УДК 574.1:574.583:582.261.2 DOI: 10.14258/pbssm.2026058

Разнообразие стоматоцист золотистых водорослей (Chrysophyceae) в разнотипных водоемах и водотоках Алтая (Россия)

Diversity of chrysophycean algae stomatocysts (Chrysophyceae) in different types of water bodies and streams in Altai (Russia)

Митрофанова Е. Ю.[1], Коба С. П.[2]

Mitrofanova E. Yu.[1], Koba S. P.[2]

[1]*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия. E-mail: mitelena-09@mail.ru*
[1]*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia*

[2]*Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия, E-mail: romanadanil3002@gmail.com*
[2]*Altai State University, Barnaul, Russia*

Реферат. В работе приведены предварительные результаты изучения разнообразия стоматоцист золотистых водорослей (Chrysophyceae) в разнотипных водных объектах, расположенных в различных географических зонах Большого Алтая – степь, лесостепь, предгорья и горы. Повышенным разнообразием стоматоцист выделяется Телецкое озеро, глубокий олиготрофный водоем с большим объемом водной массы и разнообразными экотопами, что и определяет богатство состава его стоматоцист. В Телецком озере отмечено присутствие в основном стоматоцист с орнаментацией и выростами различной длины, нередко больше диаметра цисты. Оригинальный состав стоматоцист выявлен в озерах Джулукуль, находящемся в истоке р. Чулышмана, основного притока Телецкого озера, и Талменье, расположенном в бассейне Верхней Катуни. Озера Джулукуль и Талменье находятся выше 1000 м над ур. моря, имеют невысокие температуры воды в летний период, что благоприятно для развития золотистых водорослей, которые очень развиты в таких водных экосистемах. Выявленные цисты в озерах Джулукуль и Талменье в большинстве имели шероховатую или орнаментированную оболочку с выростами, но незначительной длины, редко больше диаметра цисты. Напротив, в речном планктоне больше присутствовали стоматоцисты с гладкой поверхностью, что, вероятно, позволяет им в речном потоке переноситься на дальние дистанции. Крупные реки имеют более разнообразный планктон и состав стоматоцист в нем.

Ключевые слова. Алтай, золотистые водоросли, озера, разнообразие, реки, стоматоцисты.

Summary. The paper presents preliminary results of a study of the golden algae (Chrysophyceae) stomatocyst diversity in different types of water bodies located in different geographical zones of the Greater Altai – steppe, forest-steppe, foothills and mountains. Lake Teletskoye, a deep oligotrophic reservoir with a large water volume and diverse ecotopes, is distinguished by its high stomatocyst diversity and mostly characterized by the presence of stomatocysts with ornamentation and spines of varying lengths, often longer than the cyst diameter. A unique stomatocyst composition was found in lakes Dzhulukul, located at the source of the Chulyshman River, the main tributary of Lake Teletskoye, and Talmenye in the Upper Katun River basin. Lakes Dzhulukul and Talmenye are located above 1000 m above sea level and have cool water temperatures in summer, which favors the development of golden algae, which thrive in such aquatic ecosystems. The cysts identified in lakes Dzhulukul and Talmenye mostly had scabrated or ornamented shells with spines of insignificant length, rarely exceeding the cyst diameter. In contrast, riverine plankton contained a higher proportion of stomatocysts with smooth surface, which likely allows them to be transported long distances by river currents. Large rivers have a more diverse plankton and stomatocyst composition.

Key words. Altai, Chrysophycean algae, diversity, lakes, rivers, stomatocysts,

Введение. Золотистые, или хризофитовые водоросли – очень разнообразная по составу группа жгутиковых одноклеточных организмов, преимущественно пресноводных, широко распространенных в разнотипных водоемах и водотоках в различных климатических зонах. Они часто доминируют или субдоминируют в биомассе фитопланктона озер с низкой или средней продуктивностью, чаще в олиготрофных пресноводных экосистемах (Волошко, 2017; Chrysophyte algae, 1995). Отмечено, что

представители золотистых водорослей могут формировать значительные популяции в пресных водоемах, вызывая цветение воды с выделением продуктов распада жирных кислот, которое обычно сопровождаются резким ухудшением качества воды (Волошко, 2015). Одной из особенностей данной группы водорослей является образование внутри клеток (эндогенно) покоящихся стадий, или стоматоцист. Оболочка стоматоцист твердая и прочная, состоит из соединений кремния. Есть пора, которая закрывается пробкой по мере созревания цисты. При этом на последнем этапе цистообразования на поверхности цисты могут оставаться чешуйки вегетативной клетки, по которым можно определить видовую принадлежность стоматоцисты. У хризофитовых водорослей без чешуек (голые или с кремнистыми домиками) определить видовую принадлежность стоматоцисты можно только в природе, если циста непосредственно находится у домика, как, например, у видов рода *Dinobryon* можно часто наблюдать стоматоцисту у основания домика, или в культуре. Но большинство выявленных в настоящее время морфотипов стоматоцист не идентифицированы до вида (Duff et al., 1995; Wilkinson et al., 2001; Фирсова, Лихошвай, 2006; Баженова, 2021), потому что для достоверной видовой идентификации стоматоцист очень важным является изучение жизненных циклов этих водорослей в культуре (Волошко, 2017).

Цисты бывают разной формы (сферические, овальные или др.), разного размера (от нескольких до десятков микрометров), иметь гладкую или орнаментированную поверхность, различные выросты, пора может иметь воротничок или быть без него. Встречается и комбинирование различных образований на поверхности цисты. Разные виды могут продуцировать одинаковые стоматоцисты, или, наоборот, у одного вида могут быть разные стоматоцисты.

Цель работы – выявление разнообразия стоматоцист хризофитовых водорослей в разнотипных водоемах и водотоках Алтая.

Материалы и методы. В 2019–2023 гг. во время реализации проектов были обследованы водоемы и водотоки в разных природных зонах Большого Алтая (степи, лесостепи, предгорья, горы), а также были просмотрены коллекции проб фитопланктона Телецкого озера за 1989–2025 гг. на СЭМ Hitachi S-3400N (Japan). Схема расположения наиболее крупных из исследованных озер приведена на рисунке 1, основные характеристики обследованных водоемов и водотоков – в таблице 1.

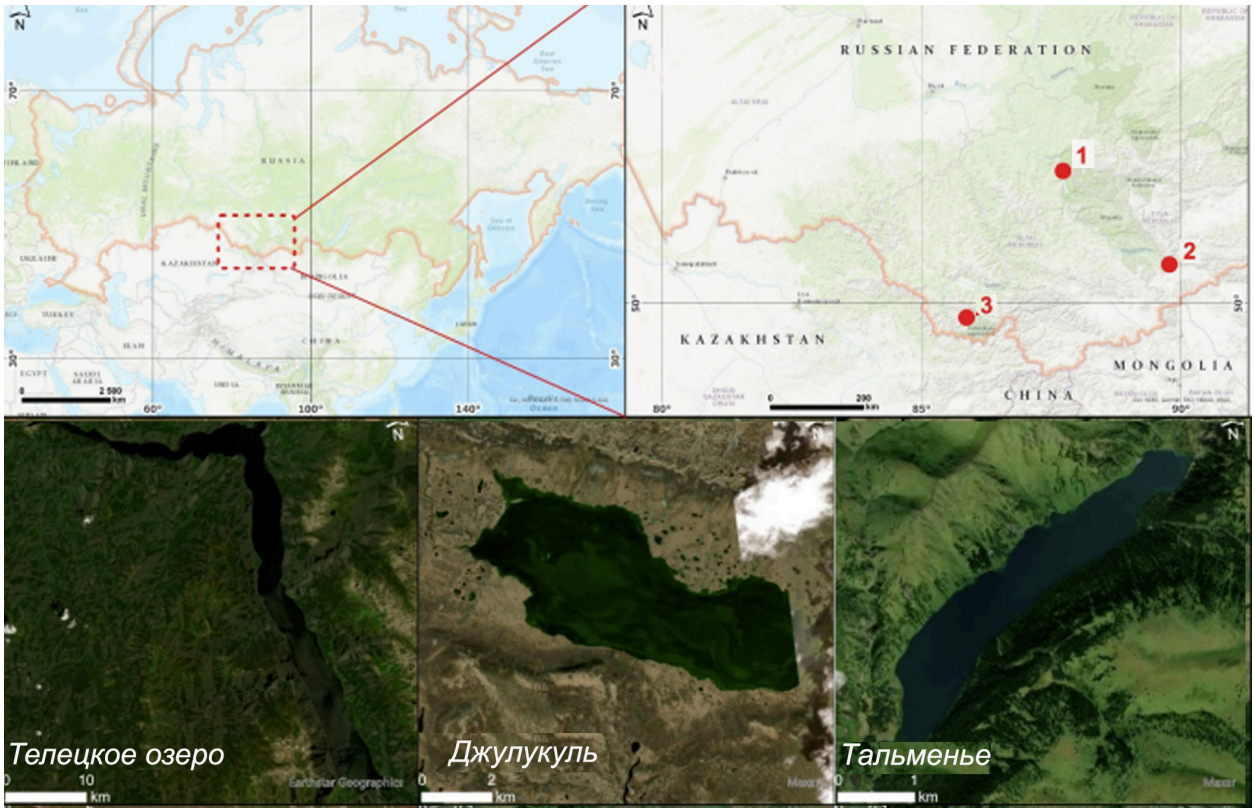


Рис. 1. Карта расположения озер на исследуемой территории (по: Malygina et al., 2021): 1 – Телецкое, 2 – Джулукуль, 3 – Талменье.

Таблица 1. Основные морфометрические и географические характеристики исследованных водных объектов

Водный объект	Координаты	Площадь/ длина, км²/км	Глубина макс., м (для озер)	Высота над ур. м., м (в точке отбора)	Географическая зона
Озера					
Телецкое	51°45′05.28″N 87°36′47.28″E	223	323,3	434	низкогорье
Талменье	49°48′55.56″N 85°48′40.28″E	3,9	68	1531	горы
Джулукуль	50°30′17.79″N 89°38′31.43″E	30	7	2199	горы
Дегтярка (с. Подстепное)	52°57′20.35″N 82°05′50.41″E	-	-		степь
Быстрый Исток (с. Б. Исток)	52°21′20.60″N 84°22′37.38″E	-	-	153	лесостепь
Кучукское	52°42′21.56″N 79°46′07.43″E	181	3,3	97	степь
Реки					
Бия (у г. Бийска)	52°32′04.14″N 85°13′30.34″E	301	-	170	лесостепь
Чулышман (устье в озере)	51°45′05.28″N 87°36′47.28″E	241	-	434	горы
Озерная (исток из озера Талменье)	49°48′14.27″N 85°47′52.32″E	-	-	1531	горы
Катунь (после устья р. Зайчиха)	49°40′09.28″N 85°41′30.38″E	688	-	1203	горы
Обь (у с. Б. Исток)	52°22′12.89″N 84°21′35.99″E	3650	-	150	лесостепь
Касмала (с. Рогозиха)	53°15′00.01″N 87°47′32.38″E	119	-	166	лесостепь
Чумыш (пос. Тальменка)	51°45′05.28″N 87°36′47.28″E	644	-	138	лесостепь
Кучук	52°44′20.58″N 79°51′44.03″E	121	-	97	степь

Пробы объемом 30–50 мл профильтровывали на мембранные фильтры «Владипор» диаметром 10 мм с размером пор около 0,8 мкм, затем фильтры промывали 10 мл 96%-го этанола, после высушивали на воздухе и инсталлировали на «столики» для электронной микроскопии с помощью двустороннего скотча, напыляли золото-палладиевой смесью и исследовали с помощью СЭМ Hitachi S-3400N (Центр коллективного пользования «Электронная микроскопия» Института водных и экологических проблем СО РАН).

Результаты и обсуждение. Стоматоцисты, или статоспоры, золотистых водорослей различны по форме, размерам и наличию элементов орнаментации. Многочисленные морфотипы стоматоцист можно найти в Атласах и отдельных публикациях, которые в последние десятилетия появляются все чаще, показывая разнообразие стоматоцист золотистых водорослей как в отдельно взятых водных объектах, например, оз. Байкал (Фирсова, Лихошвай, 2006), так и на небольших территориях (Pla, 2001; Pang, Wang, 2014; Баженова, 2021) или даже целом континенте (Duff et al. 1995; Wilkinson et al.

2001). Создана и постоянно пополняется база данных по стоматоцистам Европы. Изучение стоматоцист золотистых водорослей в последнее время становится все более актуальным ввиду их большой индикаторной значимости как в современных озерах и реках, так и при палеоэкологических исследованиях донных отложений в водных объектах (Wilkinson et al., 1999; Firsova et al., 2012). Стоматоцисты золотистых водорослей впервые были обнаружены в 1870 г. с помощью световой микроскопии, но детальное их изучение и выделение морфотипов началось с внедрения технологий электронной микроскопии. Самая первая классификация стоматоцист была основана на бинарной системе К. Линнея, подразделяющая стоматоцисты на 16 искусственных родов, входящих в три семейства. При данной классификации названия, присваиваемые покоящейся стадии, стоматоцисте, и вегетативной стадии не совпадали, что создавало путаницу. Изменение в данную классификацию внес Г. Нигард который предложил использовать для неидентифицированных стоматоцист родовое имя ЦИСТА. Современные классификации морфотипов стоматоцист золотистых водорослей основаны на их форме (круглые, овальные, приплюснутые или иной формы) и типе оболочек (гладкие, пористые, шероховатые, с различными выростами по всей поверхности или на одном из полюсов и т.п.). Каждой стоматоцисте присваивается номер, указаны автор (-ы) и морфологическое описание. Такая система была разработана G. Cronberg и C. D. Sandgren (1986) по поручению международной рабочей группы по изучению статоспор (ISWG).

По классификации, приведенной в Атласе (Wilkinson et al., 2001), стоматоцисты делят на неорнаментированные, орнаментированные, с вмятинами и со сложной (комбинированной) орнаментацией. В каждой из этих групп стоматоцисты подразделяют еще по форме поры, воротничка и выростов. В данной работе приведены наиболее часто встречаемые морфотипы стоматоцист в исследованных водных объектах Большого Алтая, или редкие, встреченные в каком-нибудь одном местообитании.

Из обследованных разнотипных озер Алтая выделяется Телецкое озеро. Его большой объем, наличие литоральных и пелагиальных участков предполагает наличие различных экотопов для развития водорослей в целом и золотистых в том числе. Кроме того, большой по площади водосборный бассейн с многочисленными водотоками может пополнять состав стоматоцист в озере за счет приноса их из более мелких водоемов. Поэтому и разнообразие стоматоцист в этом глубоком озере, находящемся на юге Западной Сибири в горах Алтая (Селегей, Селегей, 1978), самое богатое. На первых этапах изучения стоматоцист в планктоне Телецкого озера нами было выявлено более 60 морфотипов (Баженова и др., 2012) и число их, а иногда и видов, постоянно увеличивается при изучении как самого озера, так и водоемов и водотоков его бассейна. Так, в пробе из Кыгинского залива, литораль (юг Телецкого озера) была обнаружена St. 130, которая в Атласе (Duff et al., 1995) относится к виду *Chrysococcus furcatus* (Dolgoff) Nikcholls (рис. 2), который в составе золотистых водорослей данного водоема ранее не значился. Кроме того, именно по стоматоцистам для озера впервые были определены некоторые виды родов *Paraphysomonas* и *Spiniferomonas*. В целом, для Телецкого озера характерно наличие в основном орнаментированных стоматоцист или гладких, но с выростами разной длины, чаще больше диаметра самой цисты (рис. 2), что, вероятно, способствует лучшему парению в толще воды.

Богатым составом отличаются и озера Джулукуль и Талменье. В оз. Дулукуль встречаются в основном стоматоцисты, гладкие или шероховатые с небольшой орнаментацией в виде невысоких отростков на поверхности, редко, когда отростки бывают больше диаметра цисты (рис. 3).

В оз. Тальменье из необычных морфотипов можно отметить стоматоцисты с широкими лопастными выростами, а также с разветвленными выростами на противоположном от поры полюсе (рис. 4), пока не найденных в известных атласах и публикациях.

Полностью отсутствовали цисты в оз. Кучукском ввиду его очень высокой минерализации воды – по наблюдениям 2000–2016 гг. общая минерализация воды составила 256,0–325,0 г/л (Веснина, 2018), а в р. Кучук, впадающей в озеро было отмечено два морфотипа стоматоцист с гладкой поверхностью. В р. Касмала (у с. Рогозиха, 3.05.2020 г.) по цистам удалось определить виды *Paraphysomonas homolepis* Preisig et Hibberd и *P. punctata* Zimmermann, причем в Атласе (Duff et al. 1995) такие цисты не приведены. Определен и вид *Spiniferomonas cornuta* Balonov, стоматоциста которого очень похожа на St. 174 Zeeb et Smol (Wilkinson et al., 2001), но гребень у нашего экземпляра меньше по высоте (рис. 5). У *S. cornuta* по экватору располагается гребень. Подобная стоматоциста (St. 201 Firsova et Likhoshway) была найдена в донных отложениях Байкала (Фирсова, Лихошвай, 2006), только у нашего экземпляра

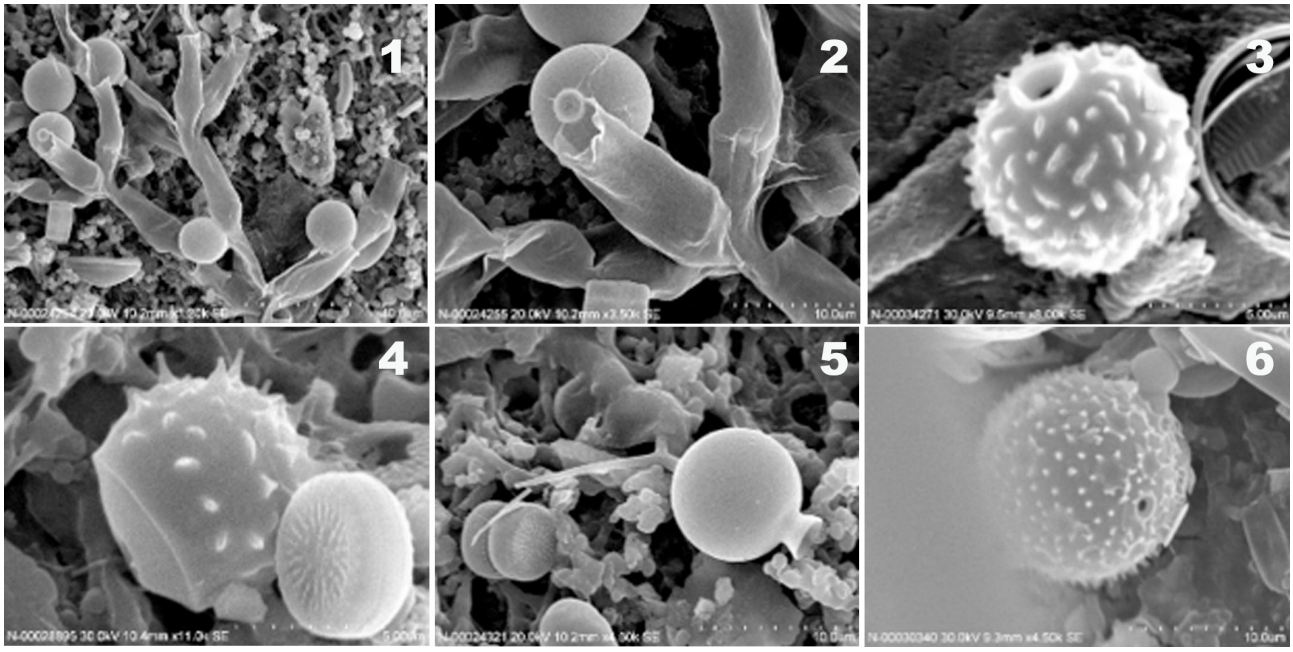


Рис. 2. Колонии *Dinobryon divergens* Imh. с цистами St. 161 Zeeb et Smol (1, 2), примеры орнаментированных цист в фитопланктоне Телецкого озера: St. 111 (*Spiniferomonas triolaris* (Takahashi) Preisig et Hibberd) (3), St. 83 Duff et Smol (вид не известен) (4), St. 130 Duff et Smol (*Chrysococcus furcatus* (Dolgoff) Nikcholls) (5), St. 171 Zeeb et Smol (вид не известен) (6).

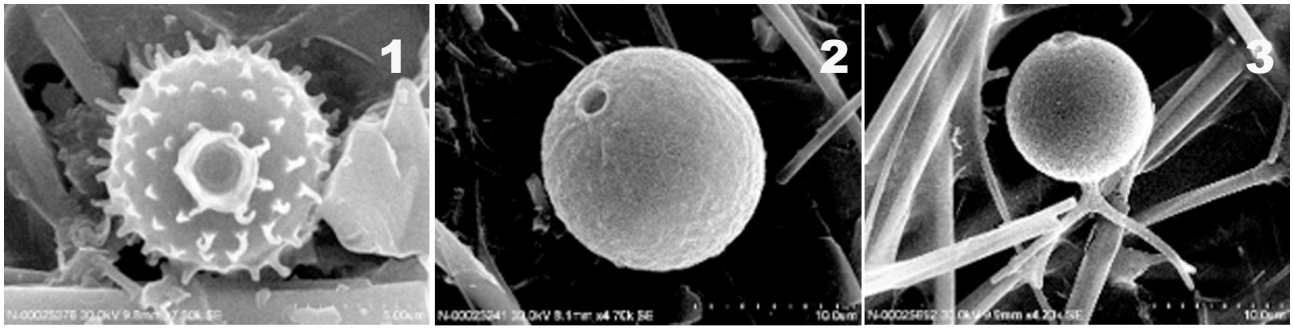


Рис. 3. Стоматоцисты в планктоне оз. Джулукуль, июль 2020 г.: St. ? (1), St. 176 Firsova et Likhoshway (вид не известен) (2), St. 254 Firsova et Likhoshway (вид не известен) (3).

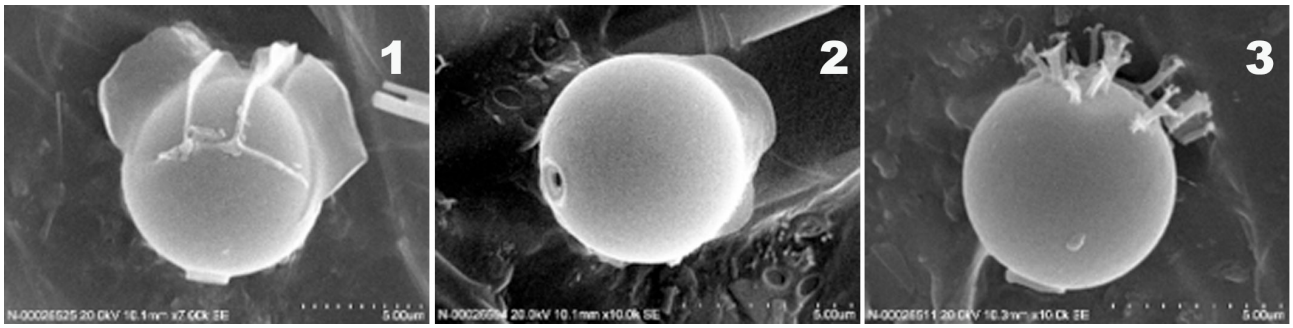


Рис. 4. Стоматоцисты в планктоне оз. Тальменье, июль, 2020 г.: St. ???.

есть еще и воротничок, что отсутствует у байкальского морфотипа. В целом, стоит отметить, что отличительной особенностью водотоков является присутствие в них стоматоцист в основном с гладкой поверхностью, что, вероятно, способствует их большей плавучести и переносу с речным потоком на большие расстояния.

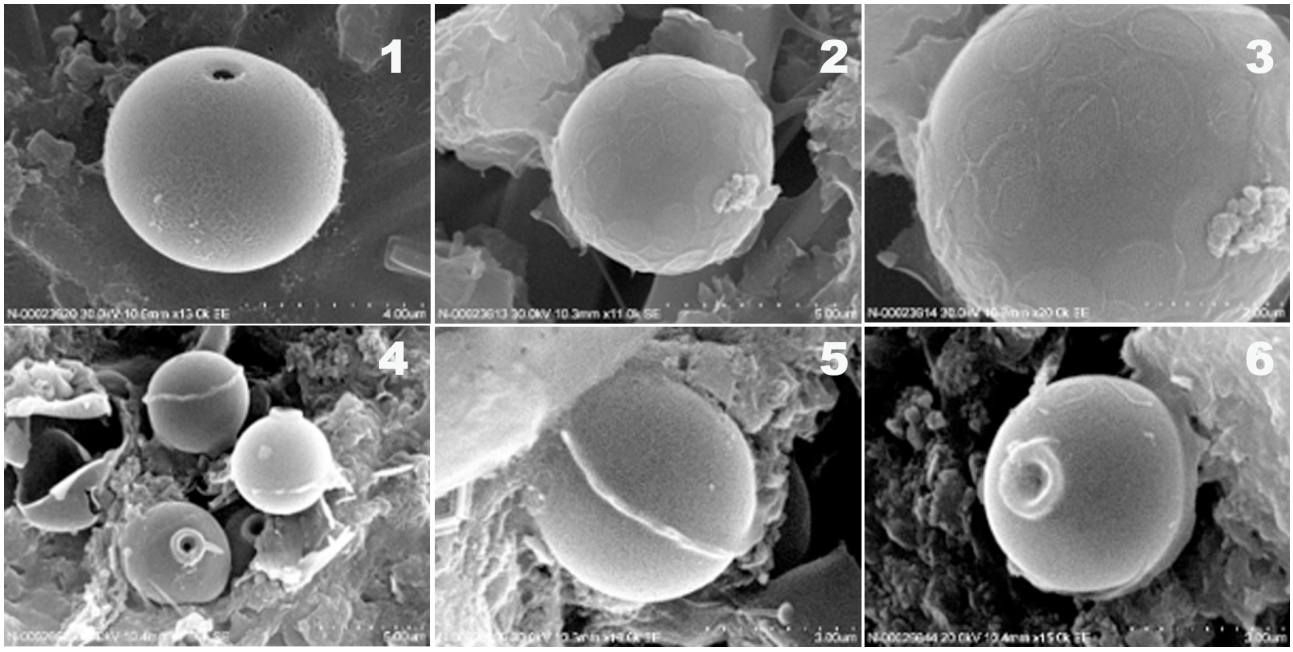


Рис. 5. Стоматоцисты *Paraphysomonas homolepis* Preisig et Hibberd (1) и *P. punctata* Zimmermann (St. ??; 2, 3), *Spiniferomonas cornuta* Balonov (?? St. 174 Zeeb et Smol; 4–6) в планктоне р. Касмалы у с. Рогозиха.

Таким образом, при обследовании разнотипных водоемов и водотоков Большого Алтая, расположенных в разных географических зонах, было выявлено большое разнообразие стоматоцист золотистых водорослей. В Телецком озере, самом глубоком из обследованных водоемов, состав стоматоцист был наиболее богатый ввиду наличия в озере разнообразных экотопов в литорали и пелагиали для развития хризофитов. Присутствовали в основном цисты с орнаментацией и выростами различной длины. Оригинальный состав стоматоцист отмечен в озерах Джулукуль, находящемся в истоке р. Чулышмана, основного притока Телецкого озера, и Талменье в бассейне Верхней Катуни. Цисты в этих водоемах тоже больше имели выросты, но незначительной длины и шероховатую поверхность. Напротив, в речном планктоне чаще присутствовали стоматоцисты с гладкой поверхностью, что, вероятно, позволяет им в речном потоке переноситься дальше.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лабораторий гидрологии и геоинформатики и ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования ИВЭП СО РАН, а также экипажу НИС 209 на Телецком озере за помощь при отборе проб фитопланктона. Работа выполнена в рамках госбюджетного проекта № FUFZ-2026-0005 с использованием научного оборудования ЦКП научно-исслед. судами и электронной микроскопии ИВЭП СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Баженова О. П. Атлас стоматоцист золотистых водорослей из планктона водных объектов Омского Прииртышья. – Омск: Омский ГАУ, 2021. – 122 с.

Баженова, О. П., Митрофанова Е. Ю., Шаховал В. Е. Стоматоцисты хризофитовых водорослей из водных объектов Омского Прииртышья и озера Телецкого (Горный Алтай, Россия) // Сиб. Эколог. журн., 2012. – № 4. – С. 571–578.

Веснина Л. В. Особенности биоты озера Кучукское Алтайского края и факторы формирования запасов артемии (на стадии цист) // Рыбное хозяйство, 2018. – № 4. – 72–78.

Волошко Л. Н. Золотистые водоросли водоемов Севера России. – СПб: Реноме, 2017. – 380 с.

Волошко Л. Н. Экология золотистых водорослей (Chrysophyta) и «цветение» воды // Астраханский вестник экологического образования, 2015. – № 3 (33). – С. 23–27.

Селегей В. В., Селегей Т. С. Телецкое озеро. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 148 с.

Фирсова А. Д., Лихошвай Е. В. Атлас цист хризофитовых водорослей озера Байкал. – Новосибирск: Наука, 2006. – 148 с.

Chrysophyte algae. Distribution, Phylogeny and Development / Ed. By C. D. Sandgren, J. P. Smol, J. Kristiansen. – New

York: Cambridge University Press, 1995. – 399 p.

Cronberg G., Sandgren C. D. A proposal for the development of standardized nomenclature and terminology for chrysophycean statospores // Chrysopytes. Aspects and Problems / Ed. By J. Kristiansen, R. A. Andersen. – New York: Cambrige University Press, 1986. – P. 317–328.

Duff K. E., Zeeb B. A., Smol J. P. Atlas of Chrysophycean cysts. – Dordrecheight: Klüver Academic Publishers, 1995. – 189 p.

Firsova A. D., Vorobyova S. S., Likhoshway Y. V. Chrysophycean stomatocysts in the upper pleistocene and holocene sediments from Lake Hovsgol, Northern Mongolia // International Journal of Geosciences, 2012 – No. 3. – P. 664–674. https://doi.org/10.4236/ijg.2012.34067

Malygina N., Mitrofanova E., Kuryatnikova N., Biryukov R., Zolotov D., Pershin D., Chernykh D. Microplastic Pollution in the Surface Waters from Plain and Mountainous Lakes in Siberia, Russia // Water, 2021. – Vol. 13. – P. 2287. https://doi.org/10.3390/w13162287

Pang W., Wang Q. Chrysophycean stomatocysts from the Aershan Geological Park (Inner Mongolia), China // Phytotaxa, 2014. – Vol. 187, No. 1. – P. 1–92. https://doi.org/10.11646/phytotaxa.187.1.1

Pla S. Chrysophycean cyst from the Pyrenees // Bibl. Phycol., 2001. – Vol. 109. – P. 1–179.

Wilkinson A. N., Zeeb B. A., Smol J. P. Atlas of Chrysophycean cysts. Vol. II. – Klüver: Academic Publishers, Dordrecht, 2001. – 169 p.