

УДК 519.8:51-76

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.44.1.013](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.013)

Оценка колебаний численности бактериопланктона по вертикали водной толщи озера Байкал за многолетний период

А.В. Бурдуковская¹, Т.И. Белых²✉, А.В. Родионов²

¹Иркутский государственный университет, Иркутск, Российская Федерация

²Байкальский государственный университет, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. В статье предлагаются два подхода к анализу временных рядов численности бактериопланктона в трех различных слоях водной толщи озера Байкал. При первом подходе рассчитываются значения сезонной компоненты рядов методом скользящей средней и строятся аддитивные и мультипликативные модели, из которых на основании рассчитанных коэффициентов достоверности выбираются лучшие. Проводится интерпретация оценок значений сезонной компоненты в каждой из них. При втором подходе выполняется корреляционно-регрессионный анализ совместного изменения численности бактериопланктона, температуры и уровня воды озера. Выдвигаются и проверяются статистические гипотезы о значимости коэффициентов корреляции между рассматриваемыми факторами. Строится математическая модель множественной регрессии с включением фиктивных переменных, описывающих влияние сезонных колебаний на изменение численности бактериопланктона. Рассчитывается статистическая оценка значимости построенной модели и включенных в модель факторов. Приводится интерпретация результатов корреляционно-регрессионного анализа по отношению к исследуемой предметной области. Делается вывод о том, что полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании количества бактериопланктона в разные периоды времени, при составлении экологического обоснования состояния озера, а также прогноза его микробиологического режима.

Ключевые слова: временные ряды, бактериопланктон, метод скользящей средней, сезонная компонента, корреляционно-регрессионный анализ, модель множественной регрессии, озеро Байкал.

Благодарности: авторы статьи выражают особую признательность и огромную благодарность Белых Ольге Ивановне, заведующей лабораторией водной микробиологии ЛИИ СО РАН, в.н.с., к.б.н., доценту и Потемкиной Татьяне Гавриловне, с.н.с., к.г.н. ЛИИ СО РАН, за предоставленную возможность при проведении данного исследования, а также за значимые замечания и советы при оформлении данной статьи.

Для цитирования: Бурдуковская А.В., Белых Т.И., Родионов А.В. Оценка колебаний численности бактериопланктона по вертикали водной толщи озера Байкал за многолетний период. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(1). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1507> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.013

Estimation of bacterioplankton abundance fluctuations in the vertical water column of Lake Baikal over a multi-year period

A.V. Burdukovskaya¹, T.I. Belykh²✉, A.V. Rodionov²

¹Irkutsk State University, Irkutsk, the Russian Federation

²Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation

Abstract. The paper proposes two approaches to analyzing time series of bacterioplankton abundance in three different layers of the water column in Lake Baikal. In the first approach, the values of the

seasonal component of the series are calculated using the moving average method, and additive and multiplicative models are constructed, from which the best models are selected on the basis of the calculated reliability coefficients. The seasonal component values in each of them are estimated. In the second one, correlation and regression analysis of joint changes in bacterioplankton abundance, temperature and lake water level is performed. Statistical hypotheses about the significance of correlation coefficients between the considered factors are put forward and tested. A mathematical model of multiple regression with inclusion of dummy variables describing the influence of seasonal fluctuations on changes in bacterioplankton abundance is constructed. Statistical assessment of the significance of the model and the factors included in the model is calculated. The results of correlation-regression analysis are interpreted in relation to the subject area under study. The findings can be used in predicting the amount of bacterioplankton in different periods of time, in making an ecological substantiation of the state of the lake, as well as in forecasting its microbiological state.

Keywords: time series, bacterioplankton, moving average method, seasonal component, correlation and regression analysis, multiple regression model, Lake Baikal.

Acknowledgements: the authors of this article express their special appreciation and gratitude to Olga I. Belykh, Head of the Laboratory of Aquatic Microbiology (LIN SB RAS, Chief Researcher, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor) and Tatiana G. Potemkina (Senior Researcher, Candidate of Geological Sciences, LIN SB RAS) for the opportunity to conduct this study, as well as for valuable feedback and advice in the design of this article.

For citation: Burdukovskaya A.V., Belykh T.I., Rodionov A.V. Estimation of bacterioplankton abundance fluctuations in the vertical water column of Lake Baikal over a multi-year period. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1507> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.013 (In Russ.).

Введение

Важнейшее место в экосистеме озера Байкал занимает бактериопланктон, поддерживающий процессы продукции, деструкции и самоочищения вод, а также служащий основанием пищевой пирамиды (белки, незаменимые аминокислоты, ростовые вещества и др.). И результатом этой деятельности является неповторимая по своим качествам чистая байкальская вода [1].

Его изучение, оценка сезонных колебаний численности в вертикальных слоях водной толщи значимо для прогнозирования экологического состояния озера.

Сегодня прогресс науки об озере Байкал, нужды практики приводят к необходимости систематизировать и осмыслить разнообразные и разнокачественные данные о структурных и функциональных особенностях микробиоценозов толщи вод Байкала. Что приведет к пониманию как наиболее существенных сторон экосистемы Байкала, так и пределов его стабильности и устойчивости [2-4].

Цель работы – выявить закономерности формирования количества бактериопланктона, оказывающего влияние на качество воды в озере методами прикладной математики, математической статистики и программного продукта STATISTICA ADVANCED: STATISTICA Advanced Linear/Nonlinear Models.

Задача исследования – изучить динамику численности бактериопланктона и факторов, ее определяющих, с использованием современных методов математического моделирования.

Материал и методы исследования

При написании статьи авторами были использованы данные, собранные группой ученых на Байкальской биологической станции (стационарная точка I) Иркутского государственного университета за 16 лет. Точка I – единственное место на Байкале, где научные изыскания столь долговременны, систематичны и обширны. В результате

круглогодичных замеров получены среднемесячные значения численности бактериопланктона планктона (тыс. кл./мл) в слоях: 0-10 м, 10-50 м, 50-700 м, а также среднемесячные данные многолетних режимных наблюдений Росгидромета за температурой воды (поверхностный слой) в прибрежной зоне озера за исследуемый период, а также за колебанием уровня воды озера [1].

В статье предлагается подход к анализу структуры одномерных временных рядов, содержащих сезонную компоненту, основанный на расчете ее значений методом скользящей средней и построении аддитивной или мультипликативной модели временных рядов [5, 6]. Эти модели использовались для получения оценок сезонных колебаний количества бактериопланктона по вертикали водной толщи в годовых циклах озера Байкал, значения совокупности которых получены в результате круглогодичных замеров среднемесячных значений численности планктона в соответствующих слоях.

В процессе построения моделей оказалось, что для слоя 0-10 м лучшей является аддитивная, так как коэффициент детерминации (доля изменчивости количества планктона объясняется построенной моделью) равен 90 %. Аналогично, для слоя 10-50 м – мультипликативная с коэффициентом детерминации 89 % и для слоя 50-700 м также мультипликативная с коэффициентом детерминации 84 % (Таблица 1).

Таблица 1 – Значение коэффициентов детерминации в аддитивной и мультипликативной моделях временных рядов

Tabel 1 – Value of determination coefficients in additive and multiplicative time series models

Слой (м)	Коэффициент детерминации (%)	
	Аддитивная модель	Мультипликативная модель
0-10	90	57
10-50	54	89
50-700	34	84

Численность бактериопланктона на той или иной глубине определяется комплексом условий, одним из которых является температура воды [7, 8, 9].

Для построения регрессионной модели, описывающей зависимость численности бактериопланктона от экзогенной (абиотической) переменной – температура воды, авторами был рассчитан коэффициент корреляции, характеризующий тесноту линейной связи между этими показателями. Его значение, равное 0,64, показывает прямую, заметную по шкале Чеддока связь. Проверка гипотезы о статистической значимости коэффициента корреляции с использованием t-статистики подтверждает его значимость и правомерность включения в модель этой переменной.

Предположение о влиянии экзогенной переменной – средний уровень воды озера Байкал не подтвердилось. Авторами был рассчитан коэффициент корреляции, равный 0,14, что свидетельствует об отсутствии связи между рассматриваемыми факторами, следовательно, включение в модель этой переменной нецелесообразно.

В статье используется еще один подход к моделированию численности бактериопланктона с включением фактора температуры воды и бинарных переменных, описывающих влияние качественных признаков, не имеющих количественного выражения. Они отражают сезонную компоненту в модели регрессии для каждого месяца. Бинарная (фиктивная) переменная принимает значение, равное единице для конкретного месяца и нулю для остальных [10, 11].

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении микробиологических исследований на Байкале ученые используют методы биологических исследований, такие как мониторинг, метод наблюдения, экспериментальный метод, вариационная статистика и другие. Авторы в данной статье предлагают при изучении бактериопланктона использовать модели временных рядов [8, 10], характеризующих количество планктона в толще вертикальных слоев. Преимущество таких моделей заключается в том, что влияние различных внешних факторов на эндогенную переменную сказывается во внутренних закономерностях развития временного ряда. Предлагаемые модели позволяют получить прогнозные значения исследуемого показателя на будущие периоды.

Аддитивная модель для слоя 0-10 м имеет вид:

$$y_t = 400,87 + 0,86t + S_i, i = 1, 2, \dots, t = 1, 2, \dots, 192,$$

где y_t – расчетное значение объясняемой переменной (количество планктона), t – номер наблюдения, S_i – оценка сезонной компоненты.

Оценки значений сезонной компоненты для каждого периода колебания представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Оценки значений сезонной компоненты в аддитивной модели для слоя 0-10 м
Tabel 2 – Estimates of seasonal component values in the additive model for the 0-10 m layer

Месяц	Оценка	Месяц	Оценка
Январь	-309,1465278	Июль	32,22847222
Февраль	-102,5354167	Август	531,2395833
Март	-74,84097222	Сентябрь	349,7868056
Апрель	16,40069444	Октябрь	244,6729167
Май	-33,91875	Ноябрь	-196,99375
Июнь	-156,0576389	Декабрь	-300,8354167

Оценка сезонной компоненты каждого периода (месяц) характеризует изменение (уменьшение или увеличение в зависимости от знака) количества планктона относительно сглаженного методом скользящего его среднего уровня.

Анализируя оценки значений сезонной компоненты в аддитивной модели для слоя 0-10 м можно сделать вывод о том, что прослеживаются два максимума в развитии бактериопланктона: весенний подо льдом (апрель, увеличение в среднем на 16 тыс. кл. /мл) и летне-осенний (август-сентябрь, увеличение в среднем на 440 тыс. кл. /мл). В поздневесенний период (июнь) его численность падает в среднем на 156 тыс. кл. /мл. В январе, после установления ледяного покрова, можно отметить дальнейшее убывание численности.

Построенные мультипликативные модели временных рядов для слоев 10-50 м и 50-700 м, соответственно имеют вид:

$$y_t = (395,58 + 0,92t)S_i, i = 1, 2, \dots, t = 1, 2, \dots, 192,$$

$$y_t = (229,27 + 0,65t)S_i, i = 1, 2, \dots, t = 1, 2, \dots, 192,$$

где y_t – расчетное значение объясняемой переменной (количество планктона), t – номер наблюдения, S_i – оценка сезонной компоненты.

Оценки значений сезонной компоненты для каждого периода колебания представлены в Таблице 3 и Таблице 4.

Таблица 3 – Оценки значений сезонной компоненты в мультипликативной модели для слоя 10-50 м

Tabel 3 – Estimates of seasonal component values in the multiplicative model for the 10-50 m layer

Месяц	Оценка	Месяц	Оценка
Январь	0,502932541	Июль	1,069423088
Февраль	0,610824784	Август	1,582294496
Март	0,783455385	Сентябрь	1,690108161
Апрель	1,051668921	Октябрь	1,490672011
Май	1,134595545	Ноябрь	0,779218594
Июнь	0,810756556	Декабрь	0,494049919

Таблица 4 – Оценки значений сезонной компоненты в мультипликативной модели для слоя 50-700 м

Tabel 4 – Estimates of seasonal component values in the multiplicative model for the 50-700 m layer

Месяц	Оценка	Месяц	Оценка
Январь	0,532679432	Июль	1,171112944
Февраль	0,731758359	Август	1,245961888
Март	0,661070436	Сентябрь	1,520913657
Апрель	0,894459013	Октябрь	1,411130103
Май	1,221157035	Ноябрь	0,846401954
Июнь	1,026387143	Декабрь	0,72622936

В отличие от слоя 0-10 м, в слоях 10-50 м и 50-700 м апрельский максимум достигается в мае, а второй пик увеличения численности – в сентябре-октябре.

Отчетливая сезонная ритмичность численности бактериопланктона является результатом тесно взаимосвязанных и взаимозависимых процессов биотического и абиотического характеров.

Моделирование численности бактериопланктона с включением фактора температуры воды озера и бинарных переменных с применением корреляционно-регрессионного анализа позволило построить математическую модель множественной регрессии вида:

$$y_t = 200,04 + 34,09x_{t1} + 70,62x_{t2} + 397,54x_{t3} + 280,03x_{t4} + 102,90x_{t5} + 216,79x_{t6} + 577,877x_{t7} + 416,08x_{t8} + 399,96x_{t9} + 44,92x_{t10}, t = 1, 2, \dots, 150,$$

где y_t – расчетное значение объясняемой переменной (количество планктона), t – номер наблюдения, x_{t1} – температура воды озера, $x_{t2}, x_{t3}, x_{t4}, x_{t5}, x_{t6}, x_{t7}, x_{t8}, x_{t9}, x_{t10}$ – фиктивные переменные, описывающие сезонные компоненты, соответствующие месяцам: январь, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь.

Следует отметить, что не включение в модель фиктивных переменных, отвечающих месяцам февраль, март вызвано отсутствием данных по температуре воды озера (становление ледового покрова).

В основе классической линейной модели множественной регрессии лежит предпосылка о линейной независимости, входящих в нее независимых переменных, поэтому в случае, когда модель включает несколько бинарных переменных, описывающих состояние качественного признака, в модель включают на одну переменную меньше (декабрь) [8-11].

Статистическая гипотеза о значимости влияния температуры воды озера на численность бактериопланктона подтверждается с помощью статистики на уровне значимости 0,95 (10,06).

Проверка статистических гипотез с помощью t -статистики о значимости изменений количества бактериопланктона в месяцах: январь, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь по сравнению с декабрем позволяет сделать вывод о том, что значимы изменения в апреле, затем в августе-октябре ($t_{кр} = 1,99$) (Таблица 5).

Таблица 5 – Значения t -статистики оценок параметров модели множественной регрессии
Tabel 5 – Values of t -statistics of parameter estimates of the multiple regression model

Месяц	t -статистика	Месяц	t -статистика
Январь	0,715406	Август	3,213725
Апрель	4,118532	Сентябрь	2,450921
Май	3,24028	Октябрь	3,201896
Июнь	1,16368	Ноябрь	0,482381
Июль	1,945522	Декабрь	2,362211

Полученные результаты следует интерпретировать так: повышение на один градус температуры воды от берега озера приведет к увеличению количества бактериопланктона в среднем на 34,09 тыс. кл./мл, в декабре его количество составляет в среднем 200,04 тыс. кл./мл, в январе – в среднем приращение равно 70,62 тыс. кл./мл по сравнению с декабрем, в апреле – 397,54 тыс. кл./мл, в мае – 280,03 тыс. кл./мл, в июне – 102,90 тыс. кл./мл, в июле – 216,79 тыс. кл./мл, в августе – 577,87 тыс. кл./мл, в сентябре – 416,08 тыс. кл./мл, в октябре – 399,96 тыс. кл./мл, в ноябре – 44,92 тыс. кл./мл.

Верификация модели проводилась расчетом коэффициента детерминации $R^2=0,6$ (60 % изменчивости количества планктона объясняется построенной моделью), F -статистики, равной 19,72, что больше критического значения $F_{кр}=1,89$, построенная регрессионная модель статистически значима.

Заключение

Впервые на основе данных – среднемесячных значений численности бактериопланктона (тыс. кл./мл) в слоях: 0-10 м, 10-50 м, 50-700 м, собранных группой ученых на Байкальской биологической станции (стационарная точка I) Иркутского государственного университета за 16 лет, построены шесть моделей временных рядов (по две для каждого слоя). На основании рассчитанных коэффициентов детерминации выбраны три наилучшие.

В статье также представлены результаты моделирования численности бактериопланктона с включением фактора температуры воды от берега озера и бинарных переменных с применением корреляционно-регрессионного анализа.

Полученные результаты исследования сезонной динамики численности бактериопланктона озера Байкал:

- полностью согласуются с выводами ученых биологов, специалистов различных профилей, связанных с решением актуальных задач природопользования в бассейне водоема [1];

- могут быть востребованы при изучении функциональных характеристик озера;

- для разработки экологической экспертизы хозяйственной и иных видов деятельности с целью управления качеством воды водоема.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максимова Э.А., Максимов В.Н. *Микробиология вод Байкала*. Иркутск: ИГУ. 1989; 167 с.
2. Копылов А.И., Косолапов Д.Б. *Бактериопланктон водохранилищ Верхней и Средней Волги*. М.: Изд-во СГУ. 2008; 377 с.
3. Олейник Г.Н., Юришинец В.И., Старосила Е.В. Бактериопланктон и бактериобентос как биологические индикаторы состояния водных экосистем. *Гидробиол. Журн.* 2010;46(6):38–51.
4. Айвазян С.А. *Прикладная статистика. Основы эконометрики*: Учеб. В 2 т. 2-е изд., испр. Т. 2. М.: ЮНИТИ-ДАНА; 2001. 432 с.
5. Стрижов В.В., Крымова Е.А. *Методы выбора регрессионных моделей*. М.: ВЦ РАН; 2010. 60 с.
6. Сорокин Ю.И. *Роль бактерий в жизни водоемов*. М.: Знание; 1974; 64 с.
7. Потемкина Т.Г., Потемкин В.Л., Федотов А.П. Климатические факторы как риски современных экологических изменений в береговой зоне озера Байкал. *Геология и геофизика*. 2018;5(59):690–702.
8. Ивачева М.А., Тихонова И.В., Кузьмин А.В., Сороковикова Е.Г., Потапов С.А., Краснопеев А.Ю., Чойдаш Б., Белых О.И. Цианобактерии озера Байкал – продуценты эругинозинов. *Вопросы современной альгологии*. 2018;16(1):1.
9. Лихошвай Ю.В., Кузьмина А.Е., Потемкина Т.Г., Потемкин В.Л., Шимараев М.Н. Распределение диатомовых водорослей вблизи термобара в озере Байкал. *Журнал исследований Великих озер*. 1996;22(1):5–14.
10. Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ*. М.: Диалектика; 2017. 912 с.
11. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. *Эконометрика. Начальный курс*. М.: Дело. 2004; 576 с.

REFERENCES

1. Maksimova E.A., Maksimov V.N. *Microbiology of Baikal waters*. Irkutsk, IGU. 1989; 167 p. (In Russ.).
2. Kopylov, A.I.; Kosolapov, D.B. *Bacterioplankton of the Upper and Middle Volga Reservoirs*. Moscow, SGU. 2008; 377 p. (In Russ.).
3. Oleinik, G.N.; Yurishinets, V.I.; Starosila, E.V. Bacterioplankton and bacteriobenthos as biological indicators of the state of aquatic ecosystems. *Gidrobiol. Zhurn.* 2010;46(6):38–51. (In Russ.).
4. Aivazyan S.A. *Applied statistics. Fundamentals of econometrics*: Proc. In 2 vols. 2nd ed., corr. V. 2. Moscow, UNITI-DANA; 2001. 432 p. (In Russ.).
5. Strizhov V.V., Krymova E.A. *Methods for choosing regression models*. Moscow, VTS RAN; 2010. 60 p. (In Russ.).
6. Sorokin Y.I. Role of bacteria in the life of water bodies. Moscow, Znanie; 1974; 64 p. (In Russ.).
7. Potemkina T.G., Potemkin V.L., Fedotov A.P. Climatic factors as risks of modern ecological changes in the shore zone of Lake Baikal. *Geology and Geophysics*. 2018;59(5):690–702. (In Russ.).
8. Ivacheva M.A., Tikhonova I.V., Kuzmin A.V., Sorokovikova E.G., Potapov S.A., Krasnopeev A.Y., Choidash B., Belykh O.I. Cyanobacteria of Lake Baikal – eruginosin producers. *Voprosy sovremennoi algologii*. 2018;16(1):1. (In Russ.).
9. Likhoshway Y.V., Kuzmina A.Ye., Potyemkina T.G., Potyemkin V.L., Shimaraev M.N. The distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research*. 1996;22(1):5–14.

10. Draper N., Smith G. *Applied regression analysis*. Moscow, Dialectics; 2017; 912 p. (In Russ.).
11. Magnus J.R., Katyshev P.K., Peresetsky A.A. *Econometrics. Elementary course*. Moscow, Delo. 2004; 576 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бурдуковская Анна Валерьевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент Педагогического института Иркутского государственного университета, Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: buran_baikal@mail.ru

Anna V. Burdukovskaya, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at Pedagogical Institute of Irkutsk State University, Irkutsk, the Russian Federation.

Белых Татьяна Ивановна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент Байкальского государственного университета, Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: bti_baikal@mail.ru

Tatyana I. Belykh, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation.

Родионов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент Байкальского государственного университета, Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: avr-v@yandex.ru
ORCID: [0000-0003-0451-2655](https://orcid.org/0000-0003-0451-2655)

Aleksei V. Rodionov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 19.01.2024; одобрена после рецензирования 12.02.2024; принята к публикации 21.02.2024.

The article was submitted 19.01.2024; approved after reviewing 12.02.2024; accepted for publication 21.02.2024.