Škaloud et al., 2012; Škaloud et al., 2013). В настоящее время описано более 1000 морфотипов стоматоцист, указанных под соответствующими номерами в атласах-определителях (Duff et al., 1995; Wilkinson et al., 2001; Pla, 2001; Kapustin, Kapustina, 2018) и в отдельных публикациях (Vorobyova et al., 1996; Firsova, Likhoshway, 2006; Bazhenova et al., 2012; Bazhenova, 2021; Safronova, Voloshko, 2013; Voloshko, 2016; Firsova et al., 2017, 2018; Safronova, 2015; Kapustin et al., 2016; Snit'ko, Voloshko, 2017, 2018).

Некоторые хризифиты производят стоматоцисты с очень специфичным внешним видом, например, *Chrysococcus furcatus* (Dolgoﬀ) Nicholls, 1981 (Duff et al., 1995; Kapustin, Kapustina, 2018), благодаря чему становится возможной правильная идентификация вида на основе морфологии. Стоматоциста *C. furcatus* первоначально была описана в группе эвгленовых водорослей как *Trachelomonas furcata* Dolgoﬀ (Dolgoﬀ, 1922), а впоследствии перенесена в состав золотистых водорослей в род *Chrysastrella* Chodat под названием *Chrysastrella furcata* (Dolgoﬀ) Deflandre, 1934 (Deflandre, 1934; Cronberg, Kristiansen, 1980; Duff et al., 1995). Вегетативная стадия *Chrysococcus furcatus* описана в 1981 г. (Nicholls, 1981), но впоследствии такая же окремнелая клетка описывалась из донных отложений в Арктике как “стоматоциста 17” Duff, Smol (Duff, Smol, 1988). Стоматоцисты *C. furcatus* отмечались в Северной Америке, Гренландии, Европе, а вегетативные клетки зарегистрированы в Канаде (Nicholls, 1981; Duff et al., 1995). В России стоматоцисты обнаружены в Центре, на

Севере и Северо-Западе (Dolgoft, 1922; Usatshev, 1928; Woronichin, 1933; Kapustin, Kapustina, 2018), в Сибири в Байкальском регионе в р. Верхняя Ангара (Firsova et al., 2018).

В ходе многолетних исследований золотистых водорослей в планктоне водоемов Южного Урала и Зауралья нами обнаружены вегетативные клетки и стоматоцисты *Chrysococcus furcatus*, что является первой для Урала находкой вида.

Цель данной работы — документально зафиксировать новые находки редкого вида *C. furcatus* в России и проанализировать морфологическую изменчивость стоматоцист.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Пробы отбирали круглогодично планктонной сетью с ячейей 14 мкм в диаметре в 2015–2022 гг. в небольших озерах, водохранилищах и реках Южного Урала, наибольшее внимание уделяли холодноводным периодам. Всего обследовано свыше 40 водоемов. Стоматоцисты *Chrysococcus furcatus* обнаружены только в трех горно-лесных водоемах: Тесьминское водохранилище с мая по июнь 2020 г. (в большом количестве), дериваты оз. Тургойак (оз. Инышко и пруд городского пляжа) — в мае 2022 г. Вегетативные клетки вида *C. furcatus* обнаружены единично в Тесьминском водохранилище в мае 2020 г. Эти водоемы расположены в горной местности

близ границ водоразделов крупнейших речных бассейнов Обского и Волго-Камского, водосборы частично или полностью находятся на территории национального парка “Таганай”. Географические характеристики водоемов приведены в табл. 1, основные гидрохимические показатели — в табл. 2. В периоды формирования стоматоцист *C. furcatus* отбор проб проводили еженедельно одновременно с измерением температуры воды, описанием сообществ фитопланктона и видового состава золотистых водорослей (табл. 3).

Исследование вегетативных клеток и стоматоцист *C. furcatus* проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega 3Sbu при увеличении в $(2–20) \times 10^3$ раз. Для изучения объектов в СЭМ аликвоту сгущенного планктона наносили на токопроводящий скотч на алюминиевом диске и высушивали, напыление золотом производили с помощью ионно-плазменного напылителя Quorum Q150R ES. Энергодисперсионные спектрограммы (ЭДС) для анализа элементного состава оболочки клеток и стоматоцист выполняли с помощью рентгеноспектрального микроанализатора Oxford Instruments X-act.

Измерение гидрохимических характеристик, СЭМ и ЭДС выполнены на базе Южно-Уральского центра коллективного пользования по исследованию минерального сырья (аттестат аккредитации № РОСС RU.001.514536).

Таблица 1. Значения некоторых физико-географических показателей водоемов — местообитаний *Chrysococcus furcatus* на Южном Урале

Table 1. Values of some physiographical parameters in the waterbodies — habitats of *Chrysococcus furcatus* in Southern Ural

Озера, водохранилища, пруды Lakes, reservoirs, ponds		Площадь, км ² Area, km ²	Глубина, м Depth mid./max, m	Высота над уровнем моря, м Altitude, m a. s. l.	Координаты Coordinates	
					N	E
Водоемы горно-лесной зоны Волго-Камского бассейна Waterbodies of mountain-forest zone of the Volga-Kama basin						
Тесьминское вдхр. Tesminskoye Reservoir		0.48	Уровень воды упал на 4 м 2021 г. Water level fell down 4 m in 2021 2/10	469	55°12'56.3"	59°45'53.4"
Водоемы горно-лесной зоны Обского речного бассейна Waterbodies of mountain-forest zone of the Ob River basin						
Дериваты оз. Тургойак Derivatives of Turgoyak Lake	Пруд городского пляжа Pond of city beach	0.01	1/1.2	320	55°09'12.5"	60°06'58.2"
	Озеро Инышка Inyshka Lake	0.32	2/4.0	331	55°11'21.5"	60°05'30.0"

Таблица 2. Гидрохимические показатели водоемов местообитаний *Chrysococcus furcatus* на Южном Урале
Table 2. Hydrochemical parameters of the waterbodies – habitats of *Chrysococcus furcatus* in Southern Ural

Гидрохимические параметры / Водоемы Hydrochemical parameters / Waterbodies	Дериваты оз. Тургойак Derivatives of Turgoyak Lake		Тесьминское вдхр. Tesminskoye Reservoir
	Пруд городского пляжа Pond of city beach	Озеро Инышко Inyshko Lake	
Гидрокарбонаты Bicarbonates, mg/dm ⁻³	111.02	89.7 ± 10.8	37.8 ± 4.8
Сульфаты Sulfates, mg/dm ⁻³	16.30	7.7 ± 1.0	8.23 ± 2.5
Кальций Calcium, mg/dm ⁻³	25.05	19.6 ± 2.2	12.0 ± 1.3
Магний Magnesium, mg/dm ⁻³	12.80	8.84 ± 1.33	2.43 ± 0.36
Натрий+калий Sodium+Potassium, mg/dm ⁻³	9.15	9.70 ± 0.68	2.67 ± 0.3
Азот нитратный Nitrate nitrogen, mg/dm ⁻³	0.30	0.0053 ± 0.0026	0.006 ± 0.003
Азот нитритный Nitrite nitrogen, mg/dm ⁻³	<0.003	0.27 ± 0.05	0.69 ± 0.14
Азот аммонийный Ammonium nitrogen, mg/dm ⁻³	0.16	<0.1	0.14 ± 0.04
Хлориды Chlorides, mg/dm ⁻³	10.06	4.43 ± 0.45	1.83 ± 0.29
Сумма ионов, Σ, mg/dm ⁻³	194.84	140.24 ± 17.15	65.79 ± 9.73
Фосфор общий Total phosphorus, mg/dm ⁻³	0.134	0.084 ± 0.042	0.010 ± 0.04
рН	7.2 ± 0.2	7.5 ± 0.2	7.5 ± 0.2
УЭП Conductivity, μS/cm ⁻¹	255.1	121	21.0–55.0
Цветность воды, градус шкалы Pt–Co Water color, degree of Pt–Co scale	27.4	24.6 ± 4.9	—

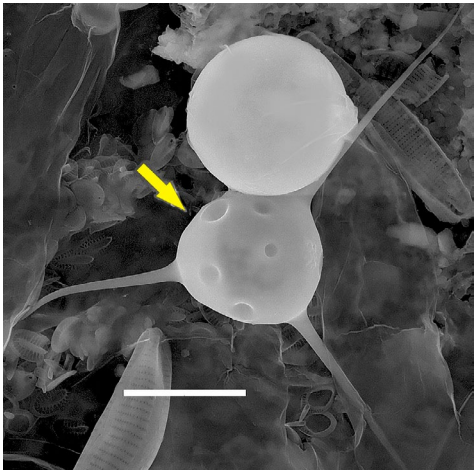


Рис. 1. Вегетативная клетка *Chrysococcus furcatus* (СЭМ) из Тесьминского водохранилища 18.05.2020. Вегетативная клетка указана стрелкой. Масштабная линейка – 10 мкм.
Fig. 1. Vegetative cell (arrow) of *Chrysococcus furcatus* (SEM) from the Tesminskoye Reservoir 18.05.2020. Scale bar – 10 μm.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаружены две окремнелые вегетативные клетки *Chrysococcus furcatus* пирамидальной формы. Размеры округло-треугольного основания клетки 11.2–11.4 мкм, с правильной вдавленной порой, воротничок отсутствует, поверхность орнаментирована округлыми углублениями диаметром 1.8–2.5 мкм. В углах клетки расположены игольчатые шипы, диаметр у основания до 4.5 мкм, длина до 21 мкм (рис. 1).

Вегетация вида *C. furcatus* отмечена при температуре воды 10°С в олиготрофных условиях одновременно с многочисленными стоматоцистами, осаждающимися на дно.

Ниже приводится описание стоматоцист *C. furcatus*, обнаруженных нами в водоемах замедленного стока на Южном Урале (рис. 2, 3).

Таблица 3. Изменение состава видов золотистых водорослей при изменении температуры воды в исследованных дериватах озера Тургойк и Тесьминском водохранилище**Table 3.** Changes in the composition of chrysophyte species with increase in water temperature in the studied derivatives of Turgoyak Lake and Tesminskoye Reservoir

Водоем / Дата Reservoir / Date	Дериваты озера Тургойк, 2022 г. Derivatives of Turgoyak Lake, 2022					Тесьминское вдхр., 2020 г. Tesminskoye Reservoir, 2020		
	пруд городского пляжа Pond of city beach				озеро Инышко Inyshko Lake			
	28.04	04.05	14.05	27.05				
Температура / Temperature (°C)	лед / ice, 2°	9°	12°	18°	12°	9°	11°	16°
Стоматоцисты <i>Ch. furcatus</i> со скрученным / нескрученными шипами 3, орнаментация нерегулярными выростами Stomatocysts of <i>Ch. furcatus</i> with spine twisted appearance/not twisted 3, ornamented with ir- regularly arranged scabrae	—	+	++	—	—	+++	+	—
Стоматоцисты <i>Ch. furcatus</i> бифуркатный шип Stomatocysts of <i>Ch. furcatus</i> , bifurcate spine	—	+	+	—	+	—	++	+
<i>Chrysosphaerella brevispina</i> Korshikov	—	—	+	—	—	+	+	—
<i>Dinobryon</i> spp.	++	+	+	+++	+	+	+	+
<i>Synura americana</i> Kynčlová et Škaloud	+	++	+++	+	—	++	++	+
<i>Synura mammilosa</i> Takahashi 1972	—	—	—	—	—	+++	++	+
<i>Synura petersenii</i> Korshikov 1929 emend. Škaloud et Kynčlová	—	—	—	—	—	+	+	+++
<i>Synura spinosa</i> Korschikov 1929 f. <i>spinosa</i>	—	—	—	—	—	+	+	—
<i>Synura uvella</i> Ehrenberg emend. Korschikov 1929	—	+	++	+	—	—	—	—
<i>Mallomonas acaroides</i> Perty emend. Ivanoff 1899 var. <i>acaroides</i>	—	—	—	+	—	—	+	+
<i>Mallomonas alpina</i> Pascher et Rutter emend. Asmund et Kristiansen 1986	—	—	—	—	—	+	+	—
<i>Mallomonas caudata</i> Ivanov emend. Krieger 1930	—	—	—	—	—	+	—	—
<i>Mallomonas crassissquama</i> (Asmund) Fott 1962 var. <i>crassissquama</i>	—	—	—	—	—	+	—	—
<i>Mallomonas cratis</i> Harris et Bradley	—	+	++	+	—	—	—	—

Примечание: — отсутствие вида; + присутствие вида, ++ доминирование в сообществе, +++ массовое развитие вида.

Note: — species missing; + species present, ++ species dominates in community, +++ species occurs in abundance.

Стоматоциста сферическая, 9.7–10.5 мкм в диаметре. При измерении десятков экземпляров значительных колебаний в диаметре стоматоцист южноуральской популяции не обнаружено. Лишь один экземпляр в деривате оз. Тургойк с бифуркатным шипом имел диаметр 11.6 мкм (рис. 2e).

Воротничок. Цисты имели высокий (2.0–5.0 мкм) обратноконический воротничок. Форма воротничка преимущественно широко коническая: в основании диаметр 2.0–2.5 мкм, у вершины воротничка диаметр 3.9–4.1 мкм, внутреннее отверстие

1 мкм (рис. 3d). Пора не наблюдалась. В деривате оз. Тургойк (оз. Инышко) единично отмечены также экземпляры (рис. 2f), где базальный край воротничка орнаментирован вертикальными полосами (Duff et al., 1995).

Орнаментация поверхности стоматоцист: неравномерно расположенные тупые конические выросты, а также острые конические выступы близ воротничковой зоны. Экземпляры со сглаженными коническими выростами по всей поверхности стоматоцисты обнаружены в деривате

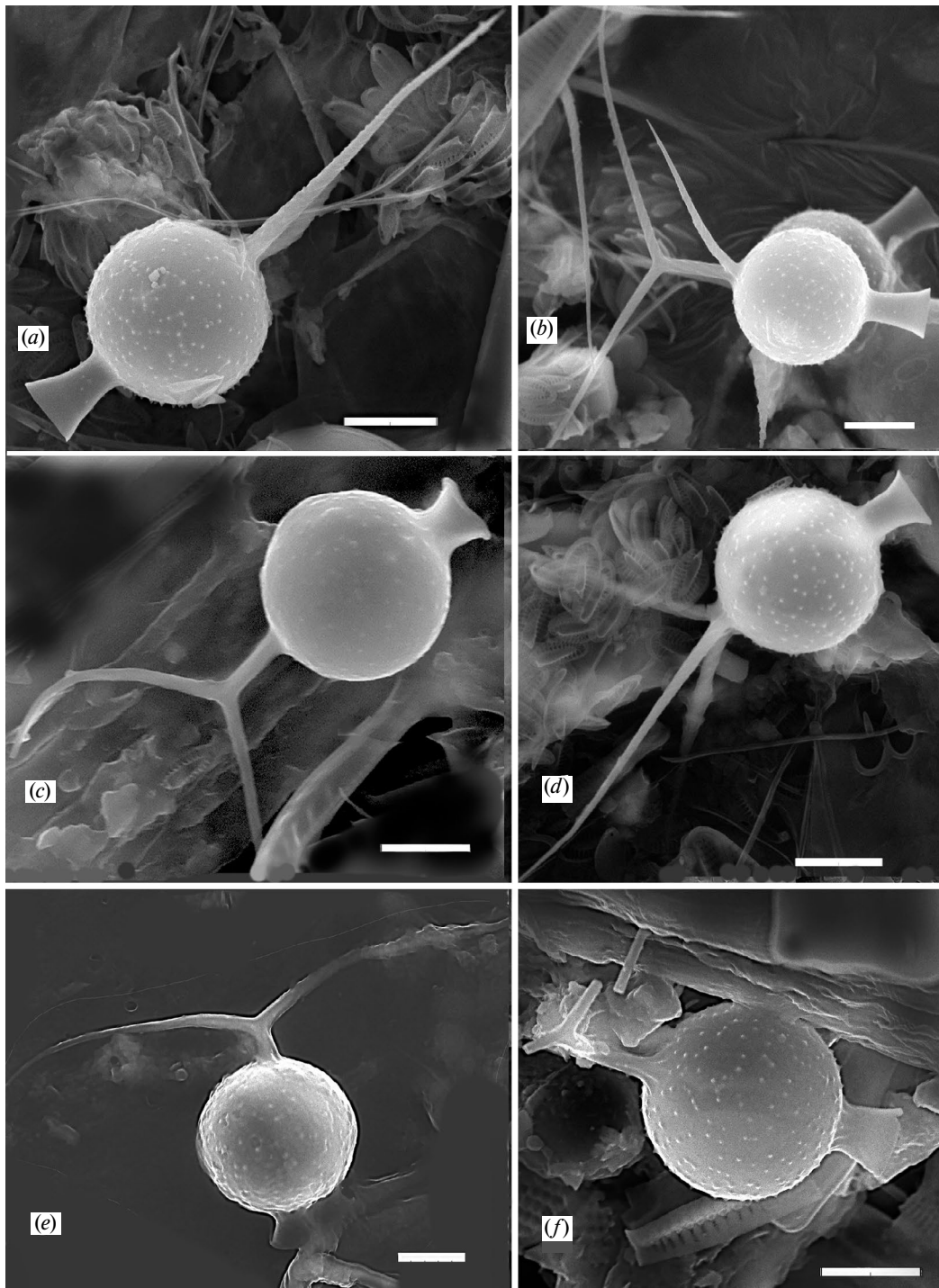


Рис. 2. Стоматоцисты *Chrysococcus furcatus* (СЭМ): *a* – стоматоциста со скрученным шипом; *b* – стоматоциста с бифуркатным шипом и с одним нескрученным шипом на заднем полюсе; *c*, *e*, *f* – стоматоцисты с раздвоенным бифуркатным шипом на заднем полюсе; *f* – стоматоциста с базальным краем воротничка, украшенным вертикальными полосами; *d* – стоматоциста с 3 игольчатыми шипами на заднем полюсе стоматоцисты. Масштабная линейка – 5 мкм.

Fig. 2. Stomatocysts of *Chrysococcus furcatus* (SEM): *a* – stomatocyst with a twisted spine; *b* – stomatocyst with a bifurcate spine and a non-twisted spine located on the posterior pole; *c*, *e*, *f* – stomatocysts with a bifurcate spine located on the posterior pole; *f* – stomatocyst with a basal collar edge decorated with vertical stripes; *d* – stomatocyst with 3 needle-like spines on the posterior pole. Scale bar – 5 μ m.

оз. Тургояк в мезоэвтрофных условиях в конце периода образования (рис. 2с, е).

Орнаментация стоматоцисты может изменяться в процессе развития. Например, в Центральной России (Dolgoft, 1922; Usatshev, 1928) обнаруживали гладкие образцы. Воронихин (Woronichin, 1933) наблюдал как гладкие, так и шероховатые, и шиповатые стоматоцисты *C. furcatus* на Северо-Западе России в реках Нева и Большая Невка. В исследовании Д. А. Капустина и Н. В. Капустиной (Kapustin, Kapustina, 2018) стоматоцисты из искусственного пруда в п. Борок (Ярославская область) были орнаментированы острыми короткими шипиками, имели высокий цилиндрический

воротничок и, как правило, скрученный игольчатый шип, а экземпляры из реки в Мурманской области были гладкими с коротким цилиндрическим воротничком.

Шипы. Обнаружена морфологическая изменчивость шипов, выходящих из заднего полюса стоматоцисты: отмечены простые, бифуркатные, и множественные шипы — от двух до четырех, чаще три. Часть найденных образцов имела единственный игольчатый отросток, раздваивающийся при созревании, как описывается в литературе (Duff, Smol, 1988, 1989, 1994; Duff et al., 1992; Zeeb, Smol, 1993; Duff et al., 1995). Шип имел длину 18.5 мкм (рис. 2а).

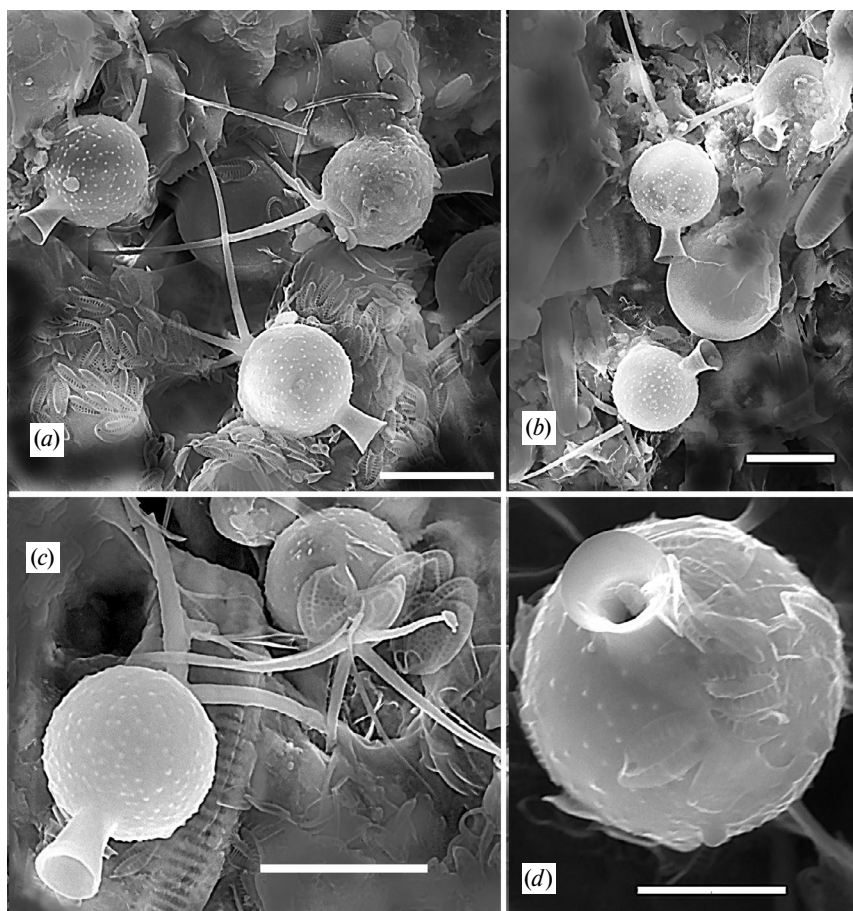


Рис. 3. Популяция стоматоцист *Chrysococcus furcatus* (СЭМ) в Тесьминском водохранилище 13.05.2020: а, б — стоматоцисты с 3 шипами на заднем полюсе, орнаментированные нерегулярно распределенными коническими выростами; с — стоматоциста с 4 шипами на заднем полюсе; d — стоматоциста, диаметр отверстия внутри воротничка 1 мкм. Масштабная линейка: а, б, с — 10 мкм; d — 5 мкм.

Fig. 3. Population of *Chrysococcus furcatus* stomatocysts (SEM) in the Tesminskoye Reservoir 13.05.2020: а, б — stomatocysts with 3 needle-like spines located on the posterior pole, ornamented with irregularly arranged scabrae; с — stomatocyst with 4 needle-like spines located on the posterior pole; d — stomatocyst, diameter of the hole inside the collar is 1 μm. Scale bar: а, б, с — 10 μm; d — 5 μm.

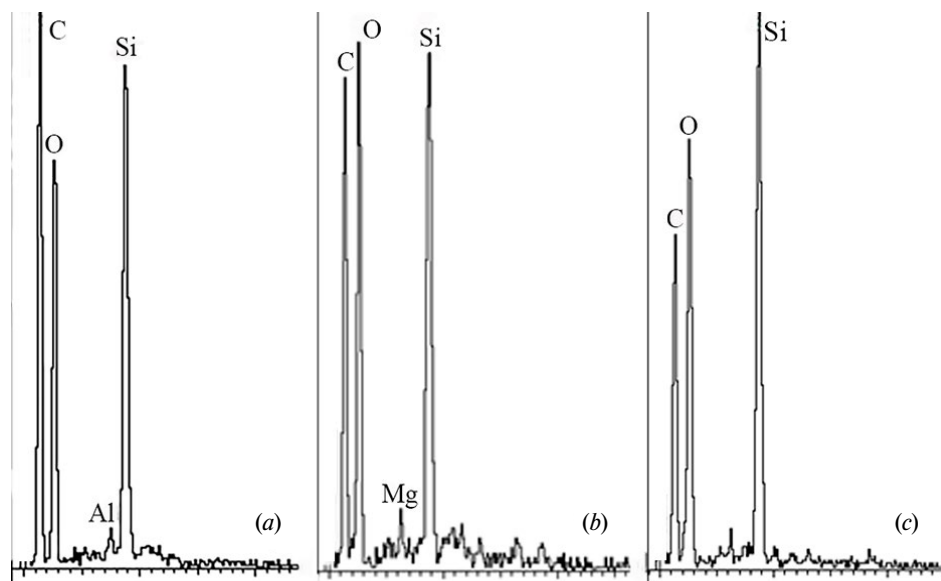


Рис. 4. Энергодисперсионный спектр (ЭДС) стоматоцист *Chrysococcus furcatus*: *a, b* — ЭДС спектр незрелых стоматоцист; *c* — ЭДС спектр зрелых стоматоцист с бифуркатным шипом.

Fig. 4. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX, EDS) of *Chrysococcus furcatus* stomatocysts: *a, b* — energy-dispersive X-ray spectrum of immature stomatocysts; *c* — energy-dispersive X-ray spectrum of mature stomatocysts with a bifurcate spine.

Исследователи Северной Америки отмечают: “обычно шип имеет скрученный или похожий на веревку вид и, по-видимому, полый” (Duff et al., 1995: 102). По находкам в России также описывается шип данной стоматоцисты, как имеющий “обычно скрученный вид” (Kapustin, Kapustina, 2018: 384). В нашем исследовании простой шип в виде “скрученной веревки” обнаружен на нескольких образцах.

Множественные игольчатые шипы отмечены у большинства экземпляров в южноуральских популяциях (рис. 2*d*, рис. 3*a, b, c*). На рис. 3*c* видно четыре игольчатых шипа, выходящих из заднего полюса стоматоцисты. Обнаруженные морфотипы свидетельствуют о морфологической изменчивости стоматоцисты *C. furcatus*, не отмеченной ранее в литературе. Стоматоцисты с множественными шипами удалось обнаружить в двух природных водоемах и проследить за их формированием: в Тесьминском водохранилище весной 2020 г. при прогревании воды с 9 до 16°C (наибольшее скопление); а также в деривате оз. Тургояк весной 2022 г. при прогреве воды с 9 до 12°C (см. табл. 3).

Стоматоцисты только с бифуркатным шипом отмечены единично в середине июня при прогреве воды до 16°C. Шип становится бифуркатным на

более поздних стадиях созревания стоматоцисты (Duff et al., 1995). Длина шипа до бифуркации 2.2–5.2 мкм, после бифуркации 18.0–21.5 мкм; у основания диаметр шипа 1.1–1.2 мкм (рис. 2*b, c, e, f*). Выявленные в южноуральской популяции значения длины шипа входят в диапазоны, описанные в литературе (Duff et al., 1995; Kapustin, Kapustina, 2018).

Таким образом, обнаружена морфологическая изменчивость и новая форма стоматоцист *C. furcatus* со множественными игольчатыми шипами: одновременно присутствовали цисты с простым шипом, бифуркатным шипом, большая часть цист была с тремя шипами (рис. 2*a–f*; табл. 3). Стоматоцисты со множественными шипами абсолютно преобладали 13.05.2020 в Тесьминском водохранилище при температуре воды 9°C (рис. 3*a, c*). Отмечена стоматоциста с присутствием как бифуркатного, так и простого шипов на заднем полюсе стоматоцисты (рис. 2*b*).

Энергодисперсионные спектры (ЭДС). На рис. 4 представлены фрагменты спектров с максимумами преобладающих химических элементов в составе стоматоцисты. Спектры показывают доминирование в химическом составе кремния (Si), но выраженность максимумов разная. При изучении спектрограмм *C. furcatus* из

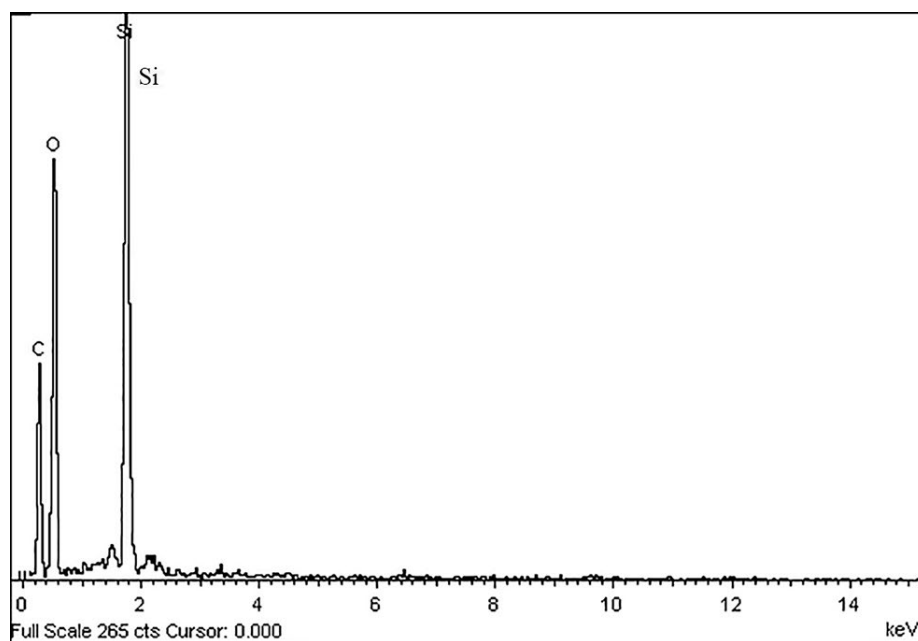


Рис. 5. Энергодисперсионный спектр (ЭДС) вегетативных клеток стоматоцист *Chrysococcus furcatus*.

Fig. 5. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX, EDS) of vegetative cells of *Chrysococcus furcatus* stomatocysts.

южноуральских популяций отмечено, что у более зрелых образцов стоматоцист с бифуркатным шипом выражено преобладание в составе оболочки кремния по сравнению с органической (C, O) составляющей (рис. 4с).

Фрагменты спектрограмм незрелых стоматоцист новой формы с тремя игольчатыми шипами, интерпретируемой как менее зрелая, чем циста с бифуркатным шипом, показали заметное содержания алюминия, магния (Al, Mg) в оболочке (рис. 4а, б).

Энергодисперсионный спектр вегетативной клетки *C. furcatus* показан в полном виде на рис. 5: выявлено преобладание кремния по сравнению с органикой, характеризующейся заметно меньшими пиками углерода (C) и кислорода (O), как и в зрелых стоматоцистах с бифуркатным шипом.

Таким образом, на основании анализа представленных ЭДС можно сделать вывод о том, что в формирующихся стоматоцистах содержание органических соединений выше концентрации кремния. Оболочка стоматоцист при формировании более пластична, присутствует слизь: значимые пики магния, алюминия на спектрограмме могут свидетельствовать об усиленной адсорбции металлов на поверхности оболочки (рис. 4а, б). У зрелых стоматоцист с бифуркатным

шипом накопление металлов было меньше границы обнаружения.

Экологические особенности. Вид *C. furcatus* описан в литературе как криофильный, предпочитающий холодные воды, часто встречается в арктических водоемах, наиболее распространен в олиготрофных участках водоемов при низких температурах воды (Cronberg, Kristiansen, 1980; Duff, Smol, 1988, 1989; Duff et al., 1992). Стоматоцисты вида отмечены в отложениях послеледниковых озер умеренной климатической зоны (Duff, Smol, 1988; Duff et al., 1995) и в подледный период в водоемах России (Kapustin, Kapustina, 2018). На Южном Урале вегетативные клетки вида *C. furcatus* обнаружены в олиготрофном горно-лесном водоеме при низкой температуре воды. Формирование и созревание стоматоцист *C. furcatus* в южноуральских популяциях отмечены весной после схода льда в горно-лесных водоемах в холодной воде: при олиготрофных условиях (фосфор общий $0.010 \text{ мг} \times \text{дм}^{-3}$) наблюдали большое скопление стоматоцист; в мезо-эвтрофных условиях, характеризующихся содержанием фосфора от 0.084 до $0.134 \text{ мг} \times \text{дм}^{-3}$, стоматоцисты вида встречали единично (см. табл. 3). В мезо-эвтрофных условиях наблюдали морфотипы с бифуркатным шипом. На Южном Урале местообитания *C. furcatus* имеют нейтральную реакцию среды pH 7.5.

Температурный режим для вегетативных клеток *C. furcatus* составлял 10°C, одновременно присутствовали многочисленные стоматоцисты. Стоматоцисты с тремя игольчатыми шипами обнаружены весной при температуре воды с 9 до 12°C, наибольшее скопление при 9°C. Количество цист резко снижается при 14°C и они полностью оседают на дно и не обнаруживаются в водоемах при температуре 16°C.

Состав золотистых водорослей в водоемах при массовом формировании стоматоцист *C. furcatus*, которые могут быть связаны аллелопатическими связями, представлен в табл. 3. Наиболее заметный вклад в планктонные сообщества вносили несколько видов *Synura*: *S. americana*, *S. mammosa*, *S. petersenii* (Snit'ko et al., 2021, 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе обширного многолетнего отбора проб из пресных водоемов Урала описаны новые местообитания золотистой водоросли *Chrysococcus furcatus*. Установлено, что этот вид является редким для Южного Урала.

Впервые обнаружена морфологическая изменчивость стоматоцист *C. furcatus*: в частности, с множественными шипами, выходящими из заднего полюса.

Впервые в условиях природных водоемов при прогреве воды проведено наблюдение за массовым образованием стоматоцист и охарактеризованы экологические условия их формирования. Установлено, что вид развивается в олиготрофных условиях весной подо льдом, а массовое формирование стоматоцист происходит сразу после схода льда. Методом энергодисперсионной спектроскопии впервые получены данные об увеличении содержания кремния в оболочках стоматоцист *C. furcatus* при их созревании.

В целом, экологические условия выявленных местообитаний *C. furcatus* характеризуются нейтральными показателями pH, низкой минерализацией и электропроводностью воды, уровнем продуктивности от олиготрофии до эвтрофии. Расширены представления об экологическом диапазоне: вид *C. furcatus* вегетирует не только в олиготрофных условиях, но и мезоэвтрофных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания по плановой теме ЮУФНЦ Минералогии и Геоэкологии УрО РАН № 122040800079-3. Авторы благодарят сотрудника лаборатории электронной микроскопии ЮУФНЦ МиГ УрО РАН Блинова И. А. за помощь в работе на СЭМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [Bazhenova] Баженова О.Р. 2021. Атлас стоматоцист золотистых водорослей из планктона водных объектов Омского Прииртышья. Омск. 122 с.
- Bazhenova O.P., Mitrofanova E.Y., Shakhovai E.V. 2012. Stomatocysts of Chrysophyte algae from bodies of water in territory near Irtysh River in Omsk region and Lake Teletskoe in Gorny Altai, Russia. — *Contemp. Problem. Ecol.* 5(4): 423–429.
<https://doi.org/10.1134/S1995425512040026>
- Cronberg G., Kristiansen J. 1980. Synuraceae and other Chrysophyceae from Central Småland, Sweden. — *Bot. Notiser.* 133: 595–618.
- Deflandre G. 1934. Sur l'abus de l'emploi en paléontologie du nom de genre Trachelomonas. — *Ann. Protistol.* 4: 151–165.
- [Dolgov] Долгов Г.И. 1922. К систематике *Trachelomonas* Ehrb. — *Русс. гидробиол. журнал.* 1(9–10): 289–291.
- Duff K.E., Douglas M.S.V., Smol J.P. 1992. Chrysophyte cysts in 36 Canadian high arctic ponds. — *Nord. J. Bot.* 12(4): 471–499.
<https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1992.tb01331.x>
- Duff K.E., Smol J.P. 1988. Chrysophyte stomatocysts from the postglacial sediments of a High Arctic Lake. — *Can. J. Bot.* 66: 1117–1128.
<https://doi.org/10.1139/b88-160>
- Duff K.E., Smol J.P. 1989. Chrysophyte stomatocysts from the postglacial sediments of Tasikutaq Lake, Baffin Island, N.W.T. — *Can. J. Bot.* 67: 1649–1656.
<https://doi.org/10.1139/b89-208>
- Duff K.E., Smol J.P. 1994. Chrysophyte cyst flora from British Columbia (Canada) lakes. — *Nova Hedwigia.* 58(3–4): 353–389.
- Duff K.E., Zeeb B.A., Smol J.P. 1995. Atlas of Chrysophyte Cysts. Dordrecht. 189 p.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-0809-8>
- Firsova A.D., Bessudova A.Yu., Likhoshvay Ye.V. 2017. New data of Chrysophyte stomatocysts from Lake Baikal. — *Acta Biologica Sibirica.* 3(4): 113–122.
<https://doi.org/10.14258/abs.v3i4.3637>
- [Firsova et al.] Фирсова А.Д., Бессудова А.Ю., Лихошвай Е.В. 2018. Стоматоцисты хризифитовых в притоках северной оконечности озера Байкал. — *Acta Biologica Sibirica.* 4(4): 25–44.
<https://doi.org/10.14258/abs.444872>

- [Firsova, Likhoshway] Фирсова А.Д., Лихошвай Е.В. 2006. Атлас цист хризифитовых водорослей озера Байкал. Новосибирск. 148 с.
- Kapustin D.A., Kapustina N.V. 2018. New Records of *Chrysococcus furcatus* (Chrysophyceae) in Russia. — *Inland Water Biology*. 11(4): 384–386.
<https://doi.org/10.1134/S1995082918040090>
- Kapustin D.A., Philippov D.A., Gusev E.S. 2016. Four new Chrysophyceean stomatocysts with true complex collar from the Shichenskoe raised bog in Central Russia. — *Phytotaxa*. 288: 285–290.
<https://doi.org/10.11646/phytotaxa.288.3.10>
- Nicholls K.H. 1981. *Chrysococcus furcatus* (Dolg.) comb. nov.: a new name for *Chrysastrella furcata* (Dolg.) Defl. based on the discovery of the vegetative stage. — *Phycologia*. 20(1): 16–21.
<https://doi.org/10.2216/i0031-8884-20-1-16.1>
- Pla S. 2001. Chrysophyceean cysts from Pirenees. Berlin. 237 p.
- Safronova T.V. 2015. A new morphotype of chrysophyceean stomatocyst from the pond of Peter the Great Botanical Garden (Saint Petersburg). — *Novosti Sist. Nizsh. Rast.* 49: 848–858.
<https://doi.org/10.3111/nsnr/2015.49.47>
- Safronova T.V., Voloshko L.N. 2013. Silica-scaled chrysophytes in the waterbodies of protected areas of the North-West of Russia. — *Nova Hedwigia*. 142: 97–115.
- Škaloud P., Kristiansen J., Škaloudova M. 2013. Developments in the taxonomy of silica-scaled chrysophytes — from morphological and ultrastructural to molecular approaches. — *Nord. J. Bot.* 31: 385–402.
<https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2013.00119.x>
- Škaloud P., Kynčlová A., Benada O., Kofroňová O., Škaloudova M. 2012. Toward a revision of the genus *Synura*, section Petersenianae (Synurophyceae, Heterokontophyta): morphological characterization of six pseudo-cryptic species. — *Phycologia*. 51: 303–329.
<https://doi.org/10.2216/11-20.1>
- [Snit'ko, Voloshko] Снит'ко Л.В., Волошко Л.Н. 2017. Золотистые водоросли (Chrysophyceae, Synurophyceae) в подледном планктоне озер восточных предгорий Южного Урала. — В сб.: Материалы III Междунар. конф. “Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем”. СПб. С. 301–304.
- [Snit'ko, Voloshko] Снит'ко Л.В., Волошко Л.Н. 2018. О находках стоматоцист золотистых водорослей (Chrysophyceae, Synurophyceae) на Южном Урале. — В сб.: Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использования в мониторинге. Материалы докладов IV Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. СПб. С. 422–426.
- [Snit'ko et al.] Снит'ко Л.В., Сафронова Т.В., Блинов И.А., Снит'ко В.П. 2021. Новые виды рода *Synura* секции *Synura* (Chrysophyceae, Synurales, Synuraceae) в водоемах Южного Урала. — *Бот. журн.* 106(4): 1101–1112.
<https://doi.org/10.31857/S0006813621110107>
- [Snit'ko et al.] Снит'ко Л.В., Сафронова Т.В., Снит'ко В.П. 2022. Золотистые водоросли (Chrysophyceae) водоемов Южного Урала и Зауральского плато. Род *Synura* (Synuraceae) секция Petersenianae. — *Бот. журн.* 107(4): 333–349.
<https://doi.org/10.31857/S0006813622030061>
- Usatshev P.I. 1928. Materialien zur Algenflora des Jenissei-Flusses. — *Rep. Sib. Sci. St. Fish.* 3(2): 1–86.
- [Voloshko] Волошко Л.Н. 2016. Золотистые водоросли (Chrysophyta) водоемов Северо-Запада России. Разнообразие стоматоцист. — *Бот. журн.* 101(11): 1257–1281.
<https://doi.org/10.1134/S0006813616110016>
- Vorobyova S.S., Pomazkin G.V., Baranova E.Yu., Likhoshway Ye.V., Sandgren C.D. 1996. Chrysophyceean cysts (stomatocysts) from Lake Baikal and Irkutsk Reservoir, Siberia. — *J. of Paleolimnol.* 15: 271–277.
<https://doi.org/10.1007/BF00213046>
- Wilkinson A.N., Zeeb B.A., Smol J.P. 2001. Atlas of Chrysophyceean Cysts. Vol. II. Dordrecht. 169 p.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-0811-1>
- Woronichin N.N. 1933. Notiz über Chrysomonadencysten in Plankton der Flüsse Nawa und Bolschaja Newka. — *Acta Inst. Bot. Acad. Sci. USSR. Ser. II.* 1: 7–10.
- Zeeb B.A., Smol J.P. 1993. Chrysophyceean stomatocyst flora from Elk Lake, Clearwater County, Minnesota. — *Can. J. Bot.* 71: 737–756.
<https://doi.org/10.1139/b93-086>

NEW RECORDS AND MORPHOLOGY OF *CHRYSOCOCCUS FURCATUS* (CHRYSOPHYCEAE, CHROMULINALES) IN THE WATERBODIES OF THE SOUTHERN URAL

L. V. Snit'ko¹*, V. P. Snit'ko¹

¹South Ural Scientific Centre of Mineralogy and Environmental Geology of the Ural Branch RAS
Ilmensky Reserve, Miass, Chelyabinsk Region, 456317, Russia

*e-mail: lvs223@yandex.ru

The data on new records of *Chrysococcus furcatus* vegetative cells and stomatocysts obtained using scanning electron microscopy (SEM) are presented. The species has been recorded for the first time in the Urals; three habitats were discovered during extensive multiyear sampling. The originality of the research lies in the study of the environmental conditions of cell growth and mass formation of stomatocysts in

natural waterbodies, as well as in obtaining information on the increase in silicon content in mature stomatocysts using energy-dispersive X-ray spectroscopy. In the Southern Ural population, the morphotypes of stomatocysts with an obconical long collar of varying length are found. Some specimens had a single needle-like spine bifurcating when mature, located on or very close to the posterior pole. A new form with multiple needle-like spines located on the posterior pole of stomatocyst has been discovered. The rest of the cyst body was ornamented with conical scabrae. Descriptions are illustrated with electron micrographs. The obtained results supplement the information on the algal flora of Russia and can be used in environmental monitoring of waterbodies and paleoreconstructions.

Keywords: chrysophytes, stomatocysts, *Chrysococcus furcatus*, morphology, ecology, Taganay National Park, Southern Ural

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the state assignment of the South Ural Scientific Centre of Mineralogy and Environmental Geology of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, project No. 122040800079-3. The authors thank I.A. Blinov, an employee of the Laboratory of Electron Microscopy of the SUSC MEG UB RAS, for his help in working on the SEM.

REFERENCES

- Bazhenova O.P. 2021. Atlas stomatocist zolotistyh vodoroslej iz planktona vodnyh ob'ektov Omskogo Priirtysh'ya [Atlas of golden algae stomatocysts from plankton of water bodies of the Omsk region]. Omsk. 122 p. (In Russ.).
- Bazhenova O.P., Mitrofanova E.Y., Shakhovai E.V. 2012. Stomatocysts of Chrysophyte algae from bodies of water in territory near Irtysh River in Omsk region and Lake Teletskoe in Gornyy Altai, Russia. — *Contemp. Problem. Ecol.* 5(4): 423–429.
<https://doi.org/10.1134/S1995425512040026>
- Cronberg G., Kristiansen J. 1980. Synuraceae and other Chrysophyceae from Central Småland, Sweden. — *Bot. Notiser.* 133: 595–618.
- Deflandre G. 1934. Sur l'abus de l'emploi en paléontologie du nom de genre *Trachelomonas*. — *Ann. Protistol.* 4: 151–165.
- Dolgov G.I. 1922. Zur Systematik von *Trachelomonas* Ehrb. — *Russ. hydrobiol. zhurn.* 1(9–10): 289–291 (In Russ.).
- Duff K.E., Douglas M.S.V., Smol J.P. 1992. Chrysophyte cysts in 36 Canadian high arctic ponds. — *Nord. J. Bot.* 12(4): 471–499.
<https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1992.tb01331.x>
- Duff K.E., Smol J.P. 1988. Chrysophyte stomatocysts from the postglacial sediments of a High Arctic Lake. — *Can. J. Bot.* 66: 1117–1128.
<https://doi.org/10.1139/b88-160>
- Duff K.E., Smol J.P. 1989. Chrysophyte stomatocysts from the postglacial sediments of Tasikuta Lake, Baffin Island, N.W.T. — *Can. J. Bot.* 67: 1649–1656.
<https://doi.org/10.1139/b89-208>
- Duff K.E., Smol J.P. 1994. Chrysophyte cyst flora from British Columbia (Canada) lakes. — *Nova Hedwigia.* 58(3–4): 353–389.
- Duff K.E., Zeeb B.A., Smol J.P. 1995. Atlas of Chrysophyte Cysts. Dordrecht. 189 p.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-0809-8>
- Firsova A.D., Bessudova A.Yu., Likhoshway Ye.V. 2017. New data of Chrysophyte stomatocysts from Lake Baikal. — *Acta Biologica Sibirica.* 3(4): 113–122.
<https://doi.org/10.14258/abs.v3i4.3637>
- Firsova A.D., Bessudova A.Yu., Likhoshway Ye.V. 2018. Chrysophyte stomatocyst in tributaries of northern limit of Lake Baikal. — *Acta Biologica Sibirica.* 4(4): 25–44 (In Russ.).
<https://doi.org/10.14258/abs.444872>
- Firsova A.D., Likhoshway Ye.V. 2006. Atlas of Chrysophyte Cysts of Lake Baikal. Novosibirsk. 148 p. (In Russ.).
- Kapustin D.A., Kapustina N.V. 2018. New Records of *Chrysococcus furcatus* (Chrysophyceae) in Russia. — *Inland Water Biology.* 11(4): 384–386.
<https://doi.org/10.1134/S1995082918040090>
- Kapustin D.A., Philippov D.A., Gusev E.S. 2016. Four new Chrysophyte stomatocysts with true complex collar from the Shichenskoe raised bog in Central Russia. — *Phytotaxa.* 288: 285–290.
<https://doi.org/10.11646/phytotaxa.288.3.10>
- Nicholls K.H. 1981. *Chrysococcus furcatus* (Dolg.) comb. nov.: a new name for *Chrysastrella furcata* (Dolg.) Defl. based on the discovery of the vegetative stage. — *Phycologia.* 20(1): 16–21.
<https://doi.org/10.2216/i0031-8884-20-1-16.1>
- Pla S. 2001. Chrysophyte cysts from Pirenees. Berlin. 237 p.
- Safronova T.V. 2015. A new morphotype of chrysophyte stomatocyst from the pond of Peter the Great Botanical Garden (Saint Petersburg). — *Novosti Sist. Nizsh. Rast.* 49: 848–858.
<https://doi.org/10.31111/nsnr/2015.49.47>
- Safronova T.V., Voloshko L.N. 2013. Silica-scaled chrysophytes in the waterbodies of protected areas of the North-West of Russia. — *Nova Hedwigia.* 142: 97–115.
- Škaloud P., Kristiansen J., Škaloudová M. 2013. Developments in the taxonomy of silica-scaled chrysophytes — from morphological and ultrastructural to molecular approaches. — *Nord. J. Bot.* 31: 385–402.
<https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2013.00119.x>

- Škaloud P., Kynčlova A., Benada O., Kofroňová O., Škaloudová M. 2012. Toward a revision of the genus *Synura*, section Petersenianae (Synurophyceae, Heterokontophyta): morphological characterization of six pseudo-cryptic species. — *Phycologia*. 51: 303–329.
<https://doi.org/10.2216/11-20.1>
- Snit'ko L.V., Voloshko L.N. 2017. Chrysophycean algae (Chrysophyceae, Synurophyceae) in the under ice in lakes of the Eastern foothills of the South Urals. — In: Bioindication in monitoring of freshwater ecosystems. Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. St. Petersburg. P. 301–304 (In Russ.).
- Snit'ko L.V., Voloshko L.N. 2018. On the findings of f stomatocyst of Chrysophycean algae (Chrysophyceae, Synurophyceae) in the South Urals. — In: Vodorosli: problemy taksonomii, ekologii i ispol'zovanie v monitoringe. Materialy dokladov IV Vseross. nauch. konf. s mezhdunar. Uchastiem. St. Petersburg. P. 422–426 (In Russ.).
- Snit'ko L.V., Safronova T.V., Blinov I.A., Snit'ko V.P. 2021. New species of *Synura* section *Synura* (Chrysophyceae, Synurales, Synuraceae) in waterbodies of the South Urals. — *Bot. zhurn.* 106(11): 1101–1112 (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0006813621110107>
- Snit'ko L.V., Safronova T.V., Snit'ko V.P. 2022. Chrysophycean algae (Chrysophyceae) in waterbodies of the South Urals and Transural Plateau. *Genius Synura* (Synuraceae). Section Petersenianae — *Bot. zhurn.* 107(4): 333–349 (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0006813622030061>
- Triemer R.E., Zakrys B. 2015. Photosynthetic euglenoids, in *Freshwater Algae of North America* (2 ed.). London. P. 459–483.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385876-4.00010-4>
- Usatshev P.I. 1928. Materialien zur Algenflora des Jenissei-Flusses. — *Rep. Sib. Sci. St. Fish.* 3(2): 1–86.
- Voloshko L.N. 2016. Chrysophycean algae (Chrysophyta) in waterbodies of the northwestern Russia. Diversity of stomatocysts. — *Bot. zhurn.* 101(11): 1257–1281 (In Russ.).
<https://doi.org/10.1134/S0006813616110016>
- Vorobyova S.S., Pomazkin, G.V., Baranova E.Yu., Likhoshway Ye.V., Sandgren C.D. 1996. Chrysophycean cysts (stomatocysts) from Lake Baikal and Irkutsk Reservoir, Siberia. — *J. of Paleolimnol.* 15: 271–277.
<https://doi.org/10.1007/BF00213046>
- Wilkinson A.N., Zeeb B.A., Smol J.P. 2001. *Atlas of Chrysophycean Cysts*. Vol. II. Dordrecht. 169 p.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-0811-1>
- Wołowski K. 2005. Taxonomic comments on seven *Trachelomonas* taxa (Euglenophyceae). — *Biologia (Bratislava)*. 60(4): 343–347.
- Woronichin N.N. 1933. Notiz über Chrysomonadencysten in Plankton der Flüsse Newa und Boljschaja Newka. — *Acta Inst. Bot. Acad. Sci. USSR. Ser. II.* 1: 7–10.
- Zeeb B.A., Smol J.P. 1993. Chrysophycean stomatocyst flora from Elk Lake, Clearwater County, Minnesota. — *Can. J. Bot.* 71: 737–756.
<https://doi.org/10.1139/b93-086>