

УДК 579.26

DOI 10.18101/2306-2363-2019-4-9-15

## **ФАКТОРЫ, КОНТРОЛИРУЮЩИЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ**

© **Малыгин А. В.**

аспирант,

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

E-mail: malygin\_1986@bk.ru

© **Цыренова Д. Д.**

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории микробиологии,

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

E-mail: baldanovad@rambler.ru

© **Зайцева С. В.**

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории микробиологии,

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

E-mail: svet\_zait@mail.ru

© **Бархутова Д. Д.**

кандидат биологических наук,

заведующий лабораторией микробиологии,

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

E-mail: darima\_bar@mail.ru

Были выявлены основные физико-химические факторы, контролирующие состояние экосистемы щелочных гидротерм Байкальской рифтовой зоны как местообитаний термофильного микробного сообщества. Метод главных компонент позволил количественно оценить факторы среды, которые могут играть важную роль в функционировании микробного сообщества. Были определены три главные компоненты, объясняющие 98% наблюдаемых вариаций. Первая главная компонента объясняет 77% наблюдаемых изменений и представляет содержание сульфатных и сульфидных ионов, также окислительно-восстановительный потенциал. Наибольший вклад во вторую компоненту вносят рН и содержание гидрокарбонатных ионов, они определяют 12% изменений в среде обитания. Компоненты температуры воды имеют меньшее значение, объясняя 5.5% вариаций.

**Ключевые слова:** щелочные гидротермы; анализ многомерных данных; метод главных компонент; гидрокарбонатные ионы; микробные сообщества; серосодержащие компоненты; минеральные воды.

**Для цитирования:**

*Малыгин А. В., Цыренова Д. Д., Зайцева С. В., Бархутова Д. Д.* Факторы, контролирующие состояние гидротермальных экосистем Байкальской рифтовой зоны // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2019. Вып 4. С. 9–15.

Метод главных компонент (РСА) является современным методом обработки многомерных данных. В основе этого метода лежит предположение, что каждый из измеренных параметров в каждом образце испытывает влияние множества других независимых параметров. Задачами подобных исследований являются расчет, скрининг и графическое отображение значительных массивов многомерных данных. Целью нашей работы было определение главных факторов, контролирующих изменения в термофильных местообитаниях таких как щелочные гидротермы.

### Объекты и методы исследования

*Объекты:* гидротермы Алла, Кучигер, Умхей, Гарга, Сеюя, Гусиха, Уро (Баргузинская впадина), Горячинск и Сухая (побережье озера Байкал). Пробы минеральной воды в выходах и в ручьях по их изливу были отобраны в 2009-2013 гг.

*Физико-химические параметры.* Температуру воды измеряли сенсорным электротермометром Prima (Португалия), рН среды — потенциометрическим портативным рН -метром (рНер2, Португалия), значения общей минерализации — тестер-кондуктометром TDS-4 (Сингапур), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) — измерителем редокс-потенциала ORP (Португалия). Концентрацию основных ионов определяли общепринятыми методами [1].

*Статистический анализ.* Для определения основных факторов среды, контролирующих состояние экосистемы щелочных гидротерм Байкальской рифтовой зоны использовали метод главных компонент, все расчеты проводили с помощью пакета программ MathLab10 и Excel для Windows.

### Результаты и обсуждение

Гидротермы Байкальской рифтовой зоны с различными физическими, химическими и газовыми свойствами являются местами обитания термофильных микробных сообществ [2]. Изучение микробного сообщества и среды обитания играет важную роль в понимании их роли в круговороте веществ и энергии в экстремальных местообитаниях. При выходе на поверхность, минеральные воды гидротерм образуют горячие ручьи, в которых в результате абиотических процессов и деятельности микробного сообщества понижается температура изливающихся вод, изменяются окислительно-восстановительные параметры, значения рН и катионно-анионный состав вод.

Нами были получены физико-химические характеристики в выходах и ручьях по изливу минеральных вод, на станциях, где были выявлены микробные маты (табл 1). Воды термальных источников имели щелочную реакцию. Значения рН минеральной воды в выходах гидротерм варьировали от 8,2 до 9,9. Наиболее щелочные значения рН зарегистрированы в воде гидротерм Алла, Сеюя и Кучигер. Средние значения рН зафиксированы в источниках Горячинск, Уро и Умхей. Слабощелочная реакция отмечена в водах Гарга, Гусиха (табл. 1). Значения окислительно-восстановительного потенциала варьировали в широких пределах, от -340 до +340 мВ. Окисленные условия наблюдаются в водах гидротерм Гарга (+230), Гусиха (+340). В остальных гидротермах характерны восстановленные условия гидротермальных вод, что является благоприятными для функционирования

анаэробного микробного сообщества. По степени минерализации термальные воды являлись слабоминерализованными. Минерализация вод термальных источников не превышала 1 г/дм<sup>3</sup>.

Высоким содержанием сероводорода отличались гидротермы Умхей (31 мг/дм<sup>3</sup>), Сухая (27,2 мг/дм<sup>3</sup>), Кучигер (25,6 мг/дм<sup>3</sup>), и Алла (16,5 мг/дм<sup>3</sup>). В водах Горячинска концентрация сероводорода составляла 5,9 мг/дм<sup>3</sup>, в источнике Сеюя — 1,8 мг/дм<sup>3</sup>, а в остальных гидротермах концентрация сероводорода не превышала 0,1 мг/дм<sup>3</sup>.

Изучение катионного состава минеральных вод гидротерм показало, что в них преобладают щелочные металлы. Содержание ионов магния колеблется от 0,25 до 15,25 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание ионов кальция в водах источников варьирует в пределах 0,37-32,06 мг/дм<sup>3</sup>. Максимальное содержание кальция отмечено в термальном источнике Алла, наименьшее количество этого катиона определено в гидротерме Сеюя. Исследование анионного состава показало, что в воде большинства источников гидрокарбонаты и сульфаты преобладали над остальными ионами. В азотных термах присутствие карбонат-иона резко сдвигает величину рН в щелочную сторону. Содержание сульфатов в гидротермах изменялось от 64 мг/дм<sup>3</sup> (Сеюя) до 130,93 мг/дм<sup>3</sup> (Гусиха). Концентрация хлоридов минеральных вод колеблется от 14,38 мг/дм<sup>3</sup> (Алла) до 55,03 мг/дм<sup>3</sup> (Гарга).

Таблица 1

Изменение физико-химических параметров по изливу ручья источников Байкальской рифтовой зоны

Источник	Станция	T, °C	pH	Eh, мВ	H <sub>2</sub> S, мг/дм <sup>3</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>
Алла	Б-33	75,8	9,1	-172	11,4	77	76
	Б-33с	53	8,93	-100	1,3	106	54
	Б-34	74	9	-178	8,4	102	94
	Б-35	76,4	9,06	-154	18,4	81	70
	Б-6	53	9,1	-150	16	136	93
Сеюя	1	49	9,75	-96	2,5	53	50
	2	45	9,74	-84	0,4	79	50
	3	43	9,7	-20	0,01	101	64
Гусиха	1	72	8,5	340	0,01	83	310
	2	43	8,5	340	0,01	83	300
Гарга	1	74	8,5	20	0,01	85	460
	8	43	8,3	230	0,01	90	480
Горячинск	1	51,1	8,95	-63	1,0	48	83,6
	2	50	8,7	-63	1,0	49	126
	3	47,6	8,72	60	1,0	48	100
	4	19,3	7,43	100	1,0	49	100
Сухая	1	48,4	7,92	-95	19,37	463	37
	2	38,7	8,13	-66	7,77	460	73,4
Кучигер	1	34	9,56	-180	23,0	127	92,2
	2	41	9,72	-17	23,2	155	91
	3	39,6	9,6	-70	16,5	167	73

	4	33	9,85	-43	16,2	140	90
	5	24,7	9,53	-40	26,3	127	92,2

Eh — окислительно-восстановительный потенциал

В целях визуализации физико-химических параметров в местах отбора проб проведен анализ методом главных компонент [3, 4]. Метод главных компонент (Principal Component Analysis) — является одним из наиболее популярных методов статистического анализа многомерных данных. PCA позволяет преобразовать и визуализировать комплексные наборы данных в новое пространство главных компонент, в котором важность того или иного фактора становится более очевидной. Для анализа результатов методом главных компонент важны три составляющие: компонента счетов, компонента нагрузок и значение объясненной дисперсии. Счета — это проекции исходных образцов на подпространство главных компонент в координатах, обозначаемых PC1 и PC2.

Исходная матрица для характеристики гидротерм данных включала такие параметры, как температура, pH, окислительно-восстановительный потенциал, содержание сульфатов, гидрокарбонатов и сульфидных ионов (табл. 1, 2, рис. 1).

Близость двух точек на графике счетов (рис. 1) означает их схожесть — положительную корреляцию. Точки, расположенные под прямым углом, являются некоррелированными, а расположенные диаметрально противоположно — имеют отрицательную корреляцию.

Таблица 2

Характеристика главных компонент

Параметры среды	PC1	PC2	PC3
Температура			0,83
pH		0,59	
Eh	0,50		
Содержание сероводорода	0,47		
Содержание гидрокарбонатов		0,72	
Содержание сульфатов	0,53		
Объясненная вариация, D %	<b>77</b>	<b>12</b>	<b>5,5</b>

PC — главный компонент; Eh — окислительно-восстановительный потенциал; даны абсолютные значения главных компонент.

Нагрузки — это коэффициенты, связывающие исходные переменные и пространство главных компонент и определяющие вклад каждого параметра в главные компоненты. Компоненты (нагрузки и счета) определяются пошаговым способом — первая компонента объясняет максимум изменений — наибольшую вариацию, и имеет, соответственно, большее значение в объяснении состояния экосистемы, вторая компонента — оставшийся максимум и т.д.

Таким образом, используя меньшее, чем количество факторов, количество главных компонент, мы получаем полную характеристику наблюдаемых в экосистеме изменений.

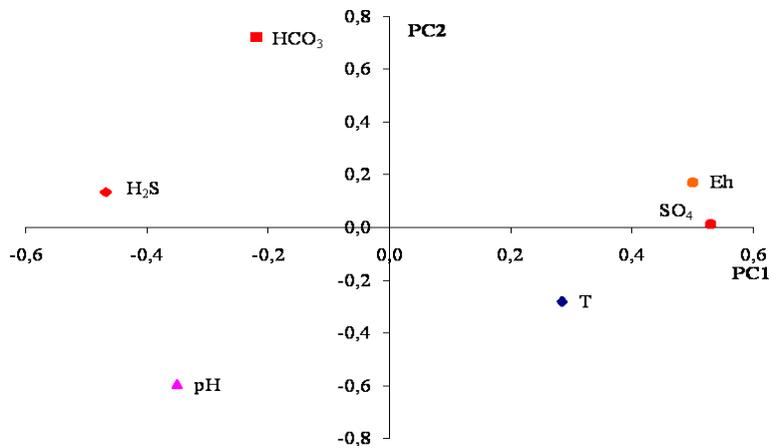


Рис. 1. Распределение физико-химических параметров, влияющих на функционирование микробных сообществ

Оптимальное для данной системы количество главных компонент — три компоненты, определили исходя из значений объясненной дисперсии. Три главные компоненты объясняют 94,5% наблюдаемых вариаций, иными словами, шум, оставшийся после проекции исходных данных на четырехмерное пространство PC1–PC3, составляет всего 5,5%.

PC1 объясняет 77% наблюдаемых изменений в среде обитания и представляет содержание сульфатов и сульфидов, а также значения окислительно-восстановительного потенциала. Наибольший вклад во вторую компоненту — PC2, вносят такие параметры, как pH и содержание гидрокарбонатов, они определяют 12% изменений. Основной вклад в третью главную компоненту (PC3) вносит температура, объясняя 5.5 % вариаций (табл. 2).

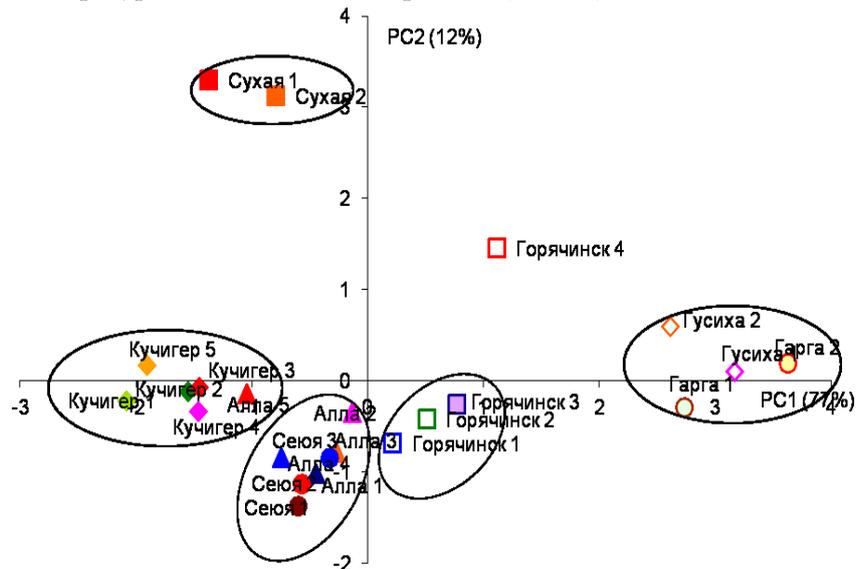


Рис. 2. Распределение гидротерм на основе главных компонент

Таким образом, в результате проведенного анализа методом РСА были получены кластеры местообитаний со сходными физико-химическими условиями (рис. 2).

*Работа выполнена в рамках темы Госзадания № госрегистрации АААА-А17-117011810034-9.*

#### **Литература**

1. Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Лабораторное руководство. — Л.: Наука, 1974. — 194 с.
2. Намсараев Б. Б., Бархутова Д. Д., Хахинов В. В. и др. Геохимическая деятельность микроорганизмов гидротерм Байкальской рифтовой зоны. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. — 302 с.
3. Geladi P. Analysis of multiway (multimode) data // *Chemom. Intell. Lab. Syst.* — 1989. — V. 7. — P. 11–30.
4. Hubert M., Engelen S. Robust PCA and classification in biosciences // *Bioinformatics.* — 2004. — V. 20. — P. 1728–1736.

#### FACTORS CONTROLLING THE STATE OF HYDROTHERMAL ECOSYSTEMS BAIKAL RIFT ZONE

*A. V. Malygin*

graduate

Institute of General and Experimental Biology SB RAS

670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy, Str., 6

E-mail: malygin\_1986@bk.ru

*D. D. Tsyrenova*

Candidate of Biology Sciences, Researcher

Microbiology Laboratory

Institute of General and Experimental Biology SB RAS

670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy, Str., 6

E-mail: baldanovad@rambler.ru

*S. V. Zaitseva*

Candidate of Biology Sciences, Researcher

Microbiology Laboratory

Institute of General and Experimental Biology SB RAS

670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy, Str., 6

svet\_zait@mail.ru

*D. D. Barkhutova*

Candidate of Biology Sciences, Researcher

Head of Microbiology Laboratory

Institute of General and Experimental Biology SB RAS

670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy, Str., 6

E-mail: darima\_bar@mail.ru

The main physical and chemical factors controlling the state of the ecosystem of alkaline hydrotherms of the Baikal rift zone as habitats of the thermophilic microbial community were revealed. The principal component method allowed us to quantify environmental fac-

tors that may play an important role in the functioning of the microbial community. Three main components were identified to explain 98% of the observed variations. The first major component explains 77% of the observed changes and represents the content of sulfate and sulfide ions, as well as redox potential. The greatest contribution to the second component is made by pH and the content of hydrocarbonate ions, they determine 12% of changes in the environment. The water temperature components are less important, explaining the 5.5% variation.

*Keywords:* alkaline hydrotherms, multivariate data analysis, principal component method, hydrocarbonate ions, microbial communities, sulfur-containing components, mineral waters