

## ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА МИКРОБНЫХ МАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Дмитриева О.М.<sup>1</sup>, Бархутова Д.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет», Улан-Удэ, e-mail: dmitrieva-om@yandex.ru;

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН», Улан-Удэ, e-mail: darima\_bar@mail.ru

Высокие значения pH, минерализации и температуры воды щелочных водоемов являются благоприятной средой для развития микробных матов, где основными продуцентами органического вещества выступают цианобактерии. Изучено содержание органического вещества (органического углерода, белка, углеводов) и изотопный состав углерода циано-бактериальных матов содовых озер (Хилганта, Верхнее Белое) и щелочных термальных источников (Гарга, Сеюя, Алла, Сухая) Байкальского региона. Установлено, что циано-бактериальные маты экстремальных биотопов являются высокопродуктивными системами, где содержание органического углерода достигает 25 %. В составе органического вещества преобладают углеводы (12,42–24,73 %), наибольшее количество которых определено в матах гидротерм. Углеводы выполняют структурную, формообразующую роль, защищают микробное сообщество от воздействия неблагоприятных условий окружающей среды. Количество белка в исследованных образцах составляет 5,92 – 15,79 %. Органическое вещество матов обеднено тяжелой формой изотопа <sup>13</sup>C. Выявлено, что фотосинтетические маты содовых озер в продукционных процессах используют биогенную углекислоту, а микроорганизмы щелочных терм – атмосферную и вулканогенную CO<sub>2</sub>. Органический углерод микробных матов метановой термы Сухая отличался низким содержанием изотопа <sup>13</sup>C относительно биомассы матов гидротерм.

Ключевые слова: содовые озера, щелочные гидротермы, циано-бактериальные маты, органическое вещество, изотопы углерода.

## CHARACTERISTICS OF ORGANIC MATTER COMPOSITION IN MICROBIAL MATS OF ALKALINE WATER ECOSYSTEMS OF THE BAIKAL REGION

Dmitrieva O.M.<sup>1</sup>, Barkhutova D.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Buryat State University, Ulan-Ude, e-mail: dmitrieva-om@yandex.ru;

<sup>2</sup>Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, e-mail: darima\_bar@mail.ru

High values of pH, mineralization and water temperature in alkaline water bodies are favorable environments for the development of microbial mats, where the primary producers of organic matter are cyanobacteria. The author studied the content of the organic (organic carbon, protein, carbohydrates) matter and isotopic composition of carbon in cyanobacterial mats of the soda lakes (Hilganta, Upper Belye), and the alkaline thermal springs (Garga, Seyuya, Alla, Sukhaya) of the Baikal region. We found that cyanobacterial mats of extreme habitats are highly productive systems and organic carbon content reaches 25%. The composition of the organic matter is dominated by carbohydrates (12,42–24,73 %), the largest number which is defined in the mats gidroterm. They perform structural, formative role, protecting the microbial community from adverse environmental conditions. The amount of protein in the studied samples is of 5.92 % is 15.79 %. Organic matter in the mats is depleted by heavy isotope form <sup>13</sup>C. It is revealed that photosynthetic mats of soda lakes in productional processes use biogenic carbon dioxide, whereas microorganisms of the alkaline hot springs use atmospheric and volcanic CO<sub>2</sub>. Organic carbon in the microbial mats of the methane hot spring Sukhaya is characterized by low isotopic content of <sup>13</sup>C relative to mats biomass of the hot springs.

Keywords: soda lakes, alkaline hot springs, cyanobacterial mats, organic matter, isotopes of carbon.

Исследование микробных матов связано с их важной ролью в эволюции биосферы на планете. Процессы образования и накопления кислорода в древней атмосфере, формирование строматолитов обусловлены развитием докембрийских циано-бактериальных сообществ. Поэтому маты составляют особый предмет в развитии представлений о микробном сообществе [1]. Микробные маты представляют автономное сообщество, где

присутствуют и продукционная, и деструкционная ветви углеродного цикла. Циано-бактериальные маты имеют слоистую структуру с бентосным сообществом микроорганизмов, в котором доминируют фототрофные бактерии. Среди них цианобактерии являются основными продуцентами органического вещества и отвечают за структуру матов. Основной вклад в образование органического вещества матов вносят цианобактерии. Циано-бактериальные маты встречаются в экстремальных водных экосистемах – содовых, содово-соленых озерах, литеральных частях морей, термальных источниках [1,2]. Алкалофильные и термофильные микроорганизмы матов интересны как продуценты устойчивых при высоких температурах и рН внеклеточных ферментов, эндо- и экзополисахаридов, обладающих металло-хелатирующей, противовоспалительной, противовирусной и другими видами биологической активности.

В настоящее время проведены исследования структуры циано-бактериальных матов, изучены интенсивность микробных процессов и функциональные группы микроорганизмов, участвующих в круговороте углерода и его соединений [2,3]. Однако данные по химическому составу органического вещества циано-бактериальных матов в литературе крайне ограничены. Большая часть работ направлена на определение содержания и состава отдельных соединений: низкомолекулярных органических кислот, жирных кислот, экзополисахаридов.

**Целью** настоящей работы было исследование содержания некоторых органических веществ (белка, углеводов) и изотопного состава углерода циано-бактериальных матов, развивающихся в экстремальных водных экосистемах Байкальского региона.

#### **Материалы и методы исследования**

Объектами исследования служили щелочные водные экосистемы Байкальского региона – содовые озера Хилганта, Верхнее Белое, щелочные термальные источники Гарга, Сеюя, Алла, Сухая, где были отобраны микробные маты.

Температуру воды измеряли сенсорным электротермометром Prima (Португалия), значения рН – потенциометрически при помощи портативного рН-метра (pHep2, Португалия). Минерализацию вод определяли портативным тестер-кондуктометром TDS-4. Определение содержания карбонатов, гидрокарбонатов в воде проводили в полевых условиях титриметрическими методами. Содержание органического углерода микробных матов исследовали по методу Тюрина в модификации Никитина, белка – по реакции с кумасси синим. Общее количество углеводов в микробных матах определили фотометрически по реакции с дифениламином и соляной кислотой [4]. Определение соотношения стабильных изотопов углерода органического вещества и карбонатов проводили масс-спектрометрическим методом. Результаты приведены в виде величин  $\delta^{13}\text{C}$  в

промилле по отношению к общепринятым стандартам PDB (белемнит из формации Пи Ди). Знак «+» означает, что образец обогащен тяжелым изотопом по сравнению со стандартом, знак «-» – образец обеднен тяжелым изотопом. Содержание изотопов углерода определено с точностью  $\pm 0,20\%$  [5].

### Результаты исследования и их обсуждение

Физико-химические условия среды определяют структуру микробного сообщества активность различных групп микроорганизмов. Изменения физико-химических показателей водных экосистем (температуры, pH, химического состава) ускоряют или подавляют развитие микроорганизмов, что непосредственно влияет на процессы образования и разложения органического вещества, которые осуществляются данными сообществами [3,6].

Изучение физико-химических и гидрохимических параметров в местах отбора матов показали, что исследуемые водные экосистемы характеризуются щелочными значениями pH. Щелочная реакция среды варьировала в пределах от 8,9 до 9,7, что может быть обусловлено высоким содержанием карбонатов и гидрокарбонатов в воде (табл. 1).

Таблица 1

Физико-химическая характеристика воды содовых озер и гидротерм (p=0,95)

Экосистема	Станция	t, °C	pH	M, г/л	НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	СО <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , мг/л
Хилганта	-	29,0	9,5	40,0	1370±2,54	2450±6,73
Верхнее Белое	-	27,0	9,7	9,0	4200±11,01	1300±7,11
Гарга	4	52,0	9,0	0,75	23,18±0,06	64,80±0,08
	10	52,0	8,9	0,95	48,80±0,23	34,80±0,09
Сеюя	1	49,0	9,7	0,25	73,20±0,17	42,00±0,15
	2	47,0	9,7	0,30	97,60±0,14	24,00±0,05
	3	45,0	9,7	0,30	97,60±0,16	36,00±0,15
	4	41,0	9,4	0,25	73,20±0,10	36,00±0,23
Алла	-	38,0	9,0	0,30	122,00±1,04	0
Сухая	-	48,0	9,0	0,55	469,70±0,91	0

Отличительной особенностью содовых озер является высокое значение минерализации (M). В озере Хилганта содержание растворенных минеральных солей достигало 40,0 г/л, что обусловлено характером водно-солевого питания озер и климатическими условиями Юго-Восточного Забайкалья [1, 6]. Высокие значения pH, минерализации и температуры воды исследованных экстремальных водных экосистем ограничивают развитие высших растений и животных. Поэтому в содовых озерах и

щелочных термальных источниках Байкальского региона созданы благоприятные условия для развития микробных матов.

Ранее проведенные исследования [2,3] показали, что основными продуцентами органического вещества исследуемых микробных матов являются цианобактерии (табл. 2).

Таблица 2

Видовой состав циано-бактериальных матов содовых озер и гидротерм

Экосистема	Доминирующие виды
Хилганта	<i>Phormidium molle</i> , <i>Microcoleus chthonoplastes</i>
Верхнее Белое	<i>Phormidium tenue</i> , <i>Oscillatoria terebriformis</i>
Гарга	<i>Phormidium angustissimum</i> , <i>Anabaena contorta</i>
Сеюя	<i>Phormidium laminosum</i> , <i>Phormidium Woronichinii</i> , <i>Phormidium valderie f. pseudovalderianum</i> , <i>Oscillatoria limosa</i> , <i>Gloeocapsa punctata</i>
Алла	<i>Phormidium Woronichinii</i>
Сухая	<i>Phormidium</i> sp., зеленые водоросли рода <i>Scenedesmus</i>

Одним из показателей, характеризующих продукционную активность микроорганизмов матов, является содержание органического углерода (Сорг). В исследованных матах определено достаточно высокое содержание органического углерода (табл. 3). Следует отметить, что микробные маты гидротерм накапливают больше органического вещества, чем маты содовых озер. Так, количество органического углерода в микробных сообществах термальных источников достигало 25,78 % (источник Гарга), в матах содовых озер – 19,07 % (озеро Хилганта). Согласно методике определения Сорг его количество рассчитывается по глюкозе. Массовая доля углерода в глюкозе составляет 40 %. С учетом вышеизложенного можно допустить, что количество органического вещества в исследуемых образцах матов гидротерм и содовых озер составляет 38,43–64,45 % и 25,68–47,68 % соответственно. В циано-бактериальных матах содовых озер и гидротерм выявлено высокое содержание золы. Количество золы в исследуемых образцах составляет более 50 % от их сухого веса при зольности цианобактерий 15–20 % [4].

Таблица 3

Химический состав циано-бактериальных матов содовых озер и гидротерм (в % от сухого веса,  $p=0,95$ )

Экосистема	Станция	Сорг	Зола	Углеводы	Белок
Верхнее	1	15,32±0,64	58,72±0,91	13,12±0,54	7,02±0,64
Белое	2	10,27±0,77	64,95±0,83	12,50±0,67	6,59±0,73

	3	13,4±0,81	53,42±0,74	14,36±0,78	6,10±0,51
Хилганта	1	14,8±0,98	67,35±0,62	13,10±0,97	6,89±0,47
	2	19,07±0,91	44,39±0,90	14,80±0,62	10,80±0,72
Гарга	4	17,04±0,67	60,08±0,82	21,15±1,03	11,12±0,63
	10	25,78±0,76	64,22±0,92	16,58±0,88	7,24±0,33
Сеюя	1	25,15±0,78	51,02±0,79	24,73±0,59	15,79±0,31
	2	15,37±0,19	57,40±0,87	12,42±0,81	9,00±0,41
	3	22,81±0,96	55,29±0,75	18,34±0,71	5,92±0,38
	4	15,85±0,81	59,91±0,77	13,49±0,86	9,10±0,21
Алла	-	16,10±0,93	64,22±0,1,03	16,78±0,97	6,72±0,17

Исследовано содержание углеводов и белков в микробных матах. Количество белка изменялось в пределах от 5,92 до 15,79 % (источник Сеюя). Более половины органического вещества микробных сообществ приходится на углеводы (12,42–24,73 %). По литературным данным, цианобактерии могут накапливать от 17 до 43 % углеводов, в некоторых случаях содержание углеводов составляло 60–70 %. Образование большого количества углеводов микробными сообществами может быть обусловлено несколькими факторами. Во-первых, углеводы – обязательный компонент клеточной стенки, чехлацианобактерий. Во-вторых, было отмечено накопление углеводов в живых организмах при воздействии неблагоприятных факторов. В литературе приведены данные об ослизнении микробных матов, развивающихся при высоких значениях температуры, рН и минерализации, за счет образования микроорганизмами экзополисахаридов. Кроме того, синтез экзополисахаридов является необходимым условием формирования слоистой структуры микробного мата щелочных водоемов [7].

Результаты исследования содержания органического вещества (белка, углеводов), органического углерода матов свидетельствуют о том, что микробные сообщества водных экосистем Байкальского региона являются высокопродуктивными системами. В процессе своей жизнедеятельности цианобактерии и фотосинтетические бактерии микробных матов для синтеза органического вещества используют углекислоту биогенного и абиогенного происхождения, отличающиеся по изотопному составу углерода [5].

Для установления источника поступления углекислоты, используемой в фотосинтетических процессах, исследован изотопный состав углерода органического

вещества и карбонатов циано-бактериальных матов<sup>1</sup>.

Рассчитаны значения фракционирования изотопов углерода матов ( $\Delta\delta$ ) (табл. 4).

Таблица 4

Изотопный состав углерода циано-бактериальных матов содовых озер и гидротерм (в ‰)

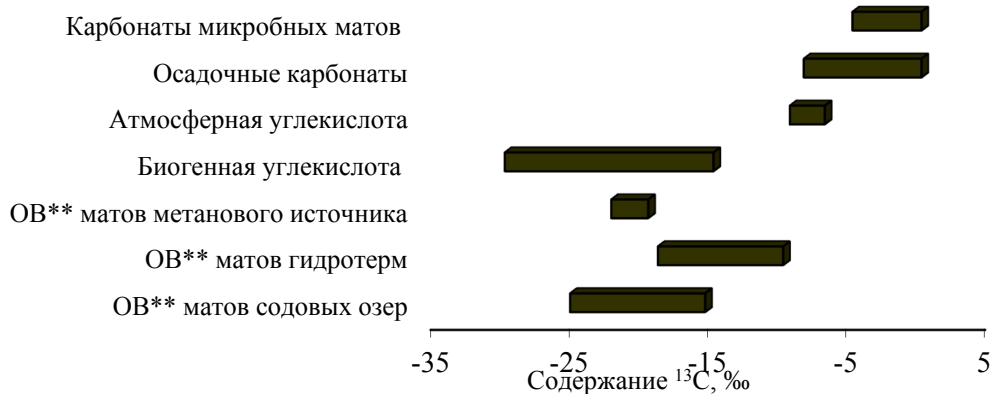
Озеро	Станция	$\delta^{13}\text{C}$ Собщее	$\delta^{13}\text{C}$ ОВ	$\delta^{13}\text{C}$ карбонатов	$\Delta\delta$
Хилганта	1	-15,27	-15,60	-0,72	+14,88
	2	-19,80	-19,21	-1,89	+17,32
Верхнее Белое	1	-21,50	-23,60	+1,94	+25,54
	2	-20,91	-25,35	-2,12	+23,23
	3	-19,39	-21,24	-0,72	+20,52
Гарга	4	-9,84	-9,99	+2,96	+12,95
	10	-10,58	-15,29	+0,21	+15,5
Сеюя	1	-11,93	-13,28	+1,7	+14,98
Алла	-	-16,23	-15,62	+1,73	+17,35
Сухая	1	-21,28	-22,34	0*	+22,34
	2	-18,25	-19,69	0*	+19,69

\* – значения, близкие к нулю.

Анализ результатов изотопного состава углерода микробных матов содовых озер и щелочных гидротерм свидетельствует о том, что микроорганизмы матов для синтеза органического вещества преимущественно использовали углекислоту, содержащую изотопно-легкий  $^{12}\text{C}$ . Поэтому биомасса матов отличалась пониженным содержанием изотопа  $^{13}\text{C}$ . Полученные нами данные согласуются с ранее проведенными исследованиями содержания изотопов органического углерода цианобактерий ( $\delta^{13}\text{C}$  сред.= -20 ÷ -16 ‰) [2,4,5]. Изотопный состав углерода органического вещества микробных матов содовых озер и минеральных источников различался. Наши исследования показали, что изотопный состав органического углерода матов из термальных источников более обогащен изотопом  $^{13}\text{C}$ , чем углерод микробных сообществ изученных озер. Это обусловлено тем, что продуценты содовых озер и щелочных термальных источников потребляют различающуюся по изотопному составу углекислоту (рисунок). Для синтеза органического вещества

<sup>1</sup> Авторы признательны д-ру биол. наук, проф. [А.М. Зякуну](#) (ИБФМ им. Г.К. Скрыбина, г. Пущино) за помощь в исследовании изотопного состава углерода

цианобактерии гидротерм фиксируют в основном атмосферную и вулканогенную  $\text{CO}_2$ , а фотосинтетики матов содовых озер - углекислоту биогенного происхождения [4].



*Изотопный состав углерода биогенных и абиогенных компонентов  
(ОВ\*\* – органическое вещество)*

По изотопному составу органического углерода циано-бактериальный мат термы Сухая отличался от микробных сообществ исследованных гидротерм. Гидротерма Сухая является метановым источником, в продукционных процессах, кроме цианобактерий, участвуют бактерии цикла метана. Они используют субстраты, содержащие изотопно-легкую форму углерода [5]. Метанотрофы матов источника Сухая потребляют преимущественно биогенный метан, в состав которого входит легкая форма изотопа  $^{12}\text{C}$ . Поэтому органический углерод микробных матов термы Сухая характеризовался низким содержанием изотопа  $^{13}\text{C}$  относительно биомассы матов гидротерм.

В процессе роста микробного сообщества наблюдается отложение карбонатов кальция и магния между слоями мата, которые значительно обогащены изотопом углеродом  $^{13}\text{C}$ , чем органический углерод. Изотопный состав минерального углерода исследованных микробных матов близок к составу изотопов осадочных карбонатов ( $\delta^{13}\text{C}$  от - 5 до + 5 ‰).

### **Заключение**

Наши исследования показали, что содовые озера и щелочные гидротермы Байкальского региона являются благоприятной средой для развития микробных матов, основу которых составляют цианобактерии. Циано-бактериальные маты – высокопродуктивные сообщества, что позволяет рассматривать их перспективными объектами для биотехнологии. Содержание органического углерода в микробных матах находится в пределах от 10,27 до 25,78 %. Установлено, что в составе органического вещества преобладают углеводы. Их содержание в матах содовых озер достигает 14,80 %, в матах гидротерм – 24,73 %.

Накопление большого количества углеводов обусловлено их структурной и формообразующей ролью в микробном мате. Следует отметить, что термальные источники характеризуются более высоким содержанием органического углерода и углеводов. Количество белка в исследованных системах составляет 5,92–15,79 %. В процессе своей жизнедеятельности фотосинтезирующие микроорганизмы матов преимущественно потребляют легкий изотоп углерода  $^{12}\text{C}$ , поэтому органическое вещество обеднено тяжелой формой изотопа  $^{13}\text{C}$ . Выявлено, что фотосинтетики матов содовых озер в продукционных процессах используют биогенную углекислоту, а микроорганизмы щелочных терм – атмосферную и вулканогенную  $\text{CO}_2$ .

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 15-44-04335 и 15-04-01275.*

### Список литературы

1. Цыренова Д.Д., Брянская А.В., Козырева Л.П., Намсараев З.Б., Намсараев Б.Б. Структура и особенности формирования галоалкалофильного сообщества озера Хилганта / Д.Д. Цыренова и [др.] // Микробиология. – 2011. – Т. 80, № 2. – С. 251-257.
2. Цыренова Д.Д., Брянская А.В., Намсараев З.Б., Акимов В.Н. Таксономическая характеристика цианобактерий некоторых солоноватых и соленых озер Южного Забайкалья / Д.Д. Цыренова и [др.] // Микробиология. – 2011. – Т. 80, № 2. – С. 230-240.
3. Кашкак Е.С., Гайсин Е.С., Дагурова О.П., Брянцева И.А., Данилова Э.В. Формирование и функционирование микробных матов минерального источника Хойто-Гол (Восточный Саян) / Е.С. Кашкак и [др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – № 2. – С. 397-402.
4. Калашникова О.М. Продукция и состав органического вещества циано-бактериальных матов щелочных водных экосистем Забайкалья: дис. ... канд. биол. наук. – Улан-Удэ, 2006. – 130 с.
5. Зякун А.М. Разделение стабильных изотопов углерода микроорганизмами и возможности его практического: дис. ... д-ра биол. наук. – Пушкино, 1994. – 300 с.
6. Абидуева Е.Ю., Баторова Г.Н. Микробиологические и гидрохимические характеристики Алгинских озер Баргузинской долины (Забайкалье) / Е.Ю. Абидуева, Г.Н. Баторова // Вестник Бурятского государственного университета. Серия: биология, география. – Вып. 4. – Улан-Удэ, 2016. – С. 3-6.
7. Дмитриева О.М., Бархутова Д.Д., Калашников А.М. Углеводный состав циано-бактериальных матов содовых озер и термальных источников Байкальского региона / О.М.



Дмитриева, Д.Д. Бархутова, А.М. Калашников // Вестник Бурятского государственного университета. – 2011. – Вып. 3: Химия. Физика. – С. 80-84.