

Дополнительные сведения о наземных харофитовых (Charophyta) микроводорослях Байкальского региона и прилегающих территорий

Additional data about terrestrial charophytes in the Baikal Region and surrounding areas

Егорова И. Н.¹, Кулакова Н. В.¹, Болдина О. Н.²

Egorova I. N.¹, Kulakova N. V.¹, Boldina O. N.²

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Россия. E-mail: egorova@sifibr.irk.ru
¹Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

²Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: boldina@binran.ru

²Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

Реферат. Изучение с помощью методов молекулярной генетики наземных микроводорослей отдела Charophyta изменило представления об эволюции и филогенетических отношениях высших растений. В качестве ближайших их родственников рассматриваются не сложно организованные макроскопические водоросли класса Charophyceae, а преимущественно микроорганизмы, в том числе способные к конъюгации из класса Zygnemophyceae. Это заставило по-новому взглянуть на необходимость изучения водорослей отдела, особенно наземных обитателей. В статье приводятся сведения о наземных микроводорослях из отдела Charophyta, найденных в Байкальском регионе и сопредельных территориях. Они принадлежат трем классам отдела: Chlorokybophyceae, Klebsormidiophyceae и Zygnemophyceae. По разнообразию известных для наземных экосистем региона представителей классы ранжируют в обратном порядке. Приводятся новые сведения о находках водорослей родов *Mesotaenium* (Zygnemophyceae), *Klebsormidium*, *Interfilum* и *Streptosarcina* (Klebsormidiophyceae). Представители *Mesotaenium* преимущественно одноклеточные водоросли, часто с мощной слизистой оболочкой, окраска которой может варьировать в зависимости от условий окружающей среды. Они заметны невооруженным глазом в виде слизистых разрастаний на различных наземных субстратах в условиях повышенной влажности. Другие три рода объединяют микроскопические водоросли, образующие пакеты клеток (*Interfilum*) и/или ветвящиеся (*Interfilum*, *Streptosarcina*) и неветвящиеся нити (*Klebsormidium*). В природе можно наблюдать зеленые налеты *Klebsormidium* на поверхности почвы и камней. Впервые сообщается о нахождении *Streptosarcina* в Азиатской России.

Ключевые слова. Байкальский регион, география, наземные зеленые микроводоросли, разнообразие, Charophyta.

Summary. The study of terrestrial microalgae of the phylum Charophyta using molecular genetics methods has changed the understanding of the evolution and phylogenetic relationships of higher plants. Their closest relatives are not complexly organized macroscopic algae of the class Charophyceae but mainly microorganisms capable of conjugation from the class Zygnemophyceae. The study of terrestrial Charophyta is of great evolutionary interest. The article provides information about terrestrial microalgae from the division Charophyta found in the Baikal Region and adjacent territories. They belong to three classes of the division: Chlorokybophyceae, Klebsormidiophyceae and Zygnemophyceae. According to the diversity of representatives known for terrestrial ecosystems in the region, the classes are ranked in reverse order. New information is provided on the findings of algae of the genera *Mesotaenium* (Zygnemophyceae), *Klebsormidium*, *Interfilum* and *Streptosarcina* (Klebsormidiophyceae). Representatives of *Mesotaenium* are predominantly unicellular algae with a strong mucous sheath, the color of which can vary depending on environmental conditions. They are visible to the naked eye in the form of mucous growths on various terrestrial substrates in conditions of high humidity. The other three genera combine microscopic algae that form cell packets (*Interfilum*) and/or branching (*Interfilum*, *Streptosarcina*) and non-branching filaments (*Klebsormidium*). In nature, green *Klebsormidium* overgrowth can be observed on the surface of soil and rocks. For the first time, *Streptosarcina* has been reported in Asian Russia.

Key words. Baikal Region, Charophyta, diversity, geography, terrestrial green microalgae.

В работе приводятся сведения о водорослях отдела Charophyta, обнаруженных в наземных экосистемах Иркутской области, Республики Бурятия, Забайкальского края, севера Монголии (входят в состав Байкальского региона), юга Красноярского края и Республики Якутия, Тыва, Алтай. Данные обобщены за период с 1970 по 2025 гг., частично опубликованы (Егорова и др., 2020).

В составе наземной альгофлоры территории насчитывается около 50 видов из 18 родов этого отдела (Егорова и др., 2020). Ряд видов обнаружены только в условиях повышенного увлажнения, в почвах или на субстратах, функционирующих вблизи временных или постоянных источников воды (водоемов, термальных и минеральных источников, луж). Это водоросли класса Zygnemophyceae из родов *Actinotaenium*, *Closterium*, *Cosmarium*, *Mougeotia*, *Parapediasium*, *Penium*, *Pseudopediasium*, *Spirogyra*. В местах, где единственный источник влаги атмосферные осадки, способны развиваться представители Chlorokybophyceae (*Chlorokybus atmophyticus* Geitler), Klebsormidiophyceae (виды родов *Klebsormidium* и *Interfilum*) и Zygnemophyceae (*Cosmarium*, *Cylindrocystis*, *Gonatozygon*, *Mesotaenium*, *Spirotaenia*). В снежном покрове высокогорий найдена *Ancylonema nordenskioldii* Berggr. (Zygnemophyceae). Несмотря на имеющиеся данные, эта группа наземных водорослей слабо изучена в регионе и не была в фокусе внимания альгологических изысканий. В настоящем сообщении мы ограничимся сведениями о некоторых водорослях классов Klebsormidiophyceae (клебсормидиевые) и Zygnemophyceae (зигнемовые).

К одним из часто встречающихся представителей зигнемовых водорослей в наземных биотопах территории принадлежат виды рода *Mesotaenium* Nägeli. Насчитывается около 70 видовых и внутривидовых таксонов в составе рода (Bush, Hess, 2022). Этот род объединяет одноклеточные водоросли с преимущественно эллипсоидными или цилиндрическими клетками, пластинчатым или лентовидным хлоропластом, содержащим один или несколько пиреноидов. Клетки могут быть погружены в слизь и собраны в колонии, при массовом развитии хорошо заметные невооруженным взглядом на различных субстратах во влажных и тенистых местах. Молекулярно-генетические исследования выявили, что род полифилетичен (Gontcharov, 2008; Gontcharov, Melkonian, 2010; Busch, Hess, 2021; Procházková et al., 2021; Busch, Hess, 2022; Hess et al., 2022). Установлено несколько независимых генетических линий *Mesotaenium*-подобных водорослей в составе класса, которые, вероятно, должны быть описаны как новые родовые таксоны. На основе полученных данных также был выделен род *Serritaenia* A. Busch et S. Hess и описан новый вид в составе рода *Ancylonema* Berggr. (Busch, Hess, 2021; Procházková et al., 2021). Для региона исследований известно четыре представителя рода в его традиционном понимании: *Mesotaenium berggrenii* (Witt.) Lagerh., *M. chlamydosporum* de Bary, *M. endlicherianum* Nägeli, *M. macrococcum* (Kütz. ex Kütz.) Roy et Bisset (Егорова и др., 2020). Их видовая принадлежность установлена на основе изучении морфологии; молекулярные исследования этой группы не проводились. С учетом имеющихся данных, можно предположить, что в наземной альгофлоре региона присутствуют и виды рода *Serritaenia*. Авторы этого рода отметили способность его членов к образованию слизистых оболочек, окрашенных в разные цвета: от черного до голубого, ярко-красного или коричневого. В природных образцах мы находили *Mesotaenium*-подобные водоросли с серо-голубыми и коричневыми слизистыми оболочками. Ранее было показано, что цвет оболочек отчасти может зависеть от кислотности окружающей среды (Busch, Hess, 2021). В горной тайге Хэнтейского нагорья (Забайкальский край) нами был обнаружен представитель с серо-голубыми слизистыми оболочками, который зарегистрирован как *Mesotaenium cf. macrococcum* (Kütz. ex Kütz.) var. *minus* De Bary et Compére (Егорова, 2015). Водоросьль была найдена среди других криптогамных организмов (цианобактерий, мхов и лишайников), развивающихся на обнаженном корешке дерева. В горных лесах Восточного Саяна на поверхности гранитных глыб и эпилитных мхах отмечен *Mesotaenium macrococcum* (Kützing ex Kützing) Roy et Bisset с окрашенной в различные оттенки коричневого слизью.

Из числа клебсормидиевых водорослей в наземных биотопах территории исследований зарегистрированы представители трех родов: *Klebsormidium* P. C. Silva et al., *Interfilum* Chodat emend. Mikhailyuk al. и *Streptosarcina* Mikhailyuk et Lukšová. Наиболее часто встречаются нитчатые водоросли рода *Klebsormidium*. Известно более 20 видов в составе этого рода. Для рассматриваемой территории имеются сведения о нахождении следующих видов: *K. dissectum* (F. Gay) H. Ettl et G. Gärtner, *K. flaccidum* (Kütz.) P. C. Silva, Mattox et W. H. Blackw., *K. fluitans* (F. Gay) Lokhorst, *K. montanum* (Hansg.) Shin Watan., *K. nitens* (Kütz.) Lokhorst, *K. pseudostichococcus* (Heering) H. Ettl et G. Gärtner, *K. rivulare* (Kütz.) M. O. Morison et Sheath, *K. subtile* (Kütz.) Mikhailyuk et al. Кроме того, еще ряд представителей нуждаются в уточнении их видовой принадлежности (Егорова и др., 2020). Наиболее часто в регио-

нальных эколого-флористических исследованиях регистрировали три вида: *K. dissectum*, *K. flaccidum* и *K. nitens*. Согласно молекулярно-генетическим исследованиям, эти виды принадлежат двум кладам рода: *K. flaccidum* к кладе В/С, *K. dissectum* и *K. nitens* к кладе Е (Mikhailyuk et al., 2015). Авторские молекулярно-генетические изыскания подтвердили присутствие вида *K. flaccidum* в условиях сухой степи и лесостепи Байкальского региона и выявили его принадлежность к кладе В (неопубликованные данные). Представители клады В/С рассматриваются как более приспособленные к ксерофитным местообитаниям, тогда как клады Е – более типичны для влажных и тенистых мест (Mikhailyuk et al., 2015). Предварительные данные согласуются с известными для рода, однако, необходимы исследования этого рода с изучением большого количества штаммов из разных мест.

На различных наземных субстратах развиваются клебсормидиевые водоросли рода *Interfilum*. Это нитчатые и образующие пакеты клеток организмы. В составе рода описано три вида: *Interfilum massjukiae* Mikhailyuk et al., *J. paradoxum* Chodat et Topali, *J. terricola* (J. B. Petersen) Mikhailyuk et al. (Mikhailyuk et al., 2008). Они приводятся и для наземной альгофлоры региона; их видовая принадлежность установлена на основе изучения морфологии. В ходе исследований водорослей почв степных и лесных сообществ Приморского хребта, юго-западное побережье озера Байкал, нами были зарегистрированы водоросли рода *Streptosarcina*. В настоящее время этот род содержит только два вида, известных из Восточной Европы и Центральной Америки (Mikhailyuk et al., 2018). Водоросли рода морфологически сходны с представителями двух выше упомянутых родов. На генетическом уровне они далеко от них отстоят и родственны представителям рода *Hormidiella* M. O. P. Iyengar et Kanth. emend. Mikhailyuk et Lukšová, нитчатым неветвящимся водорослям, споры которых прорастают с образованием слизистой ножки. *Streptosarcina* впервые приводится для Азиатской России. Молекулярно-генетические исследования обнаружили, что найденные нами водоросли представляют собой независимую эволюционную линию.

ЛИТЕРАТУРА

Егорова И. Н. О наземных водорослях нагорья Хэнтэй // Экосистемы Центральной Азии в современных условиях социально-экономического развития: Материалы междунар. конф. (8–10 сентября 2015 г.), г. Улан-Батор, Монголия. – Улан-Батор, 2015. – С. 100–103.

Егорова И. Н., Судакова Е. А., Максимова Е. Н., Тупикова Г. С. Наземные водоросли гор Южной Сибири и Северной Монголии // Ботан. журн., 2020. – Т. 105, № 2. – С. 107–132. <https://doi.org/10.31857/S0006813620020027>

Busch A., Hess S. Sunscreen mucilage: A photoprotective adaptation found in terrestrial green algae (Zygnematophyceae) // Eur. J. Phycol., 2021. – Vol. 57, № 1. – P. 1–18. <https://doi.org/10.1080/09670262.2021.1898677>

Busch A., Hess S. A diverse group of underappreciated zygnematophytes deserves in-depth exploration // Appl. Phycol., 2022. – Vol. 3, № 1. – P. 306–323. <https://doi.org/10.1080/26388081.2022.2081819>

Hess S., Williams S. K., Busch A., Irisarri I., Delwiche C. F., de Vries S., Darienko T., Roger A. J., Archibald J. A., Buschmann H., von Schwartzenberg K., de Vries J. A phylogenomically informed five-order system for the closest relatives of land plants // Curr. Biol., 2022. – Vol. 32. – P. 4473–4482. e7. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.08.022>

Gontcharov A. A. Phylogeny and classification of Zygnematophyceae (Streptophyta): Current state of affairs // Fottea, 2008. – Vol. 8. – P. 87–104.

Gontcharov A. A., Melkonian M. Molecular phylogeny and revision of the genus *Netrium* (Zygnematophyceae, Streptophyta): *Nucleotaenium* gen. nov. // J. Phycol., 2010. – Vol. 46. – P. 346–362. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2010.00814.x>

Mikhailyuk T. I., Sluiman H. J., Massalski A., Mudimu O., Demchenko E. M., Kondratyuk S. Y., Friedl T. New streptophyte green algae from terrestrial habitats and an assessment of the genus *Interfilum* (Klebsormidiophyceae, Streptophyta) // J. Phycol., 2008. – Vol. 44. – P. 1586–1603. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2008.00606.x>

Mikhailyuk T., Glaser K., Holzinger F., Karsten U. Biodiversity of Klebsormidium (Streptophyta) from alpine biological soil crusts (Alps, Tyrol, Austria, and Italy) // J. Phycol., 2015. – Vol. 51, № 4. – P. 750–767. <https://doi.org/10.1111/jpy.12316>

Mikhailyuk T., Lukesova A., Glaser K., Holzinger A., Obwegeser S., Nyporko S., Friedl T., Karsten U. New taxa of streptophyte algae (Streptophyta) from terrestrial habitats revealed using an integrative approach // Protist, 2018. – Vol. 169. – P. 406–31. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2018.03.002>

Procházková L., Řezanka T., Nedbalová L., Remias D. Unicellular versus filamentous: The glacial alga *Ancylonema alaskana* comb. et stat. nov. and its ecophysiological relatedness to *Ancylonema nordenskiöldii* (Zygnematophyceae, Streptophyta) // Microorganisms, 2021. – Vol. 9, № 1103. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9051103>