

ФИТОПЛАНКТОН,
ФИТОБЕНТОС, ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 574.52+574.58+535.341

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ
КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ВОДОЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2021 г. Г. В. Винокурова^а, *, И. А. Суторихин^а, А. А. Коломейцев^а, И. М. Фроленков^а

^аИнститут водных и экологических проблем, Сибирское отделение Российской академии наук, Барнаул, Россия

*e-mail: kimg@iwep.ru

Поступила в редакцию 05.12.2018 г.

После доработки 20.11.2019 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

В марте, августе 2017 г. и феврале 2018 г. исследованы состав, развитие, распределение фитопланктона и гидрооптические характеристики мезотрофного бессточного оз. Красиловское (Алтайский край, Россия). В составе ФП обнаружено 147 таксонов рангом ниже рода. Зимой при высоте снежного покрова 0.13–0.34 м, толщине льда 0.56–0.70 м и температуре воды 0.1–4.5°C численность фитопланктона составила 0.03–1.06 млн кл./л, биомасса 0.2–12.2 г/м³, содержание Хл *a* 1.8–24.1 мг/м³. Летний фитопланктон характеризовался более высокими показателями развития (0.11–1.74 млн кл./л, 0.6–18.2 г/м³, 27.5–83.4 мг/м³ Хл *a*). Выявлена связь коэффициентов поглощения света в диапазоне 400–460 и 670–800 нм с содержанием Хл *a*, в диапазоне 520–580 нм – с общей численностью фитопланктона, что свидетельствует об активном фотосинтезе водорослей не только в летний, но и в подледный период.

Ключевые слова: летний и зимний фитопланктон, хлорофилл *a*, коэффициент поглощения света, оз. Красиловское

DOI: 10.31857/S0320965221010162

ВВЕДЕНИЕ

Экология ФП континентальных водоемов в период открытой воды считается одним из наиболее изученных аспектов функционирования водных экосистем (Wetzel, 2001). Значительно меньше сведений относится к подледному периоду, хотя водоемы северного полушария покрыты льдом 2–8 месяцев в году. Интенсивное развитие водорослей планктона и криофитона под слоем льда и снега выявлено в водоемах умеренных и арктических широт (Wright, 1964; Foy, Gibson, 1982; Терешенкова, 1983; Ермолаев, Науменко, 1992; Науменко, Нечаева, 2000; Phillips, Fawley, 2002; Бондаренко, 2009; Оглы, 2009; Корякина, 2009; Veillette et al., 2010; Кутько, 2012; Dokulil et al., 2014; Баженова, Михайлов, 2015; Лабунская, Бухарицин, 2015; Халиуллина, Яковлев, 2015; Ривьер, 2016). Однако динамика структуры ФП в толще воды в период ледостава остается мало изученной (Vanderploeg et al., 1992; Pasztaleniec, Leonard, 2008; Могильникова и др., 2009; Ташлыкочева, 2011; Bertilsson et al., 2013). При исследовании

морских арктических и антарктических акваторий широко используют гидрооптические методы. Получаемые *in situ* в реальном масштабе времени первичные гидрооптические характеристики используют для анализа биооптической структуры водной толщи и состояния биологических сообществ (Шоларь, Ли, 2018). На континентальных водоемах эти методы распространены в меньшей степени, в связи с чем очевидна необходимость их апробации при исследовании функционального состояния пресноводного фитопланктона. В качестве модельного водоема выбрано оз. Красиловское, на берегу которого располагается учебно-научная база Алтайского государственного университета. Поскольку озеро бессточное, вынос или привнесение аллохтонных видов водорослей сведены к минимуму, и состояние ФП полностью зависит от внутриводоемных процессов.

Цель работы – исследование структуры, обилия и функционального состояния ФП оз. Красиловское в периоды летней и зимней межени с использованием альгологических и гидрооптических методов.

Сокращения: ФП – фитопланктон, Хл *a* – хлорофилл *a*, ϵ – коэффициент поглощения света, ПО – перманганатная окисляемость.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения проводили 14 марта, 2 августа 2017 г. и 20 февраля 2018 г. на станции глубиной 6 м. Пробы отбирали батометром Руттнера от поверхности до дна с интервалом 1 м. Фитопланктон концентрировали прямой фильтрацией через мембранные фильтры Владипор МФАС-ОС-3 с диаметром пор 0.8 мкм и фиксировали 4%-ным формалином. Подсчет клеток водорослей проводили под световым микроскопом ($\times 650$) в камере Нажотта объемом 0.01 мл (Руководство..., 1992). В доминирующий комплекс включены виды с численностью и биомассой $\geq 10\%$ общей численности и/или биомассы. Таксономия водорослей приведена в соответствии с современной международной номенклатурой (Guiry, Guiry, 2018). Для оценки сходства качественного состава водорослей использовали коэффициент Серенсена, для оценки видового разнообразия – индекс Шеннона, рассчитанный по численности (Леонтьев, 2008), экологические и географические характеристики водорослей взяты из работы (Баринова и др., 2006).

Содержание Хла определяли стандартным спектрофотометрическим методом (SCOR-UNESCO, 1966), температуру воды – прибором ДИТЦ–10/05 (Зуев и др., 2014), прозрачность – по диску Секки. Коэффициент поглощения света (ϵ) измеряли на спектрофотометре ПЭ-5400УФ в 1-см кварцевых кюветах в диапазоне длин волн 400–800 нм и рассчитывали по формуле

$$\epsilon_{\lambda} = (1/L) \ln (I_{0\lambda}/I_{\lambda}),$$

где L – длина кюветы, $I_{0\lambda}$ и I_{λ} – интенсивность светового потока, прошедшего соответственно через дистиллированную и природную воду, при длине волны λ .

Оз. Красиловское ($53^{\circ}18'13''$ с.ш., $83^{\circ}36'16''$ в.д.) расположено на надпойменной террасе правого берега р. Обь на высоте 220 м над у.м. Площадь водосбора составляет 46.1 км², площадь водного зеркала 0.8 км², средняя глубина – 2.7 м, максимальная – 6.5 м (Суторихин и др., 2016). Дно покрыто мощным слоем бурого ила (Малолетко, 2006). Вода озера гидрокарбонатно-кальциевая с минерализацией 31.6–55.4 мг/дм³, рН 7.15–8.72, ПО 6.65–9.16 мг О/дм³. Низкая минерализация поддерживается за счет обильных атмосферных осадков (в среднем 500 мм/год) и значительной доли подземных вод в питании озера (Модина, Сухова, 2007). Содержание фосфора фосфатов (0.01–0.08 мг Р/дм³) в подледный период выше, чем летом. Содержания нитритного, нитратного и аммонийного азота составляет соответственно 0.006–0.062, 0.09–0.12 и 0.18–0.71 мг N/дм³ (Долматова, 2016). Трофический статус озера варьирует от мезотрофного до эвтрофного.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Летом при прямой термической стратификации температура воды в озере снижалась от 24.2°C у поверхности до 13.6°C у дна, а в подледный период при обратной стратификации соответственно увеличивалась от 0.1–0.3 до 4.1–4.5°C (рис. 1). Высота снежного покрова составляла 0.34 м в феврале и 0.13 м в марте, толщина льда – 0.56 м и 0.70 м. При прозрачности воды 1.25 м в августе фотический слой не превышал 3.0–3.5 м.

При ослаблении светового потока толщей воды коэффициент поглощения световых волн увеличивался с глубиной в 3.5–4.1 раза. Свет в синей области спектра поглощался озерной водой более интенсивно, чем в желто-зеленой и красной. Величины ϵ для различных участков спектра значительно различались в августе и марте, но существенно увеличивались в феврале (рис. 2, табл. 1).

В составе фитопланктона оз. Красиловское обнаружено 147 таксонов рангом ниже рода, относящиеся к семи отделам. Ведущую позицию занимают зеленые водоросли Chlorophyta (51.1% общего видового состава), далее следуют Cyanoprocarota (18.4%), Bacillariophyta (12.8%), Euglenophyta (9.2%), Ochrophyta (3.5%), Cryptophyta (2.8%) и Dinophyta (Miozoa) (2.1%). Наибольшее число видов (более 100) встречено в августе, вдвое меньшее – в феврале и марте (56 и 52). Индекс видового разнообразия соответственно снижался от 3.79 до 3.20 и 2.10 бит/экз. Большинство таксонов с известным географическим распространением – космополиты (46.0% общего состава), 4.1% – бореальные виды, географическая приуроченность остальных видов не выявлена.

В летний период разнообразно представлены зеленые водоросли из родов *Scenedesmus* (16 видов и разновидностей), *Monoraphidium* (6), *Raphidocelis* (3), *Staurodesmus* (3 вида), многие из которых достигали массового развития (табл. 2). В состав доминирующего комплекса входили также цианопрокариоты *Microcystis aeruginosa* и неидентифицированные мелкие формы с диаметром клеток 1–3 мкм. *Chroomonas coerulea* из криптофитов отмечен в большом количестве на глубине 4 м. В состав доминирующих по биомассе видов входила редко встречающаяся крупноклеточная *Euglena hemichromata*. Подвижные жгутиковые водоросли (*Chlamydomonas*, *Euglena*, *Lepocinclis*, *Trachelomonas*, *Phacus*, *Glenodinium*, *Cryptomonas*, *Chroomonas*) и подвижные нитчатые цианопрокариоты (*Spirulina*, *Chrysochloris*, *Oscillatoria*, *Lyngbya*) встречаются во всей толще воды от поверхности до дна. Их состав наиболее разнообразен на глубине 2–5 м (10–14 видов), а в верхних слоях и у дна число подвижных водорослей примерно в два раза меньше (5–8 видов).

Численность водорослей увеличивалась с глубиной, достигая максимальной у дна за счет зеле-

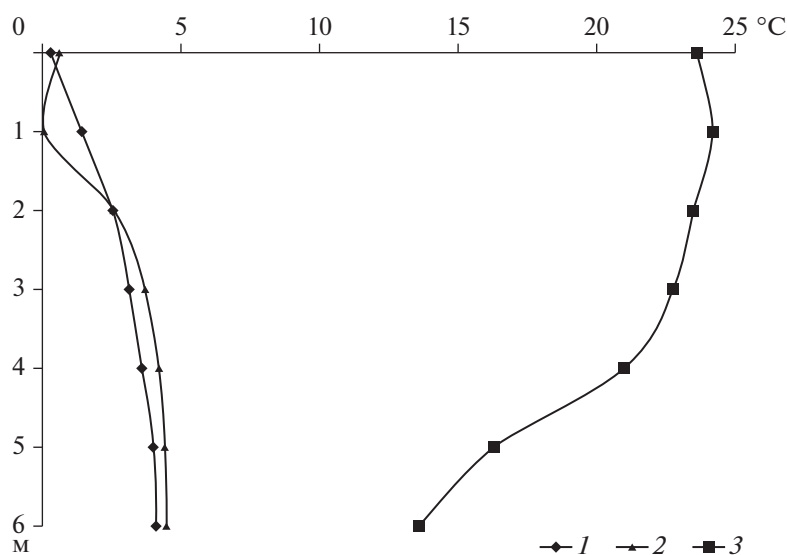


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры воды в оз. Красиловское в периоды исследования. По оси ординат – глубина, по оси абсцисс – температура. 1 – февраль, 2 – март, 3 – август.

ных, криптофитовых водорослей и цианопрокариот. Высокая биомасса отмечена на глубине 3 и 6 м. Содержание Хл *a* также увеличивалось с глубиной, но не совпадало с пиками численности и биомассы (табл. 2, рис. 3). Среднеценотический объем клеток составил 2261 мкм³.

В зимнем фитопланктоне наиболее разнообразно представлен род *Scenedesmus* – 9 таксонов в феврале и 7 в марте. В феврале в состав доминирующего комплекса входили цианопрокариоты, зеленые, эвгленовые, диатомовые, золотистые и

криптофитовые водоросли (табл. 2). Крупноклеточные *Chlamydomonas* sp. и *Trachelomonas* sp. доминировали по биомассе в верхних слоях. В пробах обнаружены пустые створки диатомовых (11 из 16 видов) и пустые клеточные оболочки зеленых водорослей *Scenedesmus*, *Tetraëdron*, *Pediastrum*, количество которых увеличивалось ко дну. Присутствовали также водоросли из разных отделов, которые не удалось идентифицировать до вида. В феврале их численность была максимальной. Часть клеток находилась в стадии покоя в виде

Таблица 1. Обилие ФП и гидрооптические показатели воды оз. Красиловское в периоды наблюдения (над чертой пределы, под чертой среднее)

Показатель	Август	Февраль	Март
Численность, тыс. кл./л	65.3–738	48.8–141	26.4–1056
	278	95.3	328
Биомасса, г/м ³	0.6–18.2	0.2–5.3	0.8–12.2
	5.6	1.7	3.4
Хл <i>a</i> , мг/м ³	0.6–18.2	1.8–6.8	3.1–24.1
	5.6	4.7	9.0
Объем клетки, мкм ³	1.8–126 × 10 ⁴	0.5–33.5 × 10 ⁴	0.5–22.1 × 10 ⁴
	2261	1716	1058
ε _{400–460} , м ⁻¹	4.3–19.0	6.1–33.8	2.0–19.8
	8.7	20.7	7.5
ε _{520–580} , м ⁻¹	2.5–9.4	5.5–33.4	0.9–10.9
	5.0	16.5	4.6
ε _{670–800} , м ⁻¹	1.8–6.2	6.7–26.9	0.8–7.5
	3.8	14.1	4.3

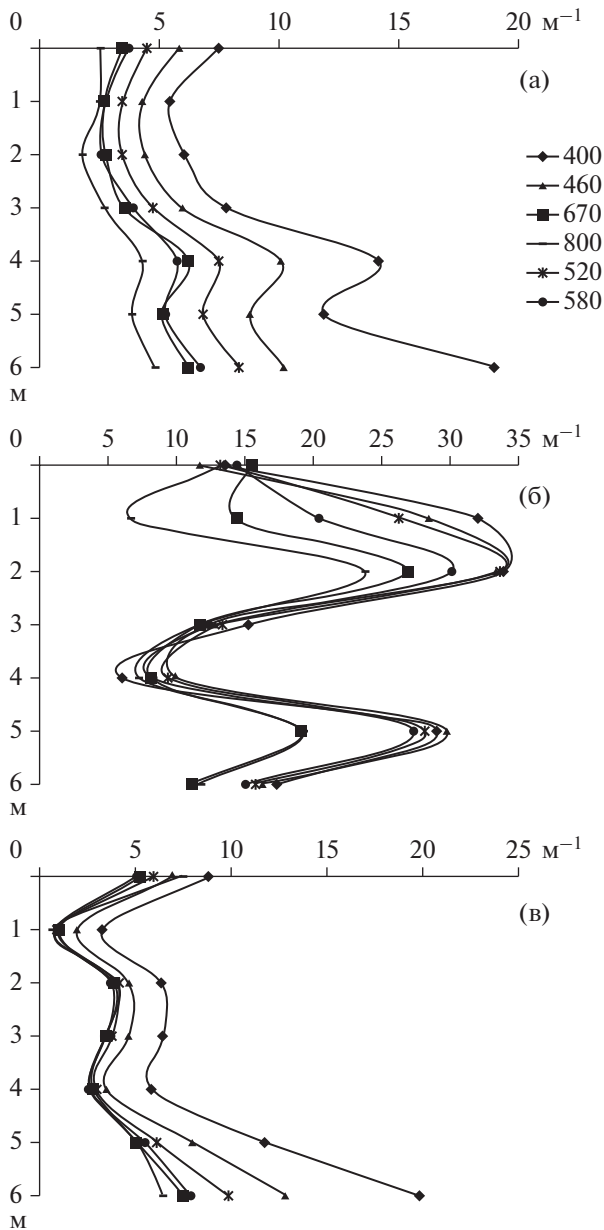


Рис. 2. Вертикальное распределение коэффициента поглощения световых волн (ϵ) разной длины в оз. Красиловское в августе (а), феврале (б) и марте (в). По оси ординат – глубина, по оси абсцисс – ϵ .

цист. Во всей толще воды встречались подвижные жгутиковые водоросли (*Chlamydomonas* sp., *Lepocinclis acus* (O.F. Müller) B. Marin & Melkonian, *Euglena deses* Ehr., *Trachelomonas* sp., *T. volvocina* (Ehr.) и нитчатые цианопрокариоты (*Spirulina* sp., *Anabaena* sp.). Подвижные криптофитовые и золотистые водоросли отмечены ниже глубины 2 м. В марте во всей толще воды доминировали цианопрокариоты. Жгутиковые *Euglena deses*, *Trachelomonas hispida* (Perty) F. Stein, *T. conica* Playfair встречались подо льдом до глубины 2 м, а подвижные

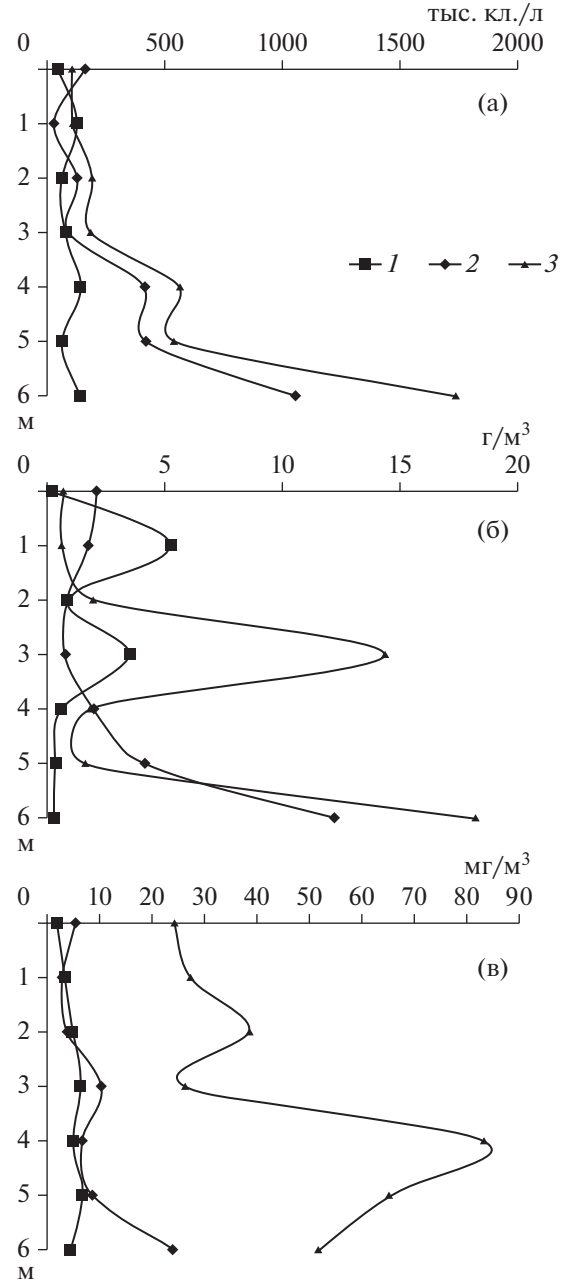


Рис. 3. Вертикальное распределение численности (а), биомассы фитопланктона (б) и содержания Хл а (в) в оз. Красиловское в феврале (1), марте (2) и августе (3). По оси ординат – глубина, по оси абсцисс – показатели обилия.

нитчатые *Spirulina* sp. *Oscillatoria* sp., *Anabaena macrospora* Klebahn – на глубине 3–6 м. У дна отмечены и те, и другие виды.

Зимний фитопланктон озера сформирован более мелкими формами, чем летний, со среднецеллюлярным объемом клеток 1716 и 1058 μm^3 в феврале и в марте. Показатели развития подледного фитопланктона были ниже, чем летом. Ми-

Таблица 2. Структура доминирующего комплекса фитопланктона оз. Красиловское в зимний и летний период (в скобках % общей численности/биомассы)

Глубина, м	Доминирующие виды	
	по численности	по биомассе
Февраль 2018 г.		
0	<i>Anabaena</i> sp. (34), <i>Achnanthes</i> sp. (15)	<i>Chlamydomonas</i> sp. (30), <i>Trachelomonas</i> sp. (23)
1	<i>Microcystis pulverea</i> (H.C. Wood) Forti. (64)	<i>M. pulverea</i> (90)
2	НИД мелкие цианобактерии (20), <i>Microcystis</i> sp. (14), <i>Gloeocapsa</i> sp. (10), <i>Trachelomonas</i> sp. (10)	<i>M. pulverea</i> (48), <i>Trachelomonas</i> sp. (11)
3	<i>M. pulverea</i> , <i>Cyanothece aeruginosa</i> (Näg.) Kom. (18), <i>Monoraphidium komarkovae</i> Nygaard (11)	<i>M. pulverea</i> (51), <i>Microcystis aeruginosa</i> (Kütz.) Kütz. (42)
4	<i>Hyaloraphidium contortum</i> Pascher & Korshikov in Korshikov (15), <i>M. komarkovae</i> (14)	НИД золотистые (22), НИД криптофитовые (15), цисты зеленых (11), <i>Fragilaria</i> sp. (9)
5	<i>M. aeruginosa</i> , <i>Scenedesmus caudato-aculeolatus</i> var. <i>spinosus</i> (Deduss.) Pankow (15), <i>Dictyosphaerium subsolitarium</i> Van Goor (15), <i>H. contortum</i> (14), <i>M. komarkovae</i> (13)	<i>M. aeruginosa</i> (30), НИД динофитовые (29), <i>Pseudopediastrum boryanum</i> (Turpin) E. Hegewald (10)
6	<i>M. aeruginosa</i> (39), <i>Chroococcus vacuolatus</i> Skuja (37)	<i>Microcystis</i> sp. (58), <i>M. aeruginosa</i> (12)
Март 2017 г.		
0	<i>Gomphosphaeria lacustris</i> Chodat (97)	<i>G. lacustris</i> (57), <i>Cyanodictyon reticulatum</i> (Lemmermann) Geitler (40)
1	<i>G. lacustris</i> (99)	<i>G. lacustris</i> (97)
2	<i>M. pulverea</i> (47), <i>G. lacustris</i> (46)	<i>M. pulverea</i> (57), <i>G. lacustris</i> (31)
3	<i>G. lacustris</i> (82), <i>M. pulverea</i> (17)	<i>M. pulverea</i> (92)
4	<i>G. lacustris</i> (83), <i>M. pulverea</i> (16)	<i>M. pulverea</i> (95)
5	<i>G. lacustris</i> (59), <i>M. pulverea</i> (40)	<i>M. pulverea</i> (94)
6	<i>G. lacustris</i> (74), <i>M. pulverea</i> (24)	<i>G. lacustris</i> (56), <i>M. pulverea</i> (41)
Август 2017 г.		
0	НИД мелкие цианобактерии (17), <i>Scenedesmus caudato-aculeolatus</i> var. <i>spinosus</i> (12), <i>Coelastrum astroideum</i> De Notaris (10)	<i>Euglena hemichromata</i> Skuja (16), <i>M. pulverea</i> (16), <i>Staurastrum saltator</i> Grönblad (10), <i>Pediastrum duplex</i> Meyen (9)
1	<i>P. duplex</i> (25), <i>Mucidosphaerium pulchellum</i> (H.C. Wood) C. Bock, Proschold & Krienitz (23), <i>C. astroideum</i> (10)	<i>P. duplex</i> (24), НИД динофитовые (22)
2	<i>M. aeruginosa</i> (11), <i>Chlamydomonas proboscigera</i> var. <i>conferta</i> (Korshikov) Ettl (9), <i>S. saltator</i> (9)	<i>M. aeruginosa</i> (33), <i>S. saltator</i> (9), <i>C. proboscigera</i> var. <i>conferta</i> (8)
3	<i>P. duplex</i> (11), НИД мелкие цианобактерии (9), <i>M. aeruginosa</i> (8)	<i>M. aeruginosa</i> (89)
4	<i>Chroomonas coerulea</i> (Geitler) Skuja (16), <i>Enallax costatus</i> (Schmidle) Pascher (8), <i>Desmodesmus magnus</i> (Meyen) Tsarenko (8), <i>Dictyosphaerium granulatum</i> Hindák (8)	<i>M. aeruginosa</i> (47), <i>Euglena hemichromata</i> (33), <i>Chroomonas coerulea</i> (5)
5	<i>M. aeruginosa</i> (30), <i>D. granulatum</i> (27), <i>Desmodesmus denticulatus</i> (5)	<i>M. aeruginosa</i> (26), <i>D. denticulatus</i> (15), <i>D. granulatum</i> (8)
6	<i>M. aeruginosa</i> (66), <i>D. granulatum</i> (8)	<i>M. aeruginosa</i> (93)

Примечание. НИД – неидентифицированные.

нимальные величины получены в феврале, когда лед покрыт более толстым слоем снега. Численность, биомасса и содержание хлорофилла увеличивались с глубиной, но изменялись не синхронно (рис. 3). При микроскопических исследованиях мартовских проб обнаружено, что окраска хлоро-

пластов зеленых водорослей с глубиной становилась более интенсивной.

Биомасса водорослей не зависела от температуры воды, но достоверная отрицательная корреляция была выявлена между температурой и со-

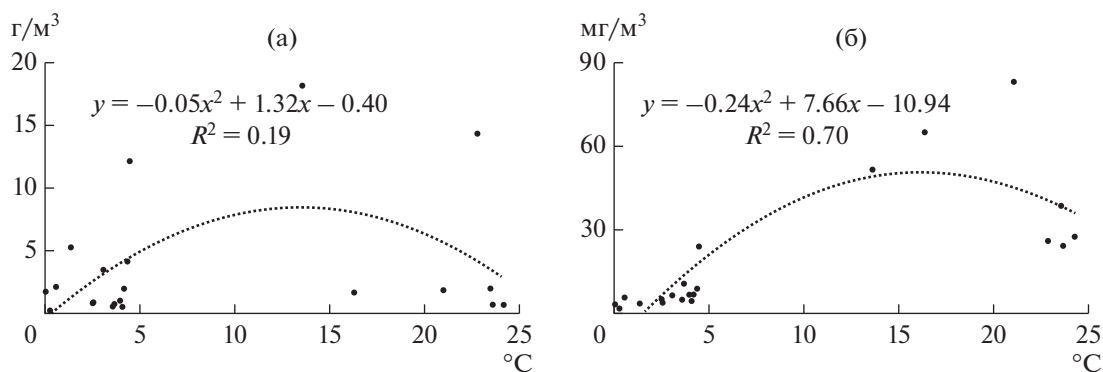


Рис. 4. Связь биомассы фитопланктона (а) и концентрации Хл *a* (б) с температурой воды. По оси ординат – показатели обилия, по оси абсцисс – температура.

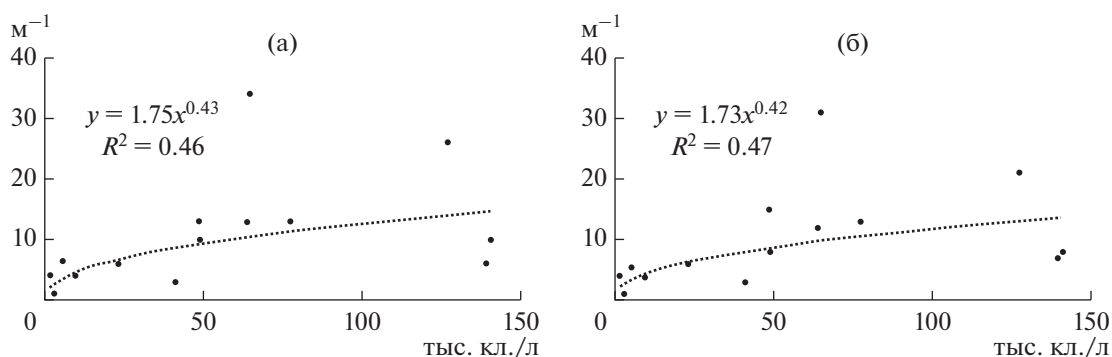


Рис. 5. Связь между общей численностью фитопланктона и коэффициентами поглощения света с длиной волны 520 нм (а) и 580 нм (б). По оси ординат – ϵ , по оси абсцисс – численность.

держанием Хл *a* (рис. 4). С показателями поглощения света в синей (400–460 нм) и красной (670–800 нм) области спектра положительно связана концентрация Хл *a*, а в желто-зеленой области (520 и 580 нм) – общая численность фитопланктона (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Состав, структура и обилие ФП, представленного в оз. Красиловское главным образом видами-космополитами, типичны для мелководных мезотрофных и слабо эвтрофных водоемов умеренных широт. Численность, биомасса, содержание Хл *a* и пределы их варьирования в толще воды максимальны в августе, снижаются в марте и минимальны в феврале, когда лед покрыт толстым слоем снега. Отрицательного действия низкой температуры воды на обилие водорослей не отмечено. Все обнаруженные в подледный период виды вегетировали и летом, но поскольку зимой видовое разнообразие снижалось вдвое, то коэффициент видового сходства зимнего и летнего ФП невысокий – 41.6%. В летнем ФП отмечены как

крупные, так и мелкоклеточные виды. В зимнем планктоне размер клеток редко превышал 10 мкм; обильно развивались мелкие (<5 мкм) коккоидные и веретеновидной формы с шипиками и длинными отростками; колонии цианопрокариот имели мощную слизистую оболочку. Все эти особенности позволяют водорослям находиться в толще воды при отсутствии перемешивания (Phillips, Fawley, 2002; Bondarenko et al., 2006; Sotomogyi et al., 2009). Именно мелкоклеточные формы – пикопланктон достигают высокого обилия подо льдом (Doculil, 2009; Veillette et al., 2010; Bondarenko et al., 2012). Жгутиковые подвижные виды, способные перемещаться к поверхности в более благоприятные по освещенности условия или, не оседая, находиться в толще воды, представлены единичными экземплярами и, в отличие от других озер (Костерина, 2018; Doculil, 2009; Dokulil et al., 2014), распределены в толще воды достаточно равномерно. В подледном фитопланктоне оз. Красиловское встречены подвижные нитчатые цианопрокариоты *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Spirulina*, *Anabaena*, сведения о которых в цитируемой литературе отсутствуют.

Удержанию в толще воды и выносу клеток к поверхности способствуют не только морфологические особенности и жизненные стратегии водорослей, но также гидрологические и гидрохимические условия (Phillips, Fawley, 2002; Dokulil et al., 2014). Это могут быть восходящие токи воды с меньшей плотностью, которые образуются за счет нагрева воды при окислении илов (Malm et al., 1997; Terzhevik et al., 2009; Bertilsson et al., 2013) или за счет более низкого содержания минеральных веществ по сравнению с подледным слоем (Granin et al., 2000).

Подледный фитопланктон может находиться в различном физиологическом состоянии. При низкой температуре снижается интенсивность метаболизма (Bertilsson et al., 2013) и в морфологии клеток не проявляются видоспецифичные черты. Именно поэтому в оз. Красиловское зимой в большом количестве встречены не идентифицированные водоросли из разных отделов, численность которых максимальна в феврале при большой высоте снежного покрова. Часть клеток находилась в стадии покоя в виде цист.

При низкой освещенности водоросли могут переходить на гетеротрофное или миксотрофное питание (Vanderploeg et al., 1992; Mencfel, Pasztaleniec, 2004; Pasztaleniec, Lenard, 2008; Игошкина, 2014; Dokulil et al., 2014). О такой возможности свидетельствуют высокие значения ПО в воде оз. Красиловское, указывающие на присутствие доступного легко окисляемого органического вещества.

Насыщенная окраска хлоропластов, довольно высокое содержание Хл *a* и его связь с показателями ослабления света свидетельствуют об активном фотосинтезе водорослей. Известно, что через слой льда и снега проникает до 70% солнечной энергии (Wright, 1964; Vanderploeg et al., 1992; Wetzel, 2001; Pasztaleniec, Lenard, 2008; Dokulil et al., 2014; Brabdao et al., 2017), а прозрачность воды зимой увеличивается из-за осаждения взвешенных веществ (Оглы, 2009; Dokulil et al., 2014). В результате первичная продукция подледного фитопланктона может достигать 0,55–1,90 г С/(м² · сут) (Foy, Gibson, 1982; Корякина, 2009; Dokulil et al., 2014). Поскольку фотосинтез в синей части спектра идет более интенсивно, чем в красной (Шифрин, 1983; Brabdao et al., 2017), то коэффициенты поглощения света $\epsilon_{400-460}$ в оз. Красиловское выше, чем $\epsilon_{670-800}$.

Показатели поглощения света увеличиваются с ростом концентрации Хл *a*, но теснота связи между ними не велика. Одной из причин может быть присутствие в воде фотосинтезирующих бактерий, микроскопических водных грибов зеленоватого и коричнево-бурого цвета, остатков высших растений. Механизмом приспособления самих водорослей к обитанию в условиях низкой

температуры и освещенности служит световая и хроматическая адаптация – увеличение количества дополнительных пигментов, расширяющих спектр поглощаемых волн (Wright, 1964; Brabdao et al., 2017); увеличение общего содержания пигментов и эффективности фотосинтетической единицы (Михеева, 1977; Foy, Gibson, 1982; Dokulil et al., 2014). Вероятно, этим объясняются максимальные показатели поглощения, полученные в феврале при самых низких концентрациях Хл *a*.

Положительная корреляция между поглощением желто-зеленого света и общей численностью ФП объяснима доминированием в оз. Красиловское цианопрокариот, в клетках которых содержатся фикобилины: фикоэритрин, поглощающий свет в диапазоне 495–565 нм, и фикоцианин (550–615 нм) (Wright, 1964; Dokulil, 2009). Эффективность работы этих пигментов также увеличивается при низкой подводной освещенности в феврале.

Выводы. В составе фитопланктона оз. Красиловское в летнюю межень обнаружено более 100 видов водорослей при массовом развитии зеленых, криптофитовых, эвгленовых и цианопрокариот. В период ледостава таксономическое разнообразие вдвое ниже, но специфических зимних видов не выявлено, в массе развивались цианопрокариоты и зеленые водоросли, фитопланктон сформирован более мелкими формами, чем летом. Минимальные показатели развития фитопланктона отмечены в феврале при высоком снежном покрове. Численность, биомасса фитопланктона и содержание хлорофилла во все сезоны увеличивались от поверхности к придонному слою. Насыщенная окраска хлоропластов, высокое содержание Хл *a* и его закономерная связь с показателями ослабления света в синей и красной областях спектра свидетельствуют о заметной фотосинтетической активности подледного фитопланктона.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках госзадания АААА-А17-117041210244-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженова О.П., Михайлов В.В. 2015. Особенности существования *Arthrospira fusiformis* в озере соленом (г. Омск) в зимний период // Вестник ОГАУ. № 1. С. 36.
- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Ин-т эволюции ун-та Хайфы. 498 с.
- Бондаренко Н.А. 2009. Экология и таксономическое разнообразие планктонных водорослей в озерах

- горных областей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Борок.
- Долматова Л.А. 2016. Особенности гидрохимического режима оз. Красиловское (бассейн Верхней Оби) // Вода. Химия и экология. № 7. С. 9.
- Ермолаев В.И., Науменко Ю.В. 1992. Фитопланктон озера Убинское в подледный период // Сиб. биол. журн. № 3. С. 29.
- Зуев В.В., Кураков С.А., Суторихин И.А. и др. 2014. Автономный многоканальный измерительный комплекс для регистрации метеорологических и гидрофизических параметров // Измерение, контроль, информатизация – 2014: Матер. XV междунар. науч.-техн. конф. Барнаул: Изд-во АлтГУ. С. 186.
- Игошкина И.Ю. 2014. Оценка экологического состояния водоема природного парка “Птичья Гавань” (г. Омск) по показателям развития фитопланктона: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Омск.
- Корякина Е.А. 2009. Региональная особенность первичной продукции озера Арахлей (Забайкалье): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб.
- Костерина Л.И. Состав и вертикальное распределение фитопланктона в оз. Светлояр в 2010–2011 гг. Электрон. ресурс. Режим доступа http://olimp.bsru.ru/data/olimp/1/41/doc/work_4806_4334_hff-przev.pdf. Дата обращения 10.10.2018.
- Кутько П.И., Стародубова А.А., Зыбина А.Р. и др. 2012. Фитопланктон Салтовского водохранилища (Харьковская область) в зимний период // Biologia. Электрон. ресурс] / Режим доступа http://www.rusnauka.com/27_SSN_2012/Biologia/6_117347.doc.htm
- Лабунская Е.Н., Бухарицин П.И. 2015. Особенности распределения фитопланктона в центральных районах Северного Каспия в зимних условиях // Междунар. журн. эксперимент. образования. № 2. Ч. 3. С. 433.
- Леонтьев Д.В. 2008. Флористический анализ в микологии. Харьков: Ранок-НТ. 110 с.
- Малолетко А.М. 2006. Эоловые процессы как фактор речных перехватов в Верхнем Приобье // География и природопользование Сибири. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та. Вып. 8. С. 108.
- Михеева Т.М. 1977. О показателях удельной активности и некоторых причинах их определяющих // Гидробиол. журн. № 3. С. 11.
- Могильникова Т.А., Полтева А.В., Латковская Е.М. и др. 2009. Микроводоросли и гетеротрофные бактерии льда и подледной воды: условия их развития в прибрежных акваториях острова Сахалин // Морская биология и экология. № 1. С. 129.
- Модина Т.Д., Сухова М.Г. 2007. Климат и агроклиматические ресурсы Алтая. Новосибирск: Унив. кн. изд-во. 180 с.
- Науменко Ю.В., Нечаева В.С. 2000. Видовой состав зимнего фитопланктона Новосибирского водохранилища // Сиб. экол. журн. № 2. С. 173.
- Оглы З.П. 2009. Показатели продуктивности фитопланктона в водоемах Забайкальского края // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 11. № 1(3). С. 327.
- Риввер И.К. 2016. Особенности планктоценозов озер в разные экологические периоды (подледный и открытой воды) // Труды ИБВВ РАН. Вып. 74(77). С. 59.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. 1992. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат.
- Суторихин И.А., Букатый В.И., Харламова Н.Ф. и др. 2016. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края. Новосибирск: Изд-во СО РАН.
- Ташлыкова Н.А. 2011. Фитопланктон озера Арахлей в подледный период // Biol. [Электрон. ресурс] / Режим доступа http://www.rusnauka.com/16_ADEN_2011/Biologia/3_88990.doc.htm. Дата обращения 10.10.2018.
- Терешенкова Т.В. 1983. Вертикальное распределение фитопланктона в подледный период в малых озерах Ленинградской области // Изв. ГОСНИОРХ. № 132. С. 34.
- Халиуллина Л.Ю., Яковлев В.А. 2015. Фитопланктон мелководий в верховьях Куйбышевского водохранилища. Казань: Изд-во Академии наук РТ.
- Шифрин К.С. 1983. Введение в оптику океана. Ленинград: Гидрометеиздат. 278 с.
- Шоларь С.А., Лу М.Е. 2018. Оптические контактные методы мониторинга гидросферы и их возможное использование в новых научных направлениях // Системы контроля окружающей среды. № 14(34). С. 17.
- Bertilsson S., Burgin A., Carey C. et al. 2013. The under-ice microbiome of seasonally frozen lakes // Limnol., Oceanogr. V. 58. № 6. P. 1998.
- Bondarenko N.A., Timoshkin O.A., Ropstorf P. et al. 2006. The under-ice and bottom periods in the life cycle of *Aulacoseira baicalensis* (K. Meyer) Simonsen, a principal Lake Baikal alga // Hydrobiol. V. 568 (S). P. 107.
- Bondarenko N.A., Belykh O.I., Golobokova L.P. et al. 2012. Stratified distribution of nutrients and extremophile biota within freshwater ice covering the surface of Lake Baikal // J. Microbiol. V. 50. № 1. P. 8.
- Brabdao L., Brighenti L., Staehr P.A. et al. 2017. Partitioning of the diffuse attenuation coefficient for photosynthetically available irradiance in a deep dendritic tropical lake // Anais da Academia Brasileira de Ciências. V. 89. № 1. P. 469.
- Doculil M.T. 2009. An analysis of long-term winter data on phytoplankton and zooplankton in Neusiedler See, a shallow temperate lake, Austria // Aquat. Ecol. V. 553. P. 293.
- Dokulil M.T., Herziga A., Somogyib B. et al. 2014. Winter conditions in six European shallow lakes: a comparative synopsis // Eston. J. Ecol. V. 63. № 3. P. 111.
- Foy R.H., Gibson C.E. 1982. Photosynthetic characteristics of planktonic blue-green algae: changes in photosynthetic capacity and pigmentation of *Oscillatoria redekei* Van Goor under high and low light // Brit. Phycol. J. V. 17. P. 183.
- Granin N.G., Jewson D.H., Gnatovsky R. Yu. et al. 2000. Turbulent mixing under ice and the growth of diatoms in Lake Baikal // Verh. Internat. Verein. Limnol. V. 27. № 5. P. 2812.

- Guiry M.D., Guiry G.M.* 2018. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on [Electronic resource]. (Дата обращения 30.10.2018).
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al.* 1997. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes // *Nord. Hydrol.* V. 28. № 2. P. 129.
- Mencfel R., Pasztaleniec A.* 2004. Characteristics of the winter phytoplankton in Rogóznó Lake // *Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska, Sectio C, Biologia.* V. 59. P. 1.
- Pasztaleniec A., Lenard T.* 2008. Winter phytoplankton communities in different depths of three mesotrophic lakes (Leczna-Wlodava Lakeland, Eastern Poland) // *Biol.* V. 63. № 3. P. 294.
- Phillips K.A., Fawley M.W.* 2002. Winter phytoplankton blooms under ice associated with elevated oxygen levels // *J. Phycol.* V. 38. № 6. P. 1068.
- SCOR-UNESCO Working Group 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments in sea water // *Monographs on Oceanographic Methodology.* Montreux: UNESCO. P. 9.
- Somogyi B., Felföldi T., Vanyovszki J. et al.* 2009. Winter bloom of picoeukaryotes in Hungarian shallow turbid soda pans and the role of light and temperature // *Aquat. Ecol.* V. 43. № 3. P. 735.
- Terzhevik A., Golosov S., Palshin N. et al.* 2009. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // *Aquat. Ecol.* V. 43. № 3. P. 617.
- Vanderploeg H.A., Bolsenga S.J., Fahnenstiel G.L. et al.* 1992. Plankton ecology in an ice-covered bay of Lake Michigan: utilization of a winter phytoplankton bloom by reproducing copepods // *Hydrobiol.* V. 243. P. 175.
- Veillette J., Martineau M.-J., Antoniadou D. et al.* 2010. Effects of loss of perennial lake ice on mixing and phytoplankton dynamics: insights from High Arctic Canada // *Annals Glaciol.* V. 51. № 56. P. 57.
- Wetzel R.* 2001. *Lymnology. Lake and river ecosystems.* San Diego: Acad. Press.
- Wright R.T.* 1964. Dynamic of a phytoplankton community in an ice-covered lake // *Limnol., Oceanogr.* V. 9. № 2. P. 163.

Analysis of the State of Biological Communities in a Continental Reservoir Using Hydro-Optical Characteristics

G. V. Vinokurova^{a, *}, I. A. Sutorikhin^a, A. A. Kolomeytsev^a, and I. M. Frolenkov^a

^a*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia*

^{*}*e-mail: kimg@iwep.ru*

Phytoplankton composition, development, and distribution as well as hydrooptical characteristics were studied in the mesotrophic drainless Lake Krasilovskoe (Altai Territory, Russia) in March, August 2017, and February 2018. Phytoplankton includes 147 taxa with a rank below the genus. In winter, with a snow depth of 0.13–0.34 m, ice thickness of 0.56–0.70 m, and water temperature of 0.1–4.5°C, the phytoplankton number was 0.03–1.06 mln cells/L, biomass 0.2–12.2 g/m³, Chl *a* content 1.8–24.1 mg/m³. Summer phytoplankton was characterized by higher development indices (0.11–1.74 mln cells/L, 0.6–18.2 g/m³, 27.5–83.4 mg/m³ Chl *a*). A positive relationship between the light absorption coefficient in the range of 400–460 and 670–800 nm with the Chl *a* content, the light absorption coefficient in the range 520–580 nm with the winter phytoplankton total number has been revealed. This indicates the active algae photosynthesis not only in summer, but also in the ice period.

Keywords: winter and summer phytoplankton, chlorophyll *a*, light absorption coefficients, Lake Krasilovskoe