

БИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 579.26

DOI: 10.18101/2542-0623-2025-4-6-14

СЕЗОННЫЕ И МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА В ОЗЕРЕ БЕЛОЕ (СЕЛЕНГИНСКОЕ СРЕДНЕГОРЬЕ)

В. Б. Дамбаев, Т. В. Давыдова

© **Дамбаев Вячеслав Борисович**

кандидат биологических наук, научный сотрудник

astra78plus@mail.ru

© **Давыдова Туяна Владимировна**

кандидат биологических наук, младший научный сотрудник

maust678@mail.ru

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Аннотация. Проведены исследования сезонной динамики гидрохимических и микробиологических показателей озера Белое. Основными физико-химическими параметрами, влияющими на активность и распространение бактерий — деструкторов органического вещества, являются температура, концентрация и состав органического вещества, минерализация и Eh. Проведенные исследования по влиянию сезонной динамики физико-химических условий на микробные сообщества донных отложений озера Белое показали активное развитие специфического алкалофильного микробного сообщества, способного проводить биогеохимические процессы трансформации органического вещества. Наиболее интенсивно микробные процессы протекают в весенне-осенние периоды года, когда условия окружающей среды являются наиболее благоприятными для развития и деятельности микробного сообщества. В донных отложениях озера Белое обнаружены сезонные пики утяжеления $d^{13}C$ органического вещества, которые, вероятнее всего, вызваны гетеротрофными сульфатредуцирующими бактериями.

Ключевые слова: сезонная динамика, органическое вещество, карбонаты, донные отложения, стабильные изотопы углерода ($\delta^{13}C$), сульфатредуцирующие бактерии, озеро Белое.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института общей и экспериментальной биологии СО РАН (проект № 121030100229-1).

Для цитирования

Дамбаев В. Б., Давыдова Т. В. Сезонные и межгодовые изменения физико-химических показателей и изотопный состав углерода в озере Белое (Селенгинское

среднегорье) // *Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia*. 2025. № 4(33). С. 6–14.
DOI: 10.18101/2542-0623-2025-3-6-14

Введение

Причиной неустойчивого водного и химического режимов озер является криоаридный климат Забайкалья. На этой территории в засушливые годы большинство водоемов пересыхает и вновь наполняется в водный период. Эти озера относятся к соленым, опресняющимся в период многоводья, с постоянно меняющейся минерализацией озерам [Власов, 1973; Иванов, 1977]. В периоды аридизации и увлажнения климата заметно отличается содержание биогенных элементов, органического вещества и их концентраций. Однако при длительном преобладании процессов испарения над притоком в бессточных водоемах (в течение нескольких лет), ведущих к необратимым химическим и биохимическим реакциям, глубоких изменений химического состава воды не происходит [Самарина и др., 1977]. Сезонные изменения условий среды оказывают воздействие на активность микробных сообществ в озерах.

В бессточных котловинах, где в условиях криоаридного климата преобладают содовые озера, процесс испарения превосходит процесс притока, но это не приводит к необратимым химическим и биохимическим реакциям [Самарина и др., 1977]. Содовые озера с высокими значениями рН и высокой степенью минерализации являются экстремальными водными экосистемами. Такие условия обуславливают развитие специфического алкалофильного микробного сообщества, способного проводить биогеохимические процессы трансформации органического вещества.

Целью исследования являлось изучение влияния сезонных изменений физико-химических параметров среды и изотопного состава углерода $d^{13}C$ на микробную деструкцию органического вещества в донных отложениях оз. Белое. В задачи исследования входили определение сезонных колебаний физико-химических показателей воды; определение численности бактерий — деструкторов органического вещества в донных отложениях; определение сезонной динамики разложения целлюлозы и белка в осадках озера; определение изотопных вариаций $d^{13}C$ в донных отложениях.

Материалы и методы

Объектом исследования являлось озеро Белое, которое расположено вблизи с. Оронгой (Иволгинский район, Республика Бурятия). Северо-восточная оконечность озера покрыта коркой солей и представлена прибрежными солончаковыми почвами. Водное питание озеро получает за счет атмосферных осадков и близко расположенных грунтовых вод. Глубина озера достигает 2 м [Дамбаев, 2004]. Исследования сезонной динамики гидрохимических и микробиологических показателей озера были проведены с 2006 по 2007 г., изотопного состава углерода ($d^{13}C$) в 2008 г.

В момент отбора проб в воде измеряли следующие показатели: температура, значение рН, минерализация (М) и окислительно-восстановительный потенциал (Eh). Температуру воды измеряли электронным термометром (Hanna),

pH — портативным pH-метром (pНер, Hanna), окислительно-восстановительный потенциал — портативным редокс-метром (ORP 200), минерализацию воды — кондуктометром (DIST 2). Органическое вещество донных отложений определяли по методу Тюрина [Воробьева, 1998]. Анионный состав воды в озере определяли согласно методике [Кузнецов, Дубинина, 1989]. Динамику деструкции природных полимеров в донных отложениях определяли аппликационным методом [Гельцер, 1986; Гельцер, 1990]. Пластинки с соответствующими субстратами размещали в поверхностном слое (5 см) донных осадков. Учет численности аэробных и анаэробных целлюлозоразлагающих бактерий и сапрофитов проводили методом предельных разведений. Численность сульфатредуцирующих бактерий определяли на среде Видделя [Романенко, Кузнецов, 1974].

Характеристика изотопного состава $d^{13}C$ донных отложений. Подавляющее большинство всего природного углерода представлено изотопом ^{12}C . Почти 99% всего углерода находится в этой форме. Только около 1% углерода представлено изотопом ^{13}C . Изотопный состав углерода измеряется в углекислом газе методом масс-спектрометрии изотопных отношений (IRMS). Образец CO_2 получают из природных материалов с использованием различных методов экстракции. Карбонаты реагируют с более чем 100% H_3PO_4 при заданной температуре от 25 до 100 °C. Органический углерод обрабатывается CuO или O_2 в качестве окислителя. Количество $^{13}C/^{12}C$ карбонатов и органического вещества в донных отложениях представлено в виде $d^{13}C$ в образце и стандарте PDB [Зякун, Дилли, 2011].

Результаты и обсуждение

Сезонные изменения физико-химических показателей среды и численность микроорганизмов — деструкторов органического вещества. В разные сезоны года происходило изменение физико-химических параметров воды и донных отложений. Температура воды в озере в летний период достигала +23 °C, а зимой опускалась до 0 °C. Значение pH воды в интервале 8,3–9,21. Минерализация воды увеличивалась в осенне-зимний период до 3,4 г/л. Летом наблюдался спад минерализации до 1,2 г/л. Показание окислительно-восстановительного потенциала воды зависело от условий окружающей среды и варьировало от +129 до +314 мВ (табл. 1).

Исследование анионного состава выявило преобладание сульфатов и гидрокарбонатов в воде. Содержание сульфатов доходило до 1,13 г/л, а гидрокарбонатов — до 769 мг/л. Концентрация хлоридов была небольшой — 370 мг/л. В зимний период происходило снижение содержания хлоридов до 257 мг/л. Наблюдалось также снижение количества сульфатов и гидрокарбонатов в воде до 561 мг/л и 415,1 мг/л соответственно. Минимальное значение минерализации, содержания карбонатов и гидрокарбонатов было отмечено в июне, а максимальное в ноябре.

Весной в озере концентрация солей уменьшается, минерализация идет на спад в результате таяния снега и льда. Летом в условиях криоаридного климата характерно выпадение небольших атмосферных осадков. Лишь во второй половине лета наблюдаются обильные осадки с дальнейшим понижением температуры воздуха.

В Забайкалье в весенне-летний период количество осадков достигает 25%. На конец июля и август приходится до 55% осадков. В осенне-зимнее время количество осадков не превышает 20% [Мизандронцева, 1976].

Таблица 1

Физико-химические параметры озера Белое

Дата отбора проб	pH	T, °C воздуха	T, °C воды	T, °C ила	ОВП, мВ	М, г/л	Толщина льда, см	CO ₃ ²⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л
10.11.06	9,1	-11,4	+0,3	+2,1	+234	1,6	21	н.о	769
23.11.06	8,96	-18,9	+0,1	+1,8	+201	2,1	23	н.о	384,3
06.12.06	8,81	-21,7	+1,6	+2,4	+202	2	30	н.о	414,9
27.02.07	8,5	-11,4	0	н.д.	+248	2,2	43	н.о	586,7
17.04.07	8,3	+6,0	+4,6	+4,2	+129	1,8	1,5	н.о	160,8
11.05.07	9,13	+10,1	+8,4	+9,2	+178	1,72	–	36	91,5
22.06.07	8,8	+26,4	+23,2	+20,7	+257	1,2	–	15	9,15
20.07.07	8,9	+20,5	+22	+20,3	+194	1,84	–	3,84	9,76
17.08.07	8,91	+24,0	+19,3	+19,4	+219	1,9	м	48	24,4
27.09.07	9,21	+8,7	+6,9	+7,1	+218	1,98	–	168	780,8
31.10.07	8,87	-0,7	+0,9	+4	+314	3,15	10	132	890,6
08.11.07	9,07	-2,5	+0,1	+0,2	+249	3,4	13	168	841,8
23.11.07	9,02	-14,1	+0,2	+0,3	+205	2,16	29	132	963,8

«н. о» — не определено.

В донных отложениях широко распространены микроорганизмы, которые активно участвуют в синтезе и деструкции органического вещества. Определена численность различных физиологических групп микроорганизмов — деструкторов органического вещества.

Основную роль в круговороте углерода играют целлюлозоразлагающие и протеолитические бактерии, так как растительные остатки содержат до 50% целлюлозы. Целлюлоза является распространенным органическим полимером из всех биомолекул в биосфере. Животные ткани и их остатки содержат до 80% белка. В разные сезоны года была определена численность аэробных и анаэробных целлюлозоразлагающих, протеолитических и сульфатредуцирующих бактерий (табл. 2). Численность аэробных протеолитических бактерий была больше численности аэробных целлюлозоразлагающих бактерий на один-два порядка и достигала 10⁷ кл/см³. Максимальное количество анаэробных целлюлозоразлагающих и протеолитических бактерий достигала 10⁶ кл/см³ и 10⁷ кл/см³. Преобладание протеолитических бактерий, вероятно, обусловлено доступностью белковых субстратов и их легкой утилизацией. Количество сульфатредуцирующих бактерий составляло от 10² до 10⁴ кл/см³.

Активность микробного сообщества напрямую зависит от количества органического углерода (C_{орг}), который служит субстратом для гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в разложении автохтонного и аллохтонного органического вещества. Количество C_{орг} в разные сезоны года варьировало от 0,92 до 1,34% (рис. 1).

Таблица 2

Численность микроорганизмов — деструкторов
органического вещества в донных отложениях озера Белое

Озеро Белое	Целлюлолитики		Протеолитики		Сульфатредукторы
	Аэробы	Анаэробы	Аэробы	Анаэробы	
10.11.06	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁴	10 ³
23.11.06	10 ³	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁶	10 ³
06.12.06	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁷	10 ⁶	10 ³
27.02.07	10 ³	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁶	10 ²
17.04.07	10 ³	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁶	10 ³
11.05.07	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁶	10 ²
22.06.07	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁷	10 ³
20.07.07	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁴
17.08.07	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁶	10 ³

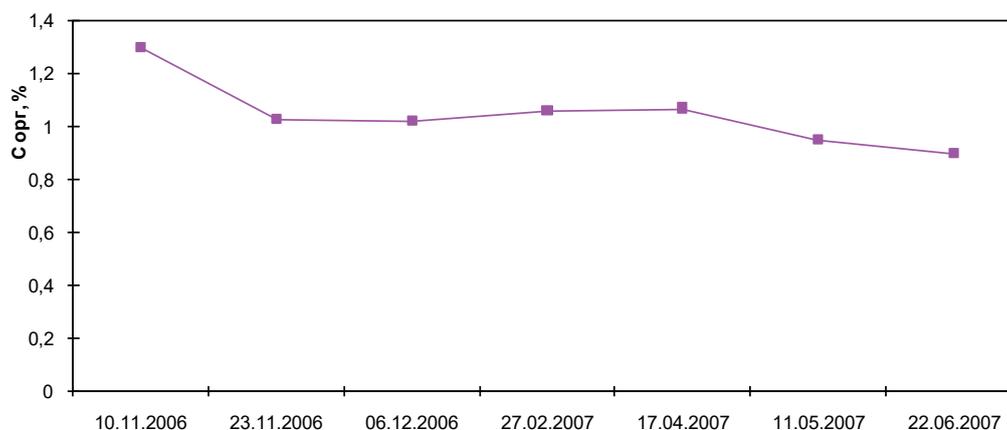


Рис. 1. Содержание органического вещества в донных отложениях озера Белое в разные сезоны и годы

Определена целлюлолитическая и протеолитическая активность *in vitro* в донных отложениях. В разные месяцы года скорость деструкции целлюлозы и белка носит неравномерный характер (рис. 2). Скорость деструкции целлюлозы в донных отложениях варьировала от 0,28 до 0,48 % в сутки. Оценка скорости минерализации белка с помощью аппликационного метода выявила высокие значения от 2,4 до 3,25 % в сутки. Минимальные значения деструкции природных полимеров отмечены в ноябре, а высокие в сентябре.

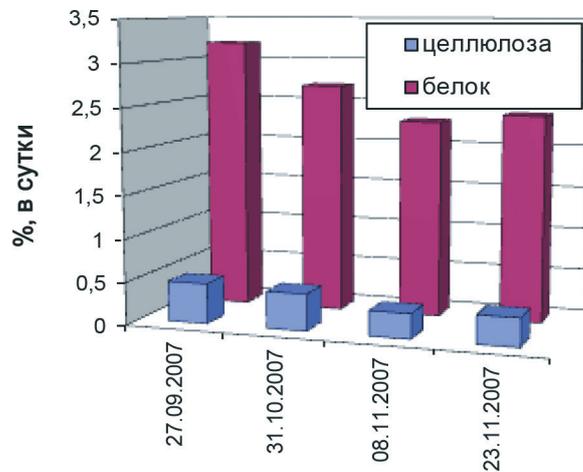


Рис. 2. Динамика деструкции целлюлозы и белка в донных отложениях озера Белое

Наиболее интенсивно микробные процессы протекают в середине — конце весны и конце лета — середине осени, когда условия окружающей среды являются наиболее благоприятными для развития и деятельности микробного сообщества. В содовом озере Белое при температурах от $+0,2$ до $+20,7^{\circ}\text{C}$ активно протекает деструкция органического вещества различными группами гетеротрофных микроорганизмов.

Изотопный состав углерода ($d^{13}\text{C}$) в донных отложениях. Большое содержание органического вещества выявлено в феврале и июле (табл. 3). Содержание органического вещества подвержено сезонным колебаниям, варьируя от 1,88 до 25,5% на минеральную часть навески.

Обнаружено различие в изотопном составе $d^{13}\text{C}_{\text{орг}}$. Период всплеска $d^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ в донных отложениях был отмечен в апреле и июле 2008 г., что составляло $-16,60$ и $-19,48\text{‰}$ соответственно. Значения $d^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ не были подвержены колебаниям и находились в пределах от $-10,29$ до $-12,45\text{‰}$ соответственно.

По Лондри и Дес Марэйс [2003], сульфатредуцирующие бактерии *D. acetoxidans* используют ацетат в качестве единственного источника энергии и углерода. Они способны полностью окислять субстраты до углекислого газа с сульфатом в качестве акцептора электронов, который восстанавливается до сероводорода, при этом увеличивая $d^{13}\text{C}$ метаболизированный ацетат на 8–9‰. Отмечен факт увеличения $d^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ в донных осадках на 8–9‰. Можно предположить, что случаи с утяжелением $d^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ в донных отложениях объясняются влиянием сульфатредуцирующих бактерий *D. acetoxidans*.

При этом периоды утяжеления $d^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ в донных отложениях были близки к периодам нарастания концентраций SO_4^{2-} и численности клеток сульфатредуцирующих бактерий [Дамбаев и др., 2004]. Что касается изотопно-легкой углекислоты, продуцируемой сульфатредуцирующими бактериями, то она, вероятно, вовлекается в фотосинтез, образующий изотопно-облегченное органическое

вещество. Об этом свидетельствуют периоды снижения содержания карбонатов в донных отложениях с 19,2 до 18,1% в течение весенне-летнего сезона. Показатели $d^{13}C_{\text{карб}}$ в донных отложениях изменялись незначительно. Остальная часть изотопно-легкого органического вещества, содержащегося в донных отложениях, аллохтонная и усреднена по $d^{13}C$.

Таблица 3

Содержание и изотопный состав углерода $\delta^{13}C$ в донных отложениях оз. Белое

Дата отбора проб	Содержание карбонатов, в % на воздушно-сухую навеску	Содержание ОВ, в % на минеральную часть навески	$\delta^{13}C_{\text{карб}}$, в ‰	$\delta^{13}C$ ОВ, в ‰
27.02.08	52,3	25,55	-11,67	-30,12
10.04.08	26,06	10,84	-11,28	-16,60
29.05.08	19,2	2,17	-10,77	-30,36
30.06.08	27,8	7,25	-12,45	-23,73
16.07.08	39,5	29,03	-12,05	-19,48
25.09.08	18,08	1,88	-10,29	-28,65

Основными физико-химическими параметрами, влияющими на активность и распространение бактерий — деструкторов органического вещества, являются температура, концентрация и состав органического вещества, минерализация и Eh. Можно предположить, что выявленные в донных отложениях озера Белое закономерности сезонного взаимодействия между изменениями условий среды и микробными процессами деструкции органического вещества могут быть в той или иной степени применимы для других схожих экосистем. Таким образом, проведенные исследования влияния сезонной динамики физико-химических условий на микробные сообщества донных отложений оз. Белое показали активное развитие специфического алкалофильного микробного сообщества, способного проводить биогеохимические процессы трансформации органического вещества.

Литература

1. Власов Н. А., Филиппова Г. Р. Физико-химическая характеристика минеральных озер Юго-Восточного Забайкалья // Геохимия и гидрохимия природных вод Восточной Сибири. Иркутск, 1973. С. 3–57. Текст : непосредственный.
2. Воробьева Л. А. Химический анализ почв. Москва : Изд-во МГУ, 1998. 272 с. Текст : непосредственный.
3. Гельцер Ю. Г. Биологическая диагностика почв. Москва : Изд-во МГУ, 1986. 80 с. Текст : непосредственный.
4. Гельцер Ю. Г. Показатели биологической активности в почвенных исследованиях // Почвоведение. 1990. № 9. С. 47–60. Текст : непосредственный.
5. Дамбаев В. Б., Гончиков Г. Г., Намсараев Б. Б. Распространение микроорганизмов сапротрофного комплекса в сорowych солончаках Забайкалья // Почвоведение. 2004. № 11. С. 1360–1374. Текст : непосредственный.

6. Зякун А. М., Дилли О. Использование изотопной масс-спектрометрии для оценки метаболического потенциала почвенной микробиоты // Проблемы аналитической химии: изотопная масс-спектрометрия легких газообразующих элементов / под редакцией В. С. Севастьянова. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. Т. 15. С.141–167. Текст : непосредственный.
7. Иванов А. В. Торейские озера // Гидрохимия рек и озер в условиях резко континентального климата. Владивосток : Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 69–102. Текст : непосредственный.
8. Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. Москва : Наука, 1989. 288 с. Текст : непосредственный.
9. Мизандронцева К. Н., Погапова Л. С. Погодно-климатические условия Прибайкалья и Забайкалья // Материалы метеорологических исследований. Москва : Наука, 1976. Вып. 2. С. 60–71. Текст : непосредственный.
10. Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Ленинград : Наука, 1974. 194 с. Текст : непосредственный.
11. Самарина В. С. Гидрогеохимия. Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1977. С. 285–324. Текст : непосредственный.
12. Londry K. L., Des Marais D. J. Stable Carbon Isotope Fractionation by Sulfate-Reducing Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 2003; 69(5): 2942–2949.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025; одобрена после рецензирования 12.11.2025; принята к публикации 10.12.2025.

SEASONAL AND INTERANNUAL VARIATIONS IN PHYSICOCHEMICAL
PARAMETERS AND CARBON ISOTOPIC COMPOSITION OF LAKE BELOYE
(THE SELENGA MIDDLE MOUNTAINS)

V. B. Dambaev, T. V. Davydova

Vyacheslav B. Dambaev
Cand. Sci. (Biol.), Researcher
astra78plus@mail.ru

Tuyana V. Davydova
Cand. Sci. (Geogr.), Junior Researcher
maust678@mail.ru

Institute of General and Experimental Biology SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia

Abstract. The article presents the results of studying the seasonal dynamics of hydrochemical and microbiological parameters of Lake Beloye. The key physicochemical parameters influencing the activity and distribution of degrading bacteria are temperature, organic matter concentration and composition, mineralization, as well as Eh. Research on the influence of seasonal dynamics of physicochemical conditions on microbial communities in Lake Beloye's bottom sediments revealed the active development of a specific alkaliphilic microbial community capable of transforming organic matter. Microbial processes are most intense in the spring and fall, when environmental conditions are most favorable for the development

and activity of microbial community. We have detected seasonal peaks in the increase of $\delta^{13}\text{C}$ organic matter in Lake Belye's bottom sediments, which are most likely caused by heterotrophic sulfate-reducing bacteria.

Keywords: seasonal dynamics, organic matter, carbonates, bottom sediments, stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$), sulfate-reducing bacteria, Lake Belye.

Acknowledgments

The study was carried out within the framework of the state assignment of Institute of General and Experimental Biology SB RAS (Project No. 121030100229-1).

For citation

Dambaev V. B., Davydova T. V. Seasonal and Interannual Variations in Physicochemical Parameters and Carbon Isotopic Composition of Lake Belye (the Selenga Middle Mountains). *Nature of Inner Asia*. 2025; 4(33): 6–14 (In Russ.). DOI: 10.18101/2542-0623-2025-3-6-14

The article was submitted 30.10.2025; approved after reviewing 12.11.2025; accepted for publication 10.12.2025.