

УДК 556.5:551.343

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ТЕРМОКАРСТОВЫХ ВОДОЕМОВ СЕВЕРА ЯКУТИИ****Ядрихинский И.В., Городничев Р.М., Пестрякова Л.А.***ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
Якутск, e-mail: yadroid@mail.ru*

В статье приведены сведения о морфометрических и основных гидрохимических характеристиках термокарстовых водоемов территории бассейнов крупных северных рек Якутии и Новосибирских островов. Основная масса изучаемых водоемов обладает площадью меньше озерков (до 0,001 км², 68 ед.). Характерной особенностью для рассматриваемых водоемов является очень высокая степень освещенности дна. Водные объекты обладают ультрапресной (с минерализацией от 13 до 165 мг/л), очень мягкой водой (до 1,5 мг-экв/л), pH которой изменяется от сильноокислых до слабощелочных значений (4,7–8,7). Большинство водоемов характеризуется превышением рыбохозяйственных нормативов ПДК таких растворенных в воде компонентов как общее железо (73 водоема) и фосфат-анионы (в 49). Для изучаемых водных объектов отмечены преобладания различных положительно или отрицательно заряженных ионов, однако в большинстве случаев преобладают кальций (в 53 водоемах) и гидрокарбонаты (в 61). В результате кластерного анализа установлены 3 группы водоемов, четко отличающиеся друг от друга по таким интегральным показателям, как площадь зеркала, минерализация и pH воды.

Ключевые слова: водоем, термокарст, гидрохимия, морфометрия, прозрачность, кластерный анализ, Якутия

**MORPHOMETRICAL AND HYDROCHEMICAL PARAMETERS
OF THE TERMOKARST PONDS IN THE NORTHERN YAKUTIA****Yadrikhinskiy I.V., Gorodnichev R.M., Pestryakova L.A.***M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, e-mail: yadroid@mail.ru*

In this article we show the information about morphometrical and hydrochemical parameters of 83 thermokarst ponds located on the territory of major Yakutian river basins and the New Siberian Islands. Main quantities of investigated ponds have small water area (less than 0,001 km², 68 units). Character feature of the observed water objects is very high level of the water transparency. The ponds have ultra fresh water (mineralization: 13–165 mg/l), with very low total hardness (less than 1,5 mg-eq/l), pH fluctuates from highly acidic to low alkaline conditions (4,7–8,7). The most part of the water objects is characterized by high quantities (above Russian fishing industry limit for water dissolved chemical components) of dissolved iron (for 73 ponds) and phosphates (for 49 ponds). For the observed water objects the domination of the different positive and negative ions was noticed but in the most case the concentrations of calcium (for 53 ponds) and hydrocarbonates (for 61 ponds) are dominated. As a result of cluster analyzes 3 groups of ponds were obtained. These groups have obvious differences in the integral parameters like water area, mineralization and pH of water.

Keywords: pond, termokarst, hydrochemistry, morphometry, transparency, cluster analysis, Yakutia

Север Якутии – труднодоступная и слабоизученная территория во многих аспектах, связанных с поверхностными водными объектами [4, 5]. Одним из распространенных компонентов ландшафтов арктической территории региона являются водоемы, возникающие вследствие вытаивания мерзлоты, насыщенной льдом (термокарстовые водоемы). Такого рода водоёмы, разнообразные по форме, размерам, продолжительности развития и существования, изучены слабо. Следовательно, приведение сведений о химическом составе их воды и основных морфометрических характеристиках может существенно обогатить представления о данного рода природных образованиях.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования настоящей работы являются 83 водоема, общим для которых является термокарстовый генезис. Водоемы расположены

на севере Якутии (рис. 1) в бассейнах рек Анабар (1 водоем), Индигирка (28), Колыма (30) и на территории Новосибирских островов (9 – на о. Котельный (п-ов Фаддеевский); 15 – на о. Большой Ляховский) [2, 8]. Экспедиционные этапы исследования выполнены в летний период времени с 2007 по 2012 гг. Отбор и консервация проб воды на химический анализ проведена в соответствии со стандартными методиками (ГОСТ 31861-2012). В полевых условиях измерены морфометрические параметры водоемов (длина, ширина максимальная, максимальная глубина), определено значение прозрачности воды по диску Секки [9].

Лабораторные исследования проб воды выполнены широко применяемыми методами (ПНД Ф 14.1:2.4.167-2000; ПНД Ф 14.1:2.4.157-99; ПНД Ф 14.2.99-97; ГОСТ 4151-72; РД 52.24.433-2005; ПНД Ф 14.1:2.50-96; ПНД Ф 14.1:2.1-95). Такие морфометрические параметры, как площадь зеркала, средняя ширина, объем водной массы, изрезанность береговой линии и коэффициент удлиненности, установлены расчетным путем по стандартным формулам. Объем водной массы вычислен по формуле объема полусферы, где в качестве радиуса использована максимальная глубина, вместо значения площади окружности использована площадь зеркала водоема.

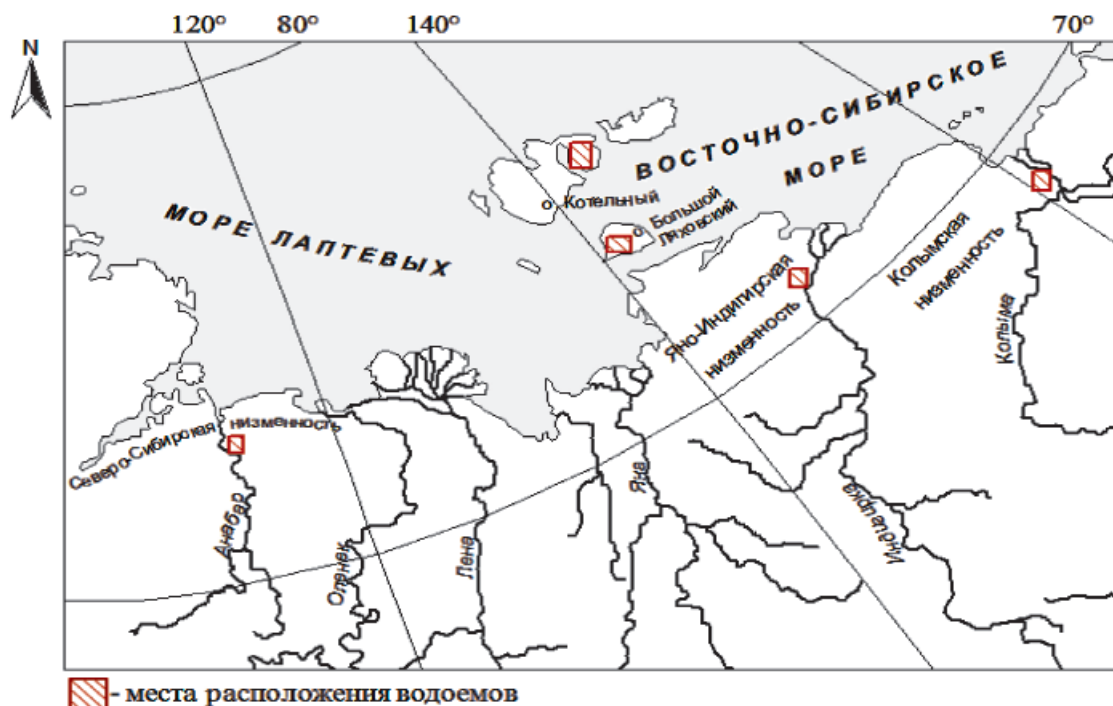


Рис. 1. Район исследования

Кластерный анализ данных проведен в программе Statistica Ver. 8.0 методом Варда. Исходными переменными для процедуры кластеризации избраны морфометрические параметры, прозрачность и гидрохимические характеристики, приведенные в таблице. При этом до проведения стандартизации такие параметры, как концентрации общего железа и кремния выражены в мг/л, концентрации главных ионов в мг-экв/л, остальные параметры – в единицах измерения, приведенных в таблице. Перед процедурой кластеризации значения всех переменных подвергнуты Z-стандартизации. Картограмма выполнена в программе ArcView Ver. 3.2a.

Результаты исследования и их обсуждение

Объектом исследования являются 83 термокарстовых [6] водоема (главным образом полигональные), расположенные на Севере Якутии. Ниже дана характеристика морфометрических, гидрохимических характеристик и прозрачности воды указанных водоемов данной слабоизученной и удаленной территории.

Морфометрические параметры термокарстовых водоемов

По значениям максимальной глубины в соответствии с классификацией С.П. Китаева [7], все рассматриваемые водные объекты могут быть отнесены к водоемам с очень малой глубиной (менее 3 м).

По величине площади водного зеркала, в соответствии с классификацией П.В. Иванова [7], термокарстовые водоемы принадлежат следующим группам: меньше озерков (до 0,001 км², 68 ед.); озерки (от 0,001 до 0,1 км², 10 ед.); очень малые (от 0,1 до 1,0 км², 2 ед.); малые озера (от 1,0 до 10 км², 3 ед.).

Все наиболее крупные водоемы расположены на территории п-ова Фаддеевский (о. Котельный) и представляют собой сросшиеся воедино близкорасположенные полигональные термокарстовые водоемы. Таким образом, по величине водного зеркала можно пронаблюдать степень «зрелости» термокарстовых водоемов. Наиболее ранние стадии образования полигонов характеризуются небольшими площадями водной поверхности, по мере таяния льдов происходит увеличение водной массы полигонов и их водной поверхности. Близкорасположенные водоемы могут сливаться, формируя более крупные образования, по площади соизмеримые с озерами, однако обладающие малой глубиной и характеризующиеся полным промерзанием водной толщи в зимний период.

По форме водной поверхности в соответствии с классификацией С.В. Григорьева [7],

термокарстовые водоемы принадлежат следующим группам: обладающие округлой формой (показатель удлиненности ($K_{уд}$) < 1,5; 43 ед.); близкой к округлой ($K_{уд} = 1,5-3,0$; 29 ед.); близкой к овальной ($K_{уд} = 3,0-5,0$; 5 ед.); овально-удлиненной ($K_{уд} = 5,0-7,0$; 4 ед.); удлиненной ($K_{уд} = 7,0-10,0$; 1 ед.) и вытянутой в виде борозды ($K_{уд} > 10$; 1 ед.).

Значения морфометрических и гидрохимических параметров термокарстовых водоемов выделенных кластеров

Название параметра	Категория значений	Кластер 1 (n = 5)	Кластер 2 (n = 34)	Кластер 3 (n = 44)	Вся выборка (n = 83)
1	2	3	4	5	6
Длина, м	Макс.	2906,0	100,0	403,0	2906,0
	Сред.	1950,8	23,3	31,6	143,8
	Мин.	1246,0	4,0	4,0	4,0
Ширина, м	Макс.	1417,0	50	218,0	1417,0
	Сред.	1156,2	12,53823529	19,6	85,2
	Мин.	877,0	1,4	1,0	1,0
Ширина средняя, м	Макс.	1015,2	50,0	162,4	1015,2
	Сред.	799,5	12,5	16,7	62,2
	Мин.	539,2	1,4	0,4	0,4
Максимальная глубина, м	Макс.	1,1	2,4	2,0	2,4
	Сред.	0,9	0,5	0,4	0,5
	Мин.	0,6	0,1	0,1	0,1
Длина береговой линии, км	Макс.	8,05	0,26	1,07	8,05
	Сред.	5,35	0,07	0,11	0,41
	Мин.	3,56	0,01	0,01	0,01
Показатель удлиненности	Макс.	2,9	5,8	11,4	11,4
	Сред.	2,4	1,8	2,2	2,1
	Мин.	1,8	1,0	1,0	1,0
Развитие (изрезанность) береговой линии	Макс.	1,3	1,6	5,9	5,9
	Сред.	1,2	1,2	1,4	1,3
	Мин.	1,1	1,0	1,0	1,0
Площадь водного зеркала, км ²	Макс.	2,9503000	0,0035000	0,0406000	2,9503000
	Сред.	1,6427600	0,0005158	0,0020228	0,1002451
	Мин.	0,6719000	0,0000110	0,0000014	0,0000014
Приблизительный объем, км ³	Макс.	0,0010818	0,0000025	0,0000081	0,0010818
	Сред.	0,0004901907	0,0000001769	0,0000004075	0,0000298181
	Мин.	0,0002333333	0,0000000017	0,0000000001	0,0000000001
Прозрачность, м	Макс.	0,1	2,4	1,1	2,4
	Сред.	0,1	0,5	0,4	0,4
	Мин.	0,0	0,1	0,1	0,0
pH	Макс.	8,4	8,7	8,3	8,7
	Сред.	8,1	7,3	6,5	6,9
	Мин.	7,6	6,2	4,7	4,7
Жесткость общая расчетная, мг-экв./л	Макс.	0,3	2,0	1,1	2,0
	Сред.	0,2	1,0	0,4	0,6
	Мин.	0,1	0,6	0,1	0,1
Минерализация, мг/л	Макс.	33,5	164,9	104,8	164,9
	Сред.	20,2	88,1	33,2	54,9
	Мин.	13,4	54,3	15,0	13,4
Fe _{об} , мг/л	Макс.	0,2	3,2	9,9	9,9
	Сред.	–	0,7	1,8	1,3
	Мин.	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
Ca ²⁺ , мг/л	Макс.	3,9	21,9	12,0	21,9
	Сред.	1,8	11,2	3,7	6,7
	Мин.	1,0	5,2	1,1	1,0
Mg ²⁺ , мг/л	Макс.	1,9	11,2	6,0	11,2
	Сред.	1,1	4,9	2,2	3,2
	Мин.	0,7	2,1	0,7	0,7
∑ Na ⁺ + K ⁺ , мг/л	Макс.	2,8	13,0	9,5	13,0
	Сред.	2,2	7,3	2,7	4,5
	Мин.	1,7	3,1	0,6	0,6
Si, мг/л	Макс.	–	5,5	3,3	5,5
	Сред.	–	0,6	1,4	1,1
	Мин.	–	0,1	0,1	0,1
HCO ₃ ⁻ , мг/л	Макс.	20,7	90,7	53,4	90,7
	Сред.	10,9	46,8	14,6	27,6
	Мин.	6,7	20,0	2,7	2,7
SO ₄ ²⁻ , мг/л	Макс.	0,8	40,8	17,3	40,8
	Сред.	0,4	9,8	7,6	8,1
	Мин.	0,2	0,1	0,1	0,1
Cl ⁻ , мг/л	Макс.	3,6	28,0	12,6	28,0
	Сред.	3,2	8,0	2,3	4,7
	Мин.	2,4	1,0	0,1	0,1
Ca ²⁺ , %	Макс.	21,4	29,4	29,3	29,4
	Сред.	15,6	22,3	19,6	20,4
	Мин.	10,6	15,2	7,3	7,3
Mg ²⁺ , %	Макс.	20,9	21,5	26,7	26,7
	Сред.	17,0	15,5	19,4	17,7
	Мин.	14,7	9,1	6,8	6,8
∑ Na ⁺ + K ⁺ , %	Макс.	24,7	19,9	34,1	34,1
	Сред.	17,5	12,2	11,0	11,9
	Мин.	11,8	3,6	3,4	3,4
HCO ₃ ⁻ , %	Макс.	37,9	40,5	49,0	49,0
	Сред.	31,2	31,3	25,5	28,2
	Мин.	27,3	17,1	6,7	6,7
SO ₄ ²⁻ , %	Макс.	3,1	31,3	42,4	42,4
	Сред.	1,6	9,4	18,3	13,7
	Мин.	1,0	0,1	0,2	0,1
Cl ⁻ , %	Макс.	21,5	23,1	27,6	27,6
	Сред.	17,2	9,4	6,2	8,1
	Мин.	11,0	1,2	0,6	0,6
Природная зона		АТ(5)	АТ(13), ТТ (21)	АТ(6), ТТ(38)	АТ(24), ТТ(59)
Территория		НО(5)	Кол(19), НО(13), Инд(1)	Инд(27), Кол(11), Ан(1), НО(6)	НО(24), Кол(30), Инд(28), Ан(1)
Генезис		ЭТ(5)	Т(34)	ЭТ(2), Т(42)	ЭТ(7), Т(76)

Примечание. Серой заливкой выделены наименьшие и наибольшие значения параметров выборки; красным жирным шрифтом даны наименьшие средние значения; синим жирным – наибольшие средние значения параметров.

Физико-химические параметры воды

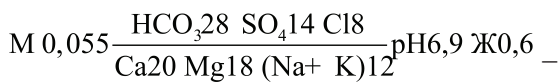
Такой физический параметр воды, как прозрачность, варьирует в достаточно широких пределах (от 0,03 до 2,4 м), в среднем составляя 0,41 м. Доля прозрачности от максимальной глубины водоема изменяется от 3 до 100 %, при среднем значении 92 %, что свидетельствует об очень высокой степени освещенности дна водных объектов.

Водородный показатель изменяется от сильноокислых до слабощелочных значений (4,7–8,7). Все водные объекты обладают ультрапресной водой, с минерализацией от 13 до 165 мг/л. В соответствии со значениями общей жесткости вода практически всех объектов является очень мягкой (до 1,5 мг·экв/л).

Большинство водоемов характеризуется превышением рыбохозяйственных нормативов ПДК таких компонентов, как общее железо (73 водоема) и фосфат-анионы (в 49 объектах достигнут или превышен норматив для олиготрофных водоемов).

Для изучаемых водных объектов отмечены преобладания различных положительно или отрицательно заряженных ионов, однако в большинстве случаев преобладают кальций (в 53 водоемах) и гидрокарбонаты (в 61).

Средние значения гидрохимических параметров позволяют описать их воду следующей формулой М.Г. Курлова [1]:



хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатная натриево-магниевая-кальциевая вода, с общей минерализацией 0,055 г/л, преобладающей концентрацией гидрокарбонатных ионов и ионов кальция, нейтральным водородным показателем и очень мягкая. По О.А. Алекину она принадлежит классу гидрокарбонатных группы кальциевых вод II типа: C_{II}^{Ca} .

Статистическая обработка данных

В результате кластерного анализа установлены 3 группы водоемов (рис. 2), по совокупности морфометрических и гидрохимических параметров четко отличающиеся между собой.

Подробное рассмотрение распределения значений переменных водоемов по кластерам позволяет сделать вывод о том, что исследуемые водоемы разных групп от-

личаются как по значениям морфометрических характеристик, так и по величине гидрохимических параметров.

Наибольшее отличие в изучаемых группах установлено по значениям характеристик, описывающих размеры водных объектов (площадь зеркала и объем водной массы). Средние значения групп отличаются минимум на 1 порядок (между 2 и 3 кластерами). Так наибольшим размером водной поверхности обладают водоемы кластера 1, представленные крупными по площади, предположительно эрозионно-термокарстовыми водоемами, образованными под влиянием термокарстовых процессов. Такого рода крупные, равные площадям озер водоемы обладают, однако, очень малой глубиной и промерзают до дна, что не позволяет отнести их к «настоящим озерам».

В наборе объектов исследования можно выделить 3 стадии образования термокарстовых водоемов севера Якутии, характеризующиеся увеличением размеров водной поверхности по мере развития процессов таяния подземного льда. Обширные по площади поверхности объекты образуются в результате оттаивания льда на большой территории, что для исследуемых водоемов, по-видимому, может быть связано с отепляющим и эрозионным (механическим) воздействием водотоков.

Важным интегральным показателем химического состава воды является общая минерализация, которая также существенно отличается для объектов выделенных групп водоемов.

Наибольшие количества растворенных солей отмечены для объектов 2-й группы, представленных наименьшими по размерам водной поверхности водоемами, данные объекты основную массу воды, по-видимому, получают за счет таяния ледового комплекса, результатом чего является обогащение солями и ионами грунтов. По мере дальнейшего развития водоемов новые порции воды не привносят существенного количества солей ввиду лучшей промытости грунтов в сравнении с начальными этапами развития полигонов. Последующие порции воды способствуют опреснению. Данное обстоятельство может служить объяснением, почему большие по площади полигональные водоемы, находящиеся на одной широте обладают меньшей минерализацией.

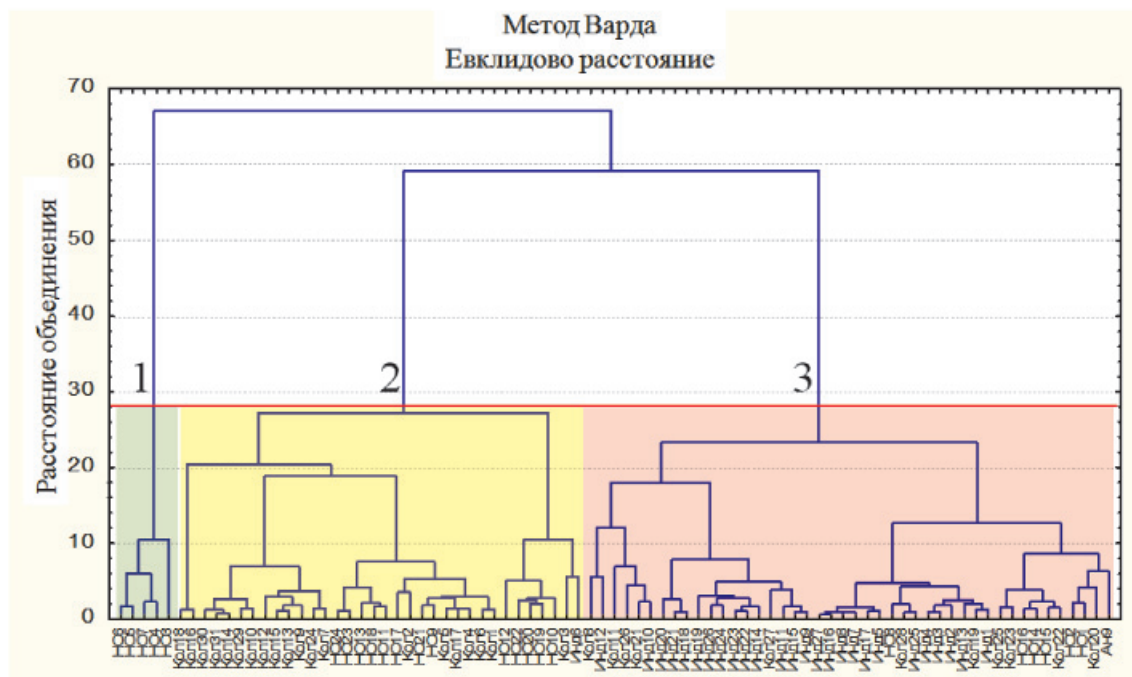


Рис. 2. Кластеры водоемов по сочетанию морфометрических, гидрохимических характеристик и прозрачности воды

Наименьшие значения минерализации зафиксированы для наиболее крупных озер 1-го кластера, которые расположены севернее других в зоне арктической тундры. Вероятно, она является отражением зональности, действующей на баланс солей водных объектов и доказанной в более ранних работах для озер Севера Якутии [3].

Отличается химический состав воды объектов различных групп и по значениям других химических параметров (например, по pH, общей жесткости и др.). Химический тип воды, различных кластеров, вычисленный по средним значениям гидрохимических параметров водоемов различных кластеров, также отличается. Водоемы кластера 1 обладают кальциево-магниевно-натриевой хлоридно-гидрокарбонатной, ультрапресной очень мягкой, слабощелочной водой. Для водоемов кластеров 2 и 3 характерна натриево-магниевно-кальциевая хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатная вода, ультрапресная, очень мягкая с преимущественно нейтральным pH.

Заклучение

Основная масса изучаемых водоемов обладает очень малой глубиной (макси-

мальная глубина меньше 3 м), площадью меньше озерков (до 0,001 км², 68 ед.). Величина водного зеркала термокарстовых водоемов, вероятно, отражает степень их развития (наиболее крупные водоемы представлены объединением множества мелких). Характерной особенностью для рассматриваемых водных объектов является небольшая глубина и очень высокая степень освещенности дна. Водные объекты обладают ультрапресной (с минерализацией от 13 до 165 мг/л), очень мягкой водой (до 1,5 мг·экв/л), pH воды изменяется от сильноокислых до слабощелочных значений (4,7–8,7). Большинство водоемов характеризуется превышением рыбохозяйственных нормативов ПДК таких растворенных в воде компонентов, как общее железо (73 водоема) и фосфат-анионы (в 49). Для изучаемых водных объектов отмечены преобладания различных положительно или отрицательно заряженных ионов, однако в большинстве случаев преобладают кальций (в 53 водоемах) и гидрокарбонаты (в 61). В результате кластерного анализа установлены 3 группы водоемов, четко отличающиеся друг от друга по таким интегральным показателям, как площадь зеркала, минерализация и pH воды.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности научно-исследовательской работы № 5.1771.2014/К «Реконструкция климатических изменений голоцена Центральной Якутии с применением комплексных геоэкологических лимнологических методов».

Список литературы

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии – Л.: Гидрометеодат, 1953. – 296 с.
2. Городничев Р.М., Пестрякова Л.А. Гидрохимическая характеристика водных объектов полуострова Фаддеевский (Новосибирские о-ва) // Наука и образование. – 2014. – № 1 (73). – С. 80–85.
3. Городничев Р.М., Пестрякова Л.А., Ядрихинский И.В. Взаимосвязи диатомовых водорослей с морфометрическими, гидрохимическими характеристиками и параметрами местоположения озер Севера Якутии // Вестник СВФУ. – 2015. – № 6 (50). – С. 14–26.
4. Городничев Р.М., Спиридонова И.М., Пестрякова Л.А. Сходство таксономического состава диатомовых водорослей озер Севера Якутии [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/123-20117>. – (Дата обращения: 29.06.2015).
5. Городничев Р.М., Спиридонова И.М., Пестрякова Л.А. Разнообразие диатомовых водорослей водоемов северной части Якутии [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/123-19641> (Дата обращения: 09.06.2015).
6. Жирков И.И. Морфогенетическая классификация как основа рационального использования, охраны и воспроизводства природных ресурсов озер криолитозоны (на примере Центральной Якутии) // Вопросы рационального использования и охраны природных ресурсов разнотипных озер криолитозоны (На примере Центральной Якутии). Межвузовский сборник. – Якутск: ЯГУ, 1983а. – С. 4–47.
7. Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 160 с.
8. Ушницкая Л.А., Городничев Р.М., Спиридонова И.М., Пестрякова Л.А. Предварительная лимнологическая характеристика водоемов полуострова Фаддеевский (Новосибирские острова) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 8. – С. 189–192.
9. Tyler J. E. The Secchi disc // Limnology and Oceanography. – 1968. – Vol. 13, № 1. – P. 1–6.