

СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА *a* И ЕГО СВЯЗЬ С БИОГЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В ПЕЛАГИАЛИ ОЗЕРА БАЙКАЛМ. В. Сакирко* , В. В. Блинов , М. М. Макаров , С. С. Воробьева ,
А. П. Федотов  и В. М. Домышева 

Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

* **Контакт:** Мария Владимировна Сакирко, sakira@lin.irk.ru

По результатам многолетних натурных измерений (2018–2023 гг.) рассмотрена изменчивость концентраций хлорофилла *a* и биогенных элементов в пелагиали озера Байкал. За период исследований средняя концентрация хлорофилла *a* в верхнем 100-метровом слое воды озера составляет 1,32 мкг/л. В зависимости от вида температурной стратификации и глубины залегания термоклина выделяется два типа вертикального распределения хлорофилла *a*. Оценены межгодовые и внутригодовые изменения концентрации хлорофилла *a* в верхнем слое воды и их связь с динамикой биогенных элементов. Рассчитан трофический индекс Карлсона (TSI), полученные величины указывают на принадлежность пелагиали озера Байкал к олиготрофному типу водоёмов.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, озеро Байкал, биогенные элементы, пелагиаль, вертикальная динамика

Цитирование: Сакирко М. В., Блинов В. В., Макаров М. М., Воробьева С. С., Федотов А. П., и Домышева В. М. Содержание хлорофилла *a* и его связь с биогенными элементами в пелагиали озера Байкал // Russian Journal of Earth Sciences. — 2026. — Т. 26. — ES1005. — DOI: 10.2205/2026es001038 — EDN: TVVGEK

Введение

При оценке экологического состояния водных объектов особое внимание уделяется фитопланктону – главному продуценту первичного органического вещества. Основной фотосинтетический пигмент хлорофилл *a* (Хл) является показателем развития фитопланктона, его временной и пространственной динамики [Винберг, 1960]. Данные о концентрации Хл дают возможность оценить общее состояние экосистемы водоёмов, их продуктивность и трофический статус, выявить долгосрочные тренды в изменении биомассы фитопланктона, а также оценить отклик на климатические изменения.

Озеро Байкал, расположенное на юге Восточной Сибири, самое глубокое (максимальная глубина 1642 м) и крупнейшее в мире по объёму чистой пресной воды, обладает уникальной флорой и фауной, 60% которой является эндемичной [Тимошкин и др., 2001].

Одна из особенностей озера связана с большой широтной протяжённостью (почти на 4 градуса) и проявляется в понижении температуры воздуха над озером с юга на север. Гидротермический режим Байкала определяют два периода перемешивания вод: весенне-летний (май–июнь) и осенне-зимний (октябрь–декабрь) [Шимараев и Гранин, 1991]. Глобальное потепление климата – главная экологическая проблема в последние десятилетия [Climate. . ., 2023; Humlum, 2022; Sallée, 2018]. Климатические изменения, проявляющиеся в уменьшении периода ледостава, повышении температуры поверхностного слоя и усилении летней термической стратификации, несомненно, связаны с внутриводоёмными, в том числе биологическими, процессами. Как следствие общепланетарного повышения концентраций парниковых газов отмечено повышение содержания углекислого газа в приводной атмосфере со скоростью около 2,46 млн⁻¹/год, [Panchenko et al., 2020]. К настоящему моменту накоплен огромный объём информации о фитопланктоне озера Байкал, его сезонной и пространственной изменчивости

<https://elibrary.ru/TVVGEK>

Получено: 10 февраля 2025 г.

Принято: 18 июня 2025 г.

Опубликовано: 4 марта 2026 г.



© 2025. Коллектив авторов.

[Бондаренко и др., 2022, 2023; Поповская, 1991; Поповская и др., 2015; Bondarenko and Logacheva, 2017; Bondarenko et al., 2020; Fedotov et al., 2025; Hampton et al., 2018; Potazkina et al., 2010; Usoltseva et al., 2023]. Исследования последних лет [Bondarenko et al., 2019; Izmet'seva et al., 2016] отмечают появление и массовое развитие в литоральной зоне озера видов рода *Spirogyra*, нетипичного для Байкала, что может привести к серьезным последствиям для экосистемы озера [Kravtsova et al., 2014; Timoshkin et al., 2016]. Современные климатические изменения привели к структурным перестройкам прибрежного фитопланктона озера [Bondarenko and Logacheva, 2017].

Исследования середины прошлого столетия [Вотинцев, 1961; Вотинцев и др., 1975], позволили охарактеризовать гидрохимический режим глубоководной части озера, изучить вертикальное распределение, сезонные изменения отдельных химических компонентов. Установлено, что содержание биогенных элементов увеличивается с глубиной, а концентрация кислорода снижается к придонным слоям, но не опускается ниже 70% насыщения. Сезонные изменения содержания биогенных элементов и кислорода отмечаются не только в верхних, но и в придонных слоях воды, что связано с активным перемешиванием вод в весенний и осенний периоды [Домышева, 2001; Шимараев и Гранин, 1991]. Концентрации главных ионов в пелагиали разных котловин озера на разных глубинах стабильны в течение года [Грачев и др., 2004; Домышева и др., 2014; Falkner et al., 1991].

Исследования хлорофилла *a* на Байкале проводились с 1979 по 2002 гг. в южной части озера [Измest'eva и др., 2006; Izmet'seva et al., 2016], а также на отдельных станциях в 1983–1989 гг. [Тарасова и Мещерякова, 1992]. Современные наблюдения за содержанием Хл в воде озера представлены в основном сведениями о его концентрации в литоральной зоне [Зайцева и Дагурова, 2013; Малащенко и др., 2022; Domysheva et al., 2023] и на отдельных станциях пелагиали [Bondarenko et al., 2019].

Цель нашего исследования – оценить сезонную и межгодовую динамику хлорофилла *a* в верхнем 100-метровом слое воды, и на основе этих данных в совокупности с величиной прозрачности и содержанием общего фосфора охарактеризовать современный трофический статус пелагиали Байкала.

Материалы и методы исследования

Исследования выполнены на станциях продольного разреза в пелагиали озера Байкал в июне, июле, сентябре 2018–2023 гг. и в марте 2022 г., а также в южном Байкале в марте 2020 г. Пробы воды отбирали с борта научно-исследовательского судна «Г. Ю. Верещагин» (ЦКП «Центр комплексных судовых исследований Байкала») на 13 станциях продольного разреза озера из верхнего 100-метрового слоя воды с глубины 0, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 метров (рис. 1) при помощи системы батометров SBE-32 Carousel Water Sampler (Sea-Bird Electronics, USA). На станции, расположенной в 7 км от пос. Листвянка (станция 14, рис. 1), отбор проб проводили ежедекадно с июня до середины октября 2020 г. только в слое 0–25 м.

Температуру воды измеряли при помощи зонда CTD-profiler SBE-25 (Sea-Bird Electronics, USA) с точностью 0,002°C, прозрачность воды – диском Секки. В марте 2022 г. содержание хлорофилла *a* и температура воды получены с помощью датчика CTD probe RinkoAQQ-177 (JFE, Tokyo, Japan).

Содержание растворённого кислорода определяли титриметрически по методу Винклера. Для определения биогенных элементов пробы фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм. Концентрации биогенных элементов измеряли на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ (Экохим, Россия). Кремний определяли в виде жёлтой формы молибдокремниевой кислоты, нитрит-ионы с реактивом Грисса, ионы аммония индофенольным методом, нитрат-ионы с использованием салициловокислого натрия, фосфат-ионы с образованием фосфорно-молибденового комплекса окрашенного в синий цвет. Измерение содержания общего фосфора (TP) и общего азота (TN) выполнено в нефилтрованной воде после окисления персульфатом калия, соответственно, в кислой и щелочной среде.

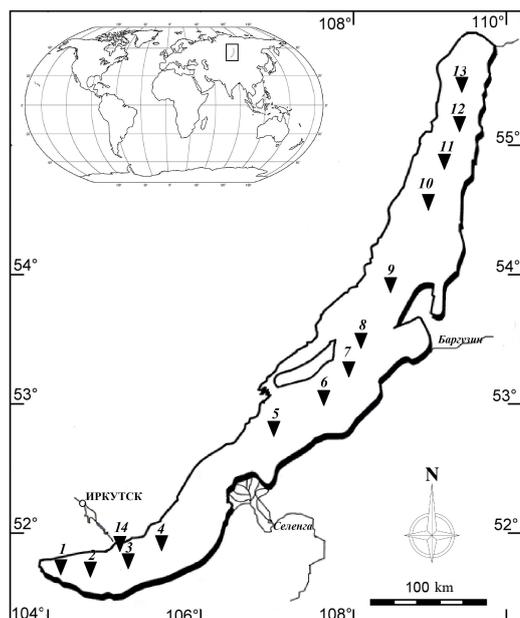


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб.

Для определения численности и биомассы фитопланктона пробы отбирали ежедневно в летний период 2020 г. на станции 14 с глубин 0, 5, 10, 15, 20 и 25 м, объединяли их в одну интегральную пробу объёмом 1 л, фиксировали раствором Люголя и затем концентрировали путем осаждения. На предметное стекло помещали каплю пробы объёмом $0,1 \text{ см}^3$, покрывали её покровным стеклом с ножками из воска. Предметное стекло переносили на столик микроскопа [Кожова и Мельник, 1978; Поповская, 1991]. Подсчёт водорослей выполняли дважды под световым микроскопом Amplival (Carl Zeiss, Germany) с увеличением $\times 800$ и $\times 2000$. Биомассу определяли с учётом объёма отдельных клеток [Белых и др., 2011; Кожова и Мельник, 1978].

Для определения содержания Хл пробы воды объёмом 1–2 л фильтровали через мембранные ацетат-целлюлозные фильтры с размерами пор 0,45 мкм. Пигменты на фильтре экстрагировали 90% раствором ацетона под воздействием ультразвука с последующим центрифугированием при скорости 4000 об/мин в течение 15 минут [SCOR-UNESCO Working group 17, 1966]. Оптическую плотность ацетоновых экстрактов до и после подкисления соляной кислотой определяли на двухлучевом спектрофотометре Cintra 2020 (Австралия) до 2022 г. и на спектрофотометре Sintecon CDA-4 (Китай) в 2023 г. Концентрации хлорофилла *a* рассчитывали по уравнениям Джеффри и Хамфри [Jeffrey and Humphrey, 1975] с поправкой на присутствие феофитина [Lorenzen, 1967].

Для оценки трофического статуса озера использовали шкалу из работы [Кумаев, 2007], а также индекс трофического состояния Карлсона (TSI) [Carlson, 1977]. Индекс Карлсона учитывает содержание хлорофилла *a* – TSI(Хл), общего фосфора – TSI(ТР) на поверхности и прозрачность воды по диску Секки – TSI(SD). Величины TSI < 40 соответствуют олиготрофному состоянию, TSI = 40–60 – мезотрофному, 60–80 – эвтрофному, > 80 – гипертрофному.

Для оценки связи между температурой, биологическими и гидрохимическими параметрами рассчитывали коэффициенты корреляции Пирсона.

Результаты и их обсуждение

Хлорофилл играет ключевую роль в изучении внутренних вод и Мирового океана. Пределы содержания хлорофилла *a* в разнотипных водоёмах весьма разнообразны. Концентрация Хл в озёрах Карелии находится в диапазоне от 0,7 до 7 мкг/л [Калинкина и Теканова, 2022]. В озере Мичиган весной и летом содержание Хл в центральной

части составляет 3 мкг/л, в прибрежных районах – 5–7 мкг/л, в заливе, подверженном значительному антропогенному воздействию – 49,7 мкг/л [Hobbs et al., 2016]. В самом большом по площади озере Венерн в Швеции концентрация хлорофилла изменяется в пределах 0,9–3,0 мкг/л [Weyhenmeyer, 2008], в озере Сайма, расположенном в юго-восточной Финляндии, не превышает 6 мкг/л [Karjalainen et al., 1996].

Имеющиеся в литературе сведения о содержании Хл в пелагической части озера Байкал показывают, что его концентрация изменялась в диапазоне 1,58–2,79 мкг/л в подлёдный период, 0,64–4,97 мкг/л в мае-июне [Bondarenko et al., 2019], 0,58–5,3 мкг/л в июле [Churilova et al., 2018], в прибрежной области 0,004–1,166 мкг/л [Зайцева и Дагурова, 2013], 0,56–6,94 мкг/л [Малашенков и др., 2022] и 0,9–1,8 мкг/л [Domysheva et al., 2023]. В Южном Байкале среднее содержание Хл с 1979 по 2005 гг. составило $1,02 \pm 0,09$ мкг/л [Измestъева и др., 2006], в 1983–1989 гг. – 0,80 мкг/л [Тарасова и Меццеракова, 1992], в 2009–2011 гг. – 1,03 мкг/л [Шимараева и др., 2017].

В наших исследованиях концентрация хлорофилла *a* в верхнем 100-метровом слое пелагиали оз. Байкал изменялась в широком диапазоне – от 0 до 6,56 мкг/л, средняя величина за период 2018–2023 гг. составляла 1,32 мкг/л (рис. 2). Максимальное содержание Хл (6,56 мкг/л) в верхнем 100-метровом столбе воды зарегистрировано в июне 2021 г. Такие высокие значения отмечались только на станциях южного Байкала (станция 3 и 4 от 3,86 до 6,56 мкг/л), в то время как на станциях в средней и северной части озера количество Хл не превышало 3 мкг/л (рис. 2). Различия в концентрации Хл можно объяснить тем, что исследования 1979–2005 гг. выполнялись с большим временным разрешением (ежедекадно) и охватывали как периоды пика, так и время депрессии в развитии водорослей. Данные в настоящей работы, приурочены к началу июня – периоду весенней гомотермии и завершения массового развития диатомовых [Мокрый, 2019; Popovskaya, 2000; Usoltseva et al., 2023] и концу июля и сентябрю – периоду прямой температурной стратификации водных масс и летнего пика фитопланктона.

Биогенные элементы в пелагиали озера содержатся в небольшом количестве (табл. 1). Аммонийный и нитритный азот в верхнем слое воды пелагиали появляется в незначительных концентрациях в конце массового развития водорослей. Особенности распределения кислорода и биогенных элементов в Байкале для верхнего трофогенного слоя связаны с механизмами вертикального перемешивания (термическая и плотностная конвекция), упорядоченными перемещениями вод в поле преобладающих горизонтальных циклонических циркуляций [Шимараев и Гранин, 1991; Verbolov, 1996] и продукционно-деструкционными процессами [Поповская и др., 2015; Potazkina et al., 2010].

Таблица 1. Максимальное и минимальное содержание хлорофилла *a* и биогенных элементов в верхнем 100-метровом слое воды пелагиали озера Байкал, 2018–2023 гг.

Показатель	март		июнь		июль		сентябрь	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
Хл, мкг/л	0,18	3,59	< 0,02	6,56	< 0,02	5,25	< 0,02	5,29
T, °C	0,05	2,22	1,60	3,78	3,77	18,60	3,68	14,74
O ₂ , мг/л	11,69	14,50	11,17	13,91	9,64	14,60	9,71	13,34
Si, мг/л	0,47	0,60	0,09	0,86	0,02	0,84	0,06	0,81
PO ₄ ³⁻ , мг/л	0,017	0,030	0,002	0,038	0,003	0,040	0,003	0,039
NO ₃ ⁻ , мг/л	0,36	0,50	0,27	0,58	0,02	0,53	0,03	0,57
NH ₄ ⁺ , мг/л	< 0,006	0,010	< 0,006	0,022	< 0,006	0,033	< 0,006	0,056
NO ₂ ⁻ , мг/л	< 0,003	0,003	< 0,003	0,007	< 0,003	0,007	< 0,003	0,064
TN, мг/л	0,15	0,35	0,08	0,23	0,08	0,27	0,07	0,19
TP, мг/л	0,008	0,013	0,008	0,017	0,005	0,014	0,006	0,014

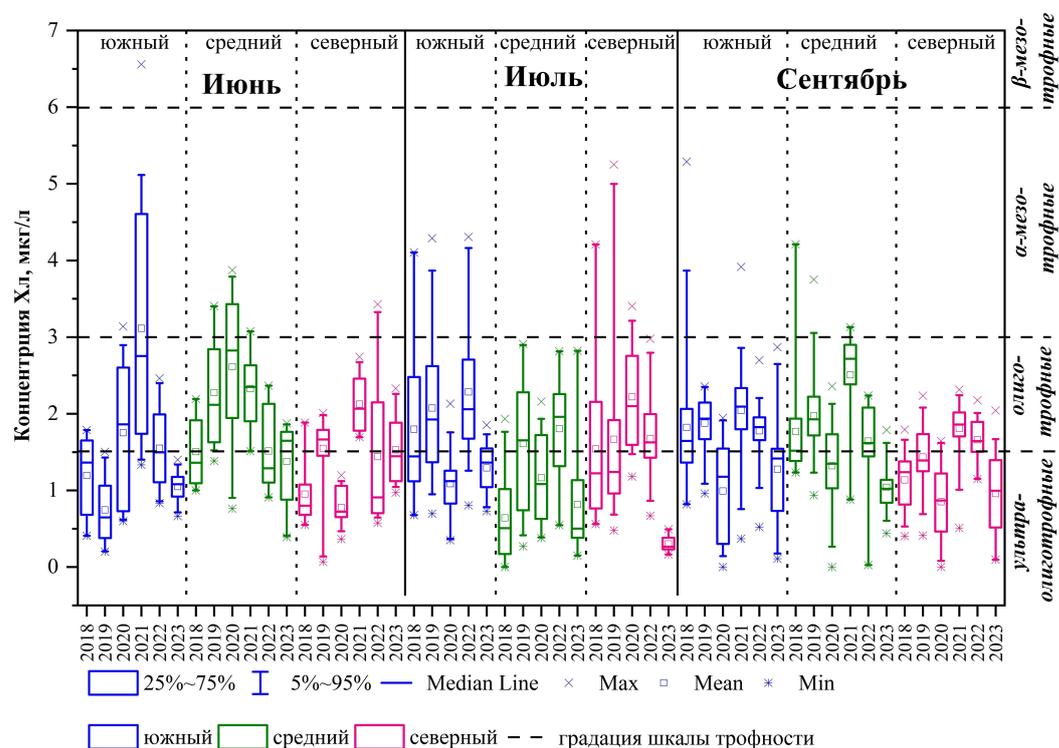


Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* в слое 0–100 м в разные месяцы по котловинам озера Байкал в 2018–2023 гг. и градации шкалы трофности [Китаев, 2007].

Вертикальное распределение

Характер распределения хлорофилла *a* по глубине неодинаков в разные периоды года. Выделено два основных типа вертикального распределения Хл (рис. 3). Первый тип характеризуется плавным снижением концентраций хлорофилла *a* с глубиной и отсутствием промежуточных максимумов, а нулевые значения регистрируются только глубже 150–200 м. Такое распределение характерно для периода гомотермии и интенсивного вертикального перемешивания. В июне 2021 г. концентрация Хл и биогенных элементов в верхнем 50-метровом слое практически однородна, изменения по вертикали не превышают величину погрешности методов определения (рис. 3а). На глубине 100 м в южной и средней котловине, т. е. в слое термоклина (верхняя граница термоклина около 90 м) содержание биогенных элементов по сравнению с верхними слоями воды возрастает в 1,5–3 раза, а хлорофилла *a* снижается почти в 2 раза. В северной котловине термоклин располагался в слое 70–90 м, и на глубине 100 м (ниже слоя термоклина) Хл отсутствует, а концентрация биогенных элементов здесь в 2 раза больше, чем в вышележащем слое. Результаты, полученные в разные годы, имеют свои особенности из-за различных погодных условий, температурного и гидродинамического режима. Так, в июне 2022 г. термоклин залегал глубже 100 м и распределение хлорофилла и биогенных элементов в 100-метровом слое всех котловин озера было практически однородным.

Для второго типа характерно наличие максимума хлорофилла *a* в верхней границе температурного скачка – глубинный максимум Хл (рис. 3б). Встречается такой максимум довольно часто в олиготрофных водоёмах [Anderson, 1969; Cullen, 2015; Estrada et al., 1993]. Глубина его нахождения определяется прозрачностью, расположением термоклина и образуется в нижней части фотической зоны [Anderson, 1969; Leach et al., 2017]. В открытой части Великих Американских озер содержание Хл на поверхности

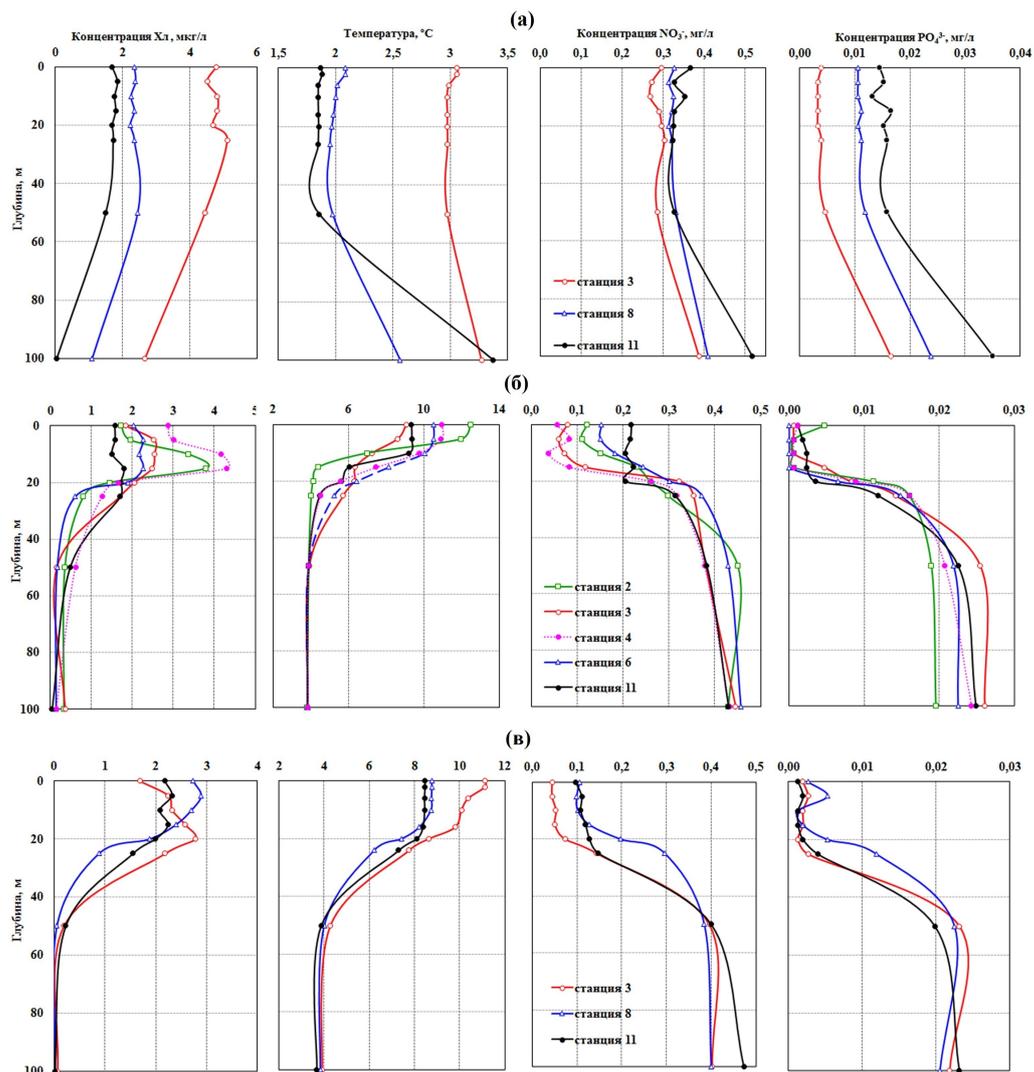


Рис. 3. Вертикальные профили распределения хлорофилла *a* и биогенных элементов в июне 2021 (а), июле 2022 (б), сентябре (в) 2021 гг.

составляло $0,1\text{--}1,0\text{ мг/м}^3$, тогда как на глубине $20\text{--}40\text{ м}$ — до $6\text{--}7\text{ мг/м}^3$. [Barbiero and Tuchman, 2004; Fahnenstiel and Glime, 1983]. В озере Тахо глубинный максимум хлорофилла в летний период из-за изменения температурной стратификации и наличия питательных веществ располагался на глубине $90\text{--}110\text{ метров}$ [Coon et al., 1987; Leach et al., 2017].

В наших исследованиях такое распределение в пелагиали Байкала наиболее ярко прослеживалось в июле 2022 г. В южной котловине верхний горизонт термоклина располагался на глубине 5 м , толщина его на разных станциях изменялась от $10\text{ до }20\text{ м}$. Концентрация Хл возрастала от поверхности до максимальных значений в термоклин, затем резко снижалась к 25 м и в слое $50\text{--}100\text{ м}$ хлорофилл *a* присутствовал в незначительных количествах. Содержание биогенных элементов в это время было минимально в верхнем слое, заметно (в $3\text{--}4\text{ раза}$) возрастало в слое термоклина ($15\text{--}25\text{ м}$), глубже градиент роста концентраций небольшой. На ст. 3, по сравнению с другими станциями в южной котловине, была низкая температура поверхностной воды, меньше градиент падения температуры в слое термоклина и, соответственно, характер распределения подобен, но изменения концентрации хлорофилла *a* и биогенных элементов более умеренные. В средней котловине термоклин залегал на глубине $10\text{--}25\text{ м}$, концентрация Хл была максимальна и почти однородна до 15 м , резко (в 3 раза) снижалась на 25 м ,

и оставалась в минимальных количествах до глубины 100 м. Концентрация биогенных элементов в термоклине увеличивалась в 2 раза, глубже градиент роста незначителен. В северном Байкале содержание хлорофилла *a* было самым низким и глубинный максимум был небольшим.

В сентябре 2021 г. в южной и северной котловинах термоклин находился на глубине 20–40 м, в средней – на глубине 10–30 м. Вертикальное распределение хлорофилла *a* и биогенных элементов подобное: максимальный градиент снижения Хл и роста биогенных элементов регистрировался в слое термоклина (рис. 3в).

Сезонная динамика

Декадные наблюдения, выполненные на пелагической станции в 7 км от Листвянки (станция 14) в 2020 г., показывают, что с начала июня до середины июля по мере роста температуры воды концентрация хлорофилла *a* равномерно повышалась (рис. 4). В планктоне в это время по биомассе доминировали диатомовые водоросли (83–90%), в основном, *Fragilaria radians* (Kützing) D. M. Williams & Round sensu Krammer, Lange-Bertalot (рис. 4б и 4в). Концентрация кремния, нитратов и фосфатов в этот период заметно снизилась.

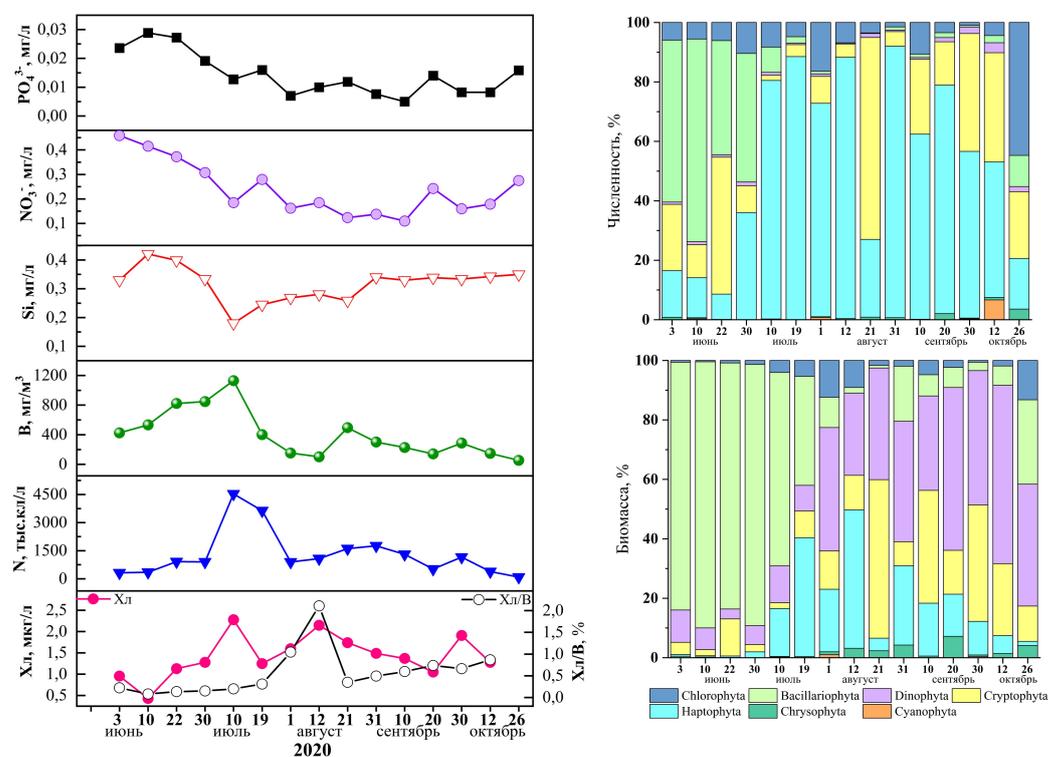


Рис. 4. Временная динамика средневзвешенного содержания биогенных элементов, хлорофилла *a* и его доли в сырой биомассе, общей численности (*N*) и общей биомассы (*B*) фитопланктона в слое 0–25 м (а) и доля основных отделов водорослей по численности (б) и биомассе (в) на станции 14 (7 км от пос. Листвянка), 2020 г.

В июле с изменением условий обитания состав фитопланктона пополнился мелкоклеточными водорослями: *Chrysochromulina parva* Lasky (3221–3643 тыс. кл./л) из гаптофитовых, *Rhodomonas pusilla* (Bachm.) Javorn (76–146 тыс. кл./л) из криптофитовых, *Monoraphidium arcuatum* (Korshikov) Hindák (172–373 тыс. кл./л) из зелёных. К 10 июля содержание Хл достигло значения 2,28 мкг/л (рис. 4а), а концентрация биогенных элементов снизилась до минимума. В это же время регистрировались максимальные показатели численности и биомассы (4,53 млн. кл./л и 1,13 г/м³) с до-

минированием диатомовых (до 65% биомассы), доля гаптофитовых и динофитовых составляла 16% и 12%, соответственно. Далее к началу августа снижается количество диатомовых на порядок и, как следствие, начинается рост концентрации кремния.

В августе и сентябре резких изменений общей численности не происходит, а биомасса, представленная разноразмерными водорослями, заметно колеблется. В сентябре доминирование по биомассе переходит к жгутиковым организмам, которые обладают смешанным типом питания: динофитовые (в основном, *Gyrodinium helveticum* (Penard) Y. Takano & T. Horig) – 32–55%, криптофитовые – 15–39%, гаптофитовые – 11–18%. Концентрации NO_3^- и PO_4^{3-} к 10 сентября достигают минимальных значений, содержание Si остаётся постоянным.

В октябре снижается уровень развития водорослей, в биомассе преобладают динофитовые, в среднем, до 50% в сопровождении криптофитовых (21%) и диатомовых (12%). В конце месяца отмечено увеличение роли *Aulacoseira islandica* (O. M. Muller) Simonsen и *Cyclotella minuta* (Skvortsov Antipova), которые встречаются почти круглый год, а осенью их численность повышается. В целом, динамика хлорофилла *a* в период наших исследований соответствует динамике фитопланктона.

Предыдущие исследования показали, что в течение вегетационного сезона происходят изменения структуры и уровня развития фитопланктона [Бондаренко, 1997; Вотинцев и др., 1975; Поповская, 1991; Bondarenko et al., 2020], а распределение водорослей в водной толще озера зависит от условий обитания (инсоляция, температура, биогены и др.). Для озера характерно развитие специфического байкальского комплекса планктонной флоры в подлёдный и ранневесенний период и широко распространённого разноразмерного сообщества в летне-осенний период [Бондаренко, 1997]. В период наших наблюдений сезонная динамика, структура и уровень развития фитопланктона не претерпели существенных изменений.

Анализ связи концентрации Хл с биомассой разных отделов водорослей и биогенными элементами (рис. 4а) показал наличие статистически значимой положительной корреляции с динофитовыми ($r = 0.56$, $p < 0,05$), что обусловлено более продолжительным периодом их преобладания в составе фитопланктона (с августа по октябрь), а также отрицательной связи с биогенными элементами ($r = -0.74$, $-0,72$ и $-0,71$, $p < 0,05$, соответственно, для нитратов, фосфатов и кремния).

Содержание хлорофилла *a* в сырой биомассе фитопланктона озера (Хл/В) колеблется от 0,1% до 2,11%, среднее значение 0,34% (рис. 4а), что сопоставимо с известными в литературе величинами [Булъон, 1983; Сиделев и Бабаназарова, 2008]. Оценка связи между содержанием хлорофилла в биомассе Хл/В с развитием водорослей разных отделов показала наличие значимой положительной корреляции с долей гаптофитовых ($r = 0.65$, $p < 0,05$) и отрицательной корреляции с долей диатомовых ($r = -0.66$, $p < 0,05$). Достоверная обратная зависимость обнаружена между Хл/В и концентрациями фосфатов и нитратов (соответственно, $r = -0.56$ и $-0,47$, $p < 0,05$).

Содержание биогенных элементов, планктона и растворённых газов определяется спецификой температурного режима в каждой котловине озера, особенностями вертикального водообмена и горизонтальной циркуляции вод, связанной с течениями и ветровым режимом [Домышева и др., 2014; Шимараев и др., 2003]. Эти факторы формируют уникальные условия в каждой котловине, влияя на распределение («пятнистую структуру») и продуктивность планктонных сообществ [Поповская и др., 2008; Bondarenko et al., 2019], и, соответственно, пространственную неоднородность содержания хлорофилла *a*.

Корреляционный анализ (табл. 2) показывает наличие тесной обратной связи между содержанием Хл и биогенных элементов (нитратов и фосфатов) в пелагиали озера в каждый период наблюдений. Данная связь подтверждает то, что снижение содержания фосфатов и нитратов сопряжено с их потреблением фитопланктоном. Обратная зависимость между Хл и кремнием наблюдается только в июне, что, вероятно, обусловлено преобладанием в весенней биомассе диатомовых водорослей [Usoltseva et al., 2023], для развития которых требуется растворённый кремний. Корреляция

между содержанием хлорофилла *a*, нитритами и аммонием в большинстве случаев слабая. Тесная прямая связь Хл с температурой проявляется только в июле и сентябре, когда развиваются теплолюбивые летние формы.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Пирсона между содержанием хлорофилла *a*, температурой воды и содержанием биогенных элементов в верхнем слое пелагиали озера Байкал, 2018–2023 гг.

Месяц	T	Si	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	TP	TN
март	-0,06	0,20	-0,46	-0,54	-0,17	-0,29	-0,40	0,07
июнь	-0,18	-0,52	-0,58	-0,68	0,21	0,25	0,06	-0,07
июль	0,45	0,16	-0,70	-0,61	-0,28	0,07	-0,04	-0,18
сентябрь	0,63	-0,01	-0,81	-0,79	-0,01	-0,11	-0,56	-0,51

Примечание: цветом выделены статистически достоверные коэффициенты корреляции ($r < 0,05$).

Оценка трофического статуса

Концентрация хлорофилла *a* широко применяется для оценки трофического состояния водных экосистем. Существует ряд классификаций трофического уровня водных объектов по величине Хл с разными граничными значениями и интервалами. К настоящему времени разработано более пятидесяти критериев оценки трофического статуса вод [Китаев, 2007; Неверова-Дзюпак и Цветкова, 2020]. Оценка трофического статуса пелагиали озера Байкал на основе данных о содержании хлорофилла *a* по шкале С. П. Китаева [Китаев, 2007] показала, что большая часть акватории озера относится к ультраолиготрофному и олиготрофному типу (рис. 2). На некоторых станциях в разные годы прослеживаются элементы α -мезотрофии. Использование граничных показателей с большой дискретностью градаций для оценки трофического состояния зачастую оказываются весьма противоречивыми и можно оценивать только некоторую вероятность принадлежности водоёма к тому или иному типу трофии. Интегрированную оценку трофического состояния озера позволяет дать индекс Карлсона (TSI) [Carlson, 1977].

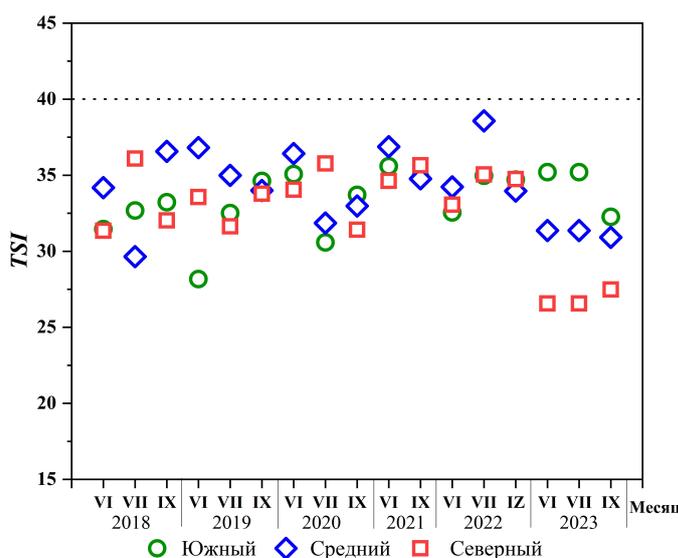


Рис. 5. Значения индекса трофического состояния Карлсона для поверхностного слоя воды пелагиали озера в разные месяцы 2018–2023 гг. (пунктирная линия – условная граница олиготрофной и мезотрофной зон).

Величина TSI, рассчитанная для поверхностных вод пелагиали озера в разные месяцы 2018–2023 гг., изменяется от 27 до 39 единиц (рис. 5) и, следовательно, поверхностный слой глубоководной части озера соответствует олиготрофному типу. Несмотря на межгодовые флуктуации содержания Хл (рис. 2), трофический статус пелагиали озера в период наблюдения сохраняется в пределах одной категории.

Межгодовые изменения

Межгодовые изменения средневзвешенных концентраций хлорофилла *a* показаны на рис. 6. За шесть лет проведённых исследований ярко выраженных тенденций к увеличению или снижению концентраций Хл по акватории озера не выявлено. Ранее [Измestьева и др., 2006], в период прямой температурной стратификации в 1979–2002 гг., была выявлена положительная динамика изменения концентрации Хл, что связывалось с повышением летних температур воды и возможным изменением трофического типа озера. Мы располагаем не столь длинным рядом наблюдений, но, тем не менее, положительного статистически значимого тренда в содержании хлорофилла *a* и, как следствие, изменения трофического статуса озера не выявлено.

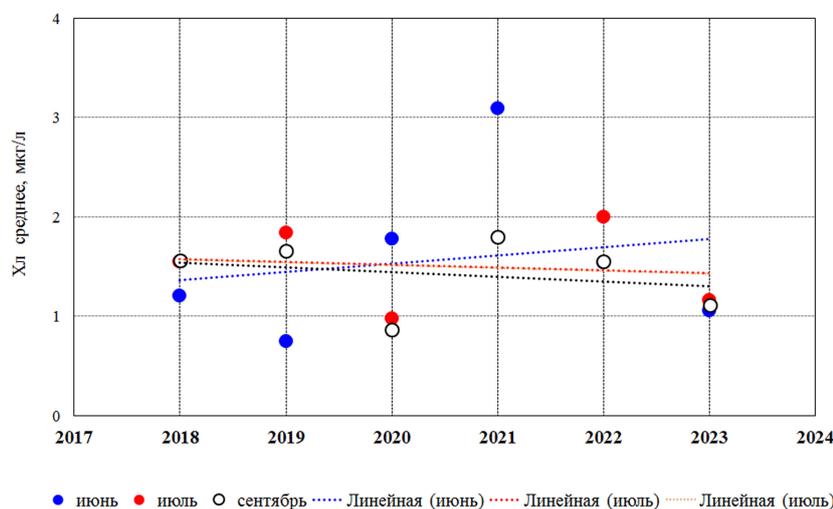


Рис. 6. Многолетняя динамика средневзвешенного содержания хлорофилла *a* в пелагиали озера, 2018–2023 гг.

Заключение

Концентрация хлорофилла *a* в верхнем слое пелагиали оз. Байкал в период 2018–2023 гг. изменяется в широком диапазоне от 0 до 6,56 мкг/л. Показано, что в зависимости от режима стратификации и глубины залегания термоклина выделяется два типа вертикального распределения хлорофилла. Первый тип характеризуется плавным снижением концентрации Хл с глубиной, второй тип – наличием глубинного максимума концентрации на верхней границе термоклина. Пространственное распределение хлорофилла *a* неоднородно, но значительных различий в содержании Хл в разных котловинах озера не выявлено. Корреляционный анализ выявил значимые зависимости между концентрацией хлорофилла *a* и биогенными элементами. При анализе межгодовой динамики (2018–2023 гг.) не обнаружено статистически значимых направленных изменений концентрации Хл. Согласно значениям индексов трофического состояния, пелагиаль озера Байкал в разные месяцы соответствует олиготрофному трофическому статусу.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ЛИН СО РАН FWSR-2026-0015 (1025032400008-1-1.5.12), FWSR-2026-0017 (1025032600025-2-1.5.9) на базе приборного центра коллективного пользования физико-химического ультрамикрoанализа ЛИН СО РАН (ЦКП «Ультрамикрoанализа») и ЦКП «Центр комплексных судовых исследований Байкала».

Список литературы

- Белых О. И., Бессудова А. Ю., Гладких А. С. и др. Руководство по определению биомассы видов планктона пелагиали озера Байкал. Методическое пособие. — Иркутск : ИГУ, 2011. — 51 с.
- Бондаренко Н. А. Структура и продукционные характеристики фитопланктона озера Байкал. Автореф. дис... к.б.н. — Борок : ИБВВ РАН, 1997. — 23 с. — EDN: [ZKEGZT](#).
- Бондаренко Н. А., Русанов И. И., Черницына С. М. и др. Структура и продукционный потенциал летнего фитопланктона озера Байкал в современный период // Водные ресурсы. — 2022. — Т. 49, № 1. — С. 66–76. — <https://doi.org/10.31857/s0321059622010059>.
- Бондаренко Н. А., Томберг И. В., Пенькова О. Г. и др. Структурные перестройки фито- и зоопланктона под воздействием климатических изменений и антропогенной нагрузки (оз. Байкал, Россия) // Биология внутренних вод. — 2023. — № 6. — С. 727–739. — <https://doi.org/10.31857/S0320965223060050>.
- Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. — Л. : Наука, 1983. — 150 с.
- Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. — Минск : Изд-во АН БССР, 1960. — 329 с.
- Вотинцев К. К. Гидрохимия озера Байкал. — М. : Изд-во АН СССР, 1961. — 310 с.
- Вотинцев К. К., Мещерякова А. И. и Поповская Г. И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. — Новосибирск : Наука, 1975. — 189 с.
- Грачев М. А., Домышева В. М., Ходжер Т. В. и др. Глубинная вода озера Байкал - природный стандарт пресной воды // Химия в интересах устойчивого развития. — 2004. — Т. 12, № 4. — С. 417–429. — EDN: [OXOVYN](#).
- Домышева В. М. Закономерности пространственного распределения и динамика кислорода и биогенных элементов в глубоководной области Байкала. Автореф. дис... к.г.н. — Иркутск : Институт географии СО РАН, 2001. — 27 с.
- Домышева В. М., Усольцева М. В., Сакирко М. В. и др. Пространственное распределение потоков углекислого газа, биогенных элементов и биомассы фитопланктона в пелагиали оз. Байкал в весенний период 2010-2012 гг. // Оптика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 27, № 6. — С. 539–545. — EDN: [SMGMLZ](#).
- Зайцева С. В. и Дагурова О. П. Содержание хлорофилла и биогенных элементов в прибрежной воде озера Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. — 2013. — № 3. — С. 33–35. — EDN: [QARXXX](#).
- Изместьева Л. Р., Павлов Б. К. и Шимараева С. В. Многолетние изменения содержания хлорофилла "а" в пелагиали Южного Байкала // Сибирский экологический журнал. — 2006. — № 6. — С. 77–81. — EDN: [KWQWTZ](#).
- Калинкина Н. М. и Теканова Е. В. Зависимость концентрации хлорофилла *a* от содержания общего фосфора в водоемах с повышенной цветностью воды // Биология внутренних вод. — 2022. — № 5. — С. 475–479. — <https://doi.org/10.31857/s0320965222050138>.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. — Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2007. — 394 с.
- Кожова О. М. и Мельник Н. Г. Инструкция по обработке проб планктона счетным методом. — Иркутск : ИГУ, 1978. — 51 с.
- Малашенков Д. В., Мошарова И. В., Ильинский В. В. и др. Функциональная классификация фитопланктона и микробиологические параметры для оценки состояния прибрежных вод Южного Байкала // Биология внутренних вод. — 2022. — № 1. — С. 3–13. — <https://doi.org/10.31857/s0320965222010089>.
- Мокрый А. В. Сезонная сукцессия фитопланктона в Южном Байкале // Вестник ИргСХА. — 2019. — № 90. — С. 97–106. — EDN: [YXYYZN](#).
- Неверова-Дзиопак Е. В. и Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. — 176 с. — EDN: [KOLTDW](#).
- Поповская Г. И. Фитопланктон Байкала и его многолетние изменения: (1958-1990 гг.). Автореф. дис... д.б.н. — Новосибирск : СО АН СССР, 1991. — 32 с.
- Поповская Г. И., Усольцева М. В., Домышева В. М. и др. Весенний фитопланктон пелагиали озера Байкал в 2007-2011 годы // География и природные ресурсы. — 2015. — № 3. — С. 74–84. — EDN: [UGSWSF](#).
- Поповская Г. И., Усольцева М. В., Фирсова А. Д. и др. Оценка состояния весеннего фитопланктона озера Байкал в 2007 году // География и природные ресурсы. — 2008. — № 1. — С. 83–88. — EDN: [JJZVEL](#).
- Сиделев С. И. и Бабаназарова О. В. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. — 2008. — Т. 1, № 2. — С. 162–177. — EDN: [JRFEIB](#).
- Тарасова Е. Н. и Мещерякова А. И. Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал. — Новосибирск : Наука, 1992. — 144 с.
- Тимошкин О. А., Ситникова Т. Я., Русинек О. Т. и др. Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна. Том I. Озеро Байкал, кн. 1. — Новосибирск : Наука, 2001. — 832 с.

- Шимараев М. Н. и Гранин Н. Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Доклады АН СССР. — 1991. — Т. 321, № 2. — С. 381–385.
- Шимараев М. Н., Троицкая Е. С. и Домышева В. М. Интенсивность вертикального водообмена в отдельных котловинах Байкала // География и природные ресурсы. — 2003. — № 3. — С. 68–73.
- Шимараева С. В., Пислегина Е. В., Крашук Л. С. и др. Динамика хлорофилла *a* в пелагиали Южного Байкала в период прямой температурной стратификации // Биология внутренних вод. — 2017. — № 1. — С. 60–64. — <https://doi.org/10.7868/S0320965217010168>.
- Anderson G. C. Subsurface Chlorophyll Maximum in the Northeast Pacific Ocean // Limnology and Oceanography. — 1969. — Vol. 14, no. 3. — P. 386–391. — <https://doi.org/10.4319/lo.1969.14.3.0386>.
- Barbiero R. P. and Tuchman M. L. The Deep Chlorophyll Maximum in Lake Superior // Journal of Great Lakes Research. — 2004. — Vol. 30. — P. 256–268. — [https://doi.org/10.1016/s0380-1330\(04\)70390-1](https://doi.org/10.1016/s0380-1330(04)70390-1).
- Bondarenko N. A. and Logacheva N. F. Structural Changes in Phytoplankton of the Littoral Zone of Lake Baikal // Hydrobiological Journal. — 2017. — Vol. 53, no. 2. — P. 16–24. — <https://doi.org/10.1615/hydrobj.v53.i2.20>.
- Bondarenko N. A., Ozersky T., Obolkina L. A., et al. Recent changes in the spring microplankton of Lake Baikal, Russia // Limnologica. — 2019. — Vol. 75. — P. 19–29. — <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.01.002>.
- Bondarenko N. A., Vorobyova S. S., Zhuchenko N. A., et al. Current state of phytoplankton in the littoral area of Lake Baikal, spring 2017 // Journal of Great Lakes Research. — 2020. — Vol. 46, no. 1. — P. 17–28. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.001>.
- Carlson R. E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. — 1977. — Vol. 22, no. 2. — P. 361–369. — <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>.
- Churilova T. Ya., Moiseeva N. A., Latushkin A. A., et al. Preliminary results of bio-optical investigations at Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. — 2018. — No. 1. — P. 58–61. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-a-1-58>.
- Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by Core Writing Team, H. Lee and J. Romero. — Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. — 184 p. — <https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>.
- Coon T. G., Lopez M. M., Richerson P. J., et al. Summer dynamics of the deep chlorophyll maximum in Lake Tahoe // Journal of Plankton Research. — 1987. — Vol. 9, no. 2. — P. 327–344. — <https://doi.org/10.1093/plankt/9.2.327>.
- Cullen J. J. Subsurface Chlorophyll Maximum Layers: Enduring Enigma or Mystery Solved? // Annual Review of Marine Science. — 2015. — Vol. 7, no. 1. — P. 207–239. — <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135111>.
- Domysheva V., Vorobyeva S., Golobokova L., et al. Assessment of the Current Trophic Status of the Southern Baikal Littoral Zone // Water. — 2023. — Vol. 15, no. 6. — P. 1139. — <https://doi.org/10.3390/w15061139>.
- Estrada M., Marrasé C., Latasa M., et al. Variability of deep chlorophyll maximum characteristics in the Northwestern Mediterranean // Marine Ecology Progress Series. — 1993. — Vol. 92. — P. 289–300. — <https://doi.org/10.3354/meps092289>.
- Fahnenstiel G. L. and Glime J. Subsurface Chlorophyll Maximum and Associated Cyclotella Pulse in Lake Superior // Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie. — 1983. — Vol. 68, no. 5. — P. 605–616. — <https://doi.org/10.1002/iroh.3510680502>.
- Falkner K. K., Measures C. I., Herbelin S. E., et al. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal // Limnology and Oceanography. — 1991. — Vol. 36, no. 3. — P. 413–423. — <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.3.0413>.
- Fedotov A. P., Domisheva V. M., Sakirko M. V., et al. Phytoplankton of the littoral zone of Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. — 2025. — No. 1. — P. 113–177. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-a-1-113>.
- Hampton S. E., McGowan S., Ozersky T., et al. Recent ecological change in ancient lakes // Limnology and Oceanography. — 2018. — Vol. 63, no. 5. — P. 2277–2304. — <https://doi.org/10.1002/lno.10938>.
- Hobbs W. O., Lafrancois B. M. and DiDonato E. Nearshore conditions in the Great Lakes national parks: A baseline water quality and toxicological assessment // Park Science. — 2016. — Vol. 32, no. 2. — P. 36–45.
- Humlum O. The State of the Climate 2022. — The Global Warming Policy Foundation Report 56, 2022. — 54 p.
- Izmet'eva L. R., Moore M. V., Hampton S. E., et al. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // Journal of Great Lakes Research. — 2016. — Vol. 42, no. 1. — P. 6–17. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.006>.
- Jeffrey S. W. and Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. — 1975. — Vol. 167, no. 2. — P. 191–194. — [https://doi.org/10.1016/s0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/s0015-3796(17)30778-3).

- Karjalainen J., Holopainen A. L. and Huttunen P. Spatial patterns and relationships between phytoplankton, zooplankton and water quality in the Saimaa lake system, Finland // *Hydrobiologia*. — 1996. — Vol. 322, no. 1–3. — P. 267–276. — <https://doi.org/10.1007/bf00031839>.
- Kravtsova L. S., Izhboldina L. A., Khanaev I. V., et al. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal // *Journal of Great Lakes Research*. — 2014. — Vol. 40, no. 2. — P. 441–448. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.019>.
- Leach T. H., Beisner B. E., Carey C. C., et al. Patterns and drivers of deep chlorophyll maxima structure in 100 lakes: The relative importance of light and thermal stratification // *Limnology and Oceanography*. — 2017. — Vol. 63, no. 2. — P. 628–646. — <https://doi.org/10.1002/lno.10656>.
- Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // *Limnology and Oceanography*. — 1967. — Vol. 12, no. 2. — P. 343–346. — <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>.
- Panchenko M. V., Domysheva V. M., Pestunov D. A., et al. Carbon dioxide in the atmosphere-water system and biogenic elements in the littoral zone of Lake Baikal during period 2004-2018 // *Journal of Great Lakes Research*. — 2020. — Vol. 46, no. 1. — P. 85–94. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.016>.
- Pomazkina G. V., Belykh O. I., Domysheva V. M., et al. Structure and Dynamics of Phytoplankton of Southern Baikal (Russia) // *International Journal on Algae*. — 2010. — Vol. 12, no. 1. — P. 64–79. — <https://doi.org/10.1615/interjalgae.v12.i1.50>.
- Popovskaya G. I. Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal // *Aquatic Ecosystem Health & Management*. — 2000. — Vol. 3, no. 2. — P. 215–225. — <https://doi.org/10.1080/14634980008657017>.
- Sallée J.-B. Southern Ocean Warming // *Oceanography*. — 2018. — Vol. 31, no. 2. — P. 52–62. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.215>.
- SCOR-UNESCO Working group 17. Determination of photosynthetic pigments // *Determination of photosynthetic pigments in sea-water*. — Paris : UNESCO, 1966. — P. 9–18.
- Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M., et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // *Journal of Great Lakes Research*. — 2016. — Vol. 42, no. 3. — P. 487–497. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>.
- Usoltseva M. V., Titova L. A., Firsova A. D., et al. Long-term dynamics of dominant diatom species abundance of spring phytoplankton in three basins of the pelagic zone of Lake Baikal in 1964-1984 and 2007-2016 // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2023. — No. 2. — P. 55–62. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-a-2-55>.
- Verbolov V. I. Currents and water exchange in lake Baikal // *Water resources*. — 1996. — Vol. 23, no. 4. — P. 381–391.
- Weyhenmeyer G. A. Rates of change in physical and chemical lake variables - are they comparable between large and small lakes? // *Hydrobiologia*. — 2008. — Vol. 599, no. 1. — P. 105–110. — <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9193-z>.

THE CONTENT OF CHLOROPHYLL *a* AND ITS RELATION TO BIOGENIC ELEMENTS OF THE PELAGIC ZONE OF LAKE BAIKALM. V. Sakirko* , V. V. Blinov , M. M. Makarov , S. S. Vorobyova , A. P. Fedotov , and V. M. Domysheva 

Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Correspondence to: Maria Sakirko, sakira@lin.irk.ru

Based on the results of long-term field measurements (2018-2023), the variability of concentrations of chlorophyll *a* and biogenic elements in the pelagial of Lake Baikal was studied. Over the study period, the average concentration of chlorophyll *a* in the upper 100-meter layer of lake water is 1,32 µg/L. Two types of vertical chlorophyll *a* distribution are considered depending on the type of temperature stratification and the depth of the thermocline. The interannual and intraannual changes in the concentration of chlorophyll *a* in the upper layer of water and their relationship to the dynamics of biogenic elements are evaluated. The Carlson trophic index (TSI) has been calculated, and the obtained values indicate that the pelagic zone of Lake Baikal belongs to the oligotrophic type of water bodies.

Received: February 10, 2025

Accepted: June 18, 2025

Published: March 4, 2026

Keywords: Chlorophyll *a*, Lake Baikal, biogenic elements, pelagic, vertical dynamics.

© 2025. The Authors.

Citation: Sakirko M. V., Blinov V. V., Makarov M. M., Vorobyova S. S., Fedotov A. P., and Domysheva V. M. (2026), The Content of Chlorophyll *a* and Its Relation to Biogenic Elements of the Pelagic Zone of Lake Baikal, *Russian Journal of Earth Sciences*, 26, ES1005, <https://doi.org/10.2205/2026ES001038>, EDN: TVVGEK**References**

- Anderson G. C. Subsurface Chlorophyll Maximum in the Northeast Pacific Ocean // *Limnology and Oceanography*. — 1969. — Vol. 14, no. 3. — P. 386–391. — <https://doi.org/10.4319/lo.1969.14.3.0386>.
- Barbiero R. P. and Tuchman M. L. The Deep Chlorophyll Maximum in Lake Superior // *Journal of Great Lakes Research*. — 2004. — Vol. 30. — P. 256–268. — [https://doi.org/10.1016/s0380-1330\(04\)70390-1](https://doi.org/10.1016/s0380-1330(04)70390-1).
- Belykh O. I., Bessudova A. Yu., Gladkikh A. S., et al. Guide for Determining Biomass of Plankton Species in the Pelagic Zone of Lake Baikal. Methodological Manual. — Irkutsk : IGU, 2011. — 51 p. — (In Russian).
- Bondarenko N. A. Structure and Production Characteristics of Phytoplankton of Lake Baikal. PhD Thesis. — Borok : IBIW RAS, 1997. — 23 p. — EDN: ZKEGZT ; (in Russian).
- Bondarenko N. A. and Logacheva N. F. Structural Changes in Phytoplankton of the Littoral Zone of Lake Baikal // *Hydrobiological Journal*. — 2017. — Vol. 53, no. 2. — P. 16–24. — <https://doi.org/10.1615/hydrobj.v53.i2.20>.
- Bondarenko N. A., Ozersky T., Obolkina L. A., et al. Recent changes in the spring microplankton of Lake Baikal, Russia // *Limnologica*. — 2019. — Vol. 75. — P. 19–29. — <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.01.002>.
- Bondarenko N. A., Rusanov I. I., Chernitsyna S. M., et al. Structure and Production Potential of Summer Phytoplankton of Lake Baikal in the Present Period // *Water Resources*. — 2022. — Vol. 49, no. 1. — P. 98–108. — <https://doi.org/10.1134/s0097807822010055>.
- Bondarenko N. A., Tomberg I. V., Pen'kova O. G., et al. Structural Changes of Phyto- and Zooplankton under the Influence of Climate Change and Anthropogenic Load (Lake Baikal, Russia) // *Inland Water Biology*. — 2023. — Vol. 16, no. 6. — P. 955–966. — <https://doi.org/10.1134/s1995082923060056>.
- Bondarenko N. A., Vorobyova S. S., Zhuchenko N. A., et al. Current state of phytoplankton in the littoral area of Lake Baikal, spring 2017 // *Journal of Great Lakes Research*. — 2020. — Vol. 46, no. 1. — P. 17–28. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.001>.
- Bul'on V. V. Primary Production of Plankton in Inland Water Bodies. — Leningrad : Nauka, 1983. — 150 p. — (In Russian).
- Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography*. — 1977. — Vol. 22, no. 2. — P. 361–369. — <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>.

- Churilova T. Ya., Moiseeva N. A., Latushkin A. A., et al. Preliminary results of bio-optical investigations at Lake Baikal // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2018. — No. 1. — P. 58–61. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-a-1-58>.
- Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by Core Writing Team, H. Lee and J. Romero. — Geneva, Switzerland : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. — 184 p. — <https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>.
- Coon T. G., Lopez M. M., Richerson P. J., et al. Summer dynamics of the deep chlorophyll maximum in Lake Tahoe // *Journal of Plankton Research*. — 1987. — Vol. 9, no. 2. — P. 327–344. — <https://doi.org/10.1093/plankt/9.2.327>.
- Cullen J. J. Subsurface Chlorophyll Maximum Layers: Enduring Enigma or Mystery Solved? // *Annual Review of Marine Science*. — 2015. — Vol. 7, no. 1. — P. 207–239. — <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135111>.
- Domyshева V., Vorobyeva S., Golobokova L., et al. Assessment of the Current Trophic Status of the Southern Baikal Littoral Zone // *Water*. — 2023. — Vol. 15, no. 6. — P. 1139. — <https://doi.org/10.3390/w15061139>.
- Domyshева V. M. Patterns of Spatial Distribution and Dynamics of Oxygen and Biogenic Elements in the Deep-Water Area of Baikal. PhD Thesis. — Irkutsk : IG SB RAS, 2001. — 27 p. — (In Russian).
- Domyshева V. M., Usoltseva M. V., Sakirko M. V., et al. Spatial distribution of carbon dioxide fluxes, biogenic elements, and phytoplankton biomass in the pelagic zone of Lake Baikal in spring period of 2010–2012 // *Atmospheric and Oceanic Optics*. — 2014. — Vol. 27, no. 6. — P. 529–535. — <https://doi.org/10.1134/s1024856014060049>.
- Estrada M., Marrasé C., Latasa M., et al. Variability of deep chlorophyll maximum characteristics in the Northwestern Mediterranean // *Marine Ecology Progress Series*. — 1993. — Vol. 92. — P. 289–300. — <https://doi.org/10.3354/meps092289>.
- Fahnenstiel G. L. and Glime J. Subsurface Chlorophyll Maximum and Associated Cyclotella Pulse in Lake Superior // *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*. — 1983. — Vol. 68, no. 5. — P. 605–616. — <https://doi.org/10.1002/iroh.3510680502>.
- Falkner K. K., Measures C. I., Herbelin S. E., et al. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal // *Limnology and Oceanography*. — 1991. — Vol. 36, no. 3. — P. 413–423. — <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.3.0413>.
- Fedotov A. P., Domyshева V. M., Sakirko M. V., et al. Phytoplankton of the littoral zone of Lake Baikal // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2025. — No. 1. — P. 113–177. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-a-1-113>.
- Grachev M. A., Domyshева V. M., Khojer T. V., et al. Depth Water of Lake Baikal: A Natural Reference of Fresh Water // *Chemistry for Sustainable Development*. — 2004. — Vol. 12, no. 4. — P. 409–420. — EDN: HRNCZZ.
- Hampton S. E., McGowan S., Ozersky T., et al. Recent ecological change in ancient lakes // *Limnology and Oceanography*. — 2018. — Vol. 63, no. 5. — P. 2277–2304. — <https://doi.org/10.1002/lno.10938>.
- Hobbs W. O., Lafrancois B. M. and DiDonato E. Nearshore conditions in the Great Lakes national parks: A baseline water quality and toxicological assessment // *Park Science*. — 2016. — Vol. 32, no. 2. — P. 36–45.
- Humlum O. The State of the Climate 2022. — The Global Warming Policy Foundation Report 56, 2022. — 54 p.
- Izmest'eva L. R., Moore M. V., Hampton S. E., et al. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // *Journal of Great Lakes Research*. — 2016. — Vol. 42, no. 1. — P. 6–17. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.006>.
- Izmest'eva L. R., Pavlov B. K. and Shimaraeva S. V. Long-Term Changes in the content of Chlorophyll "a" in the Pelagic Part of the Southern Baikal // *Siberian Journal of Ecology*. — 2006. — No. 6. — P. 77–81. — EDN: KWQWTZ ; (in Russian).
- Jeffrey S. W. and Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. — 1975. — Vol. 167, no. 2. — P. 191–194. — [https://doi.org/10.1016/s0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/s0015-3796(17)30778-3).
- Kalinkina N. M. and Tekanova E. V. The Dependence of Chlorophyll a Concentration on Total Phosphorus in Water Bodies with Increasing Water Color // *Inland Water Biology*. — 2022. — Vol. 15, no. 5. — P. 539–542. — <https://doi.org/10.1134/s1995082922050108>.
- Karjalainen J., Holopainen A. L. and Huttunen P. Spatial patterns and relationships between phytoplankton, zooplankton and water quality in the Saimaa lake system, Finland // *Hydrobiologia*. — 1996. — Vol. 322, no. 1–3. — P. 267–276. — <https://doi.org/10.1007/bf00031839>.
- Kitaev S. P. Fundamentals of Limnology for Hydrobiologists and Ichthyologists. — Petrozavodsk : Karelian Scientific Center of RAS, 2007. — 394 p. — (In Russian).
- Kozhova O. M. and Mel'nik N. G. Instruction for Processing Plankton Samples by the Counting Method. — Irkutsk : IGU, 1978. — 51 p. — (In Russian).

- Kravtsova L. S., Izhboldina L. A., Khanaev I. V., et al. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal // Journal of Great Lakes Research. — 2014. — Vol. 40, no. 2. — P. 441–448. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.019>.
- Leach T. H., Beisner B. E., Carey C. C., et al. Patterns and drivers of deep chlorophyll maxima structure in 100 lakes: The relative importance of light and thermal stratification // Limnology and Oceanography. — 2017. — Vol. 63, no. 2. — P. 628–646. — <https://doi.org/10.1002/lno.10656>.
- Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // Limnology and Oceanography. — 1967. — Vol. 12, no. 2. — P. 343–346. — <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>.
- Malashenkov D. V., Moshkarova I. V., Il'insky V. V., et al. Use of Phytoplankton Functional Classification and Microbiological Parameters for Environmental Assessment of Coastal Waters of Southern Baikal // Inland Water Biology. — 2022. — Vol. 15, no. 1. — P. 1–10. — <https://doi.org/10.1134/s1995082922010072>.
- Mokry A. V. Seasonal Succession of Phytoplankton in Southern Baikal // Vestnik IrGSHA. — 2019. — No. 90. — P. 97–106. — EDN: [YXYYZN](https://www.edn.ru/yxyyzn); (in Russian).
- Neverova-Dzyopak E. V. and Tsvetkova L. I. Assessment of the Trophic State of Surface Waters. — Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture, Civil Engineering, 2020. — 176 p. — EDN: [KOLTDW](https://www.edn.ru/koltdw); (in Russian).
- Panchenko M. V., Domyshva V. M., Pestunov D. A., et al. Carbon dioxide in the atmosphere-water system and biogenic elements in the littoral zone of Lake Baikal during period 2004-2018 // Journal of Great Lakes Research. — 2020. — Vol. 46, no. 1. — P. 85–94. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.016>.
- Pomazkina G. V., Belykh O. I., Domyshva V. M., et al. Structure and Dynamics of Phytoplankton of Southern Baikal (Russia) // International Journal on Algae. — 2010. — Vol. 12, no. 1. — P. 64–79. — <https://doi.org/10.1615/interjalgae.v12.i1.50>.
- Popovskaya G. I. Phytoplankton of Baikal and Its Long-Term Changes: (1958-1990). Doctor Thesis. — Novosibirsk: SO AN SSSR, 1991. — 32 p. — (In Russian).
- Popovskaya G. I. Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal // Aquatic Ecosystem Health & Management. — 2000. — Vol. 3, no. 2. — P. 215–225. — <https://doi.org/10.1080/14634980008657017>.
- Popovskaya G. I., Usoltseva M. V., Domyshva V. M., et al. The spring phytoplankton in the pelagic zone of Lake Baikal during 2007-2011 // Geography and Natural Resources. — 2015. — Vol. 36, no. 3. — P. 253–262. — <https://doi.org/10.1134/s1875372815030051>.
- Popovskaya G. I., Usoltseva M. V., Firsova A. D., et al. Assessing the State of the Spring Phytoplankton in Lake Baikal in 2007 // Geography and Natural Resources. — 2008. — No. 1. — P. 83–88. — EDN: [JJZVEL](https://www.edn.ru/jjzvel); (in Russian).
- Sallée J.-B. Southern Ocean Warming // Oceanography. — 2018. — Vol. 31, no. 2. — P. 52–62. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.215>.
- SCOR-UNESCO Working group 17. Determination of photosynthetic pigments // Determination of photosynthetic pigments in sea-water. — Paris: UNESCO, 1966. — P. 9–18.
- Shimaraev M. N. and Granin N. G. On the Question of Stratification and the Convection Mechanism in Baikal // Doklady Akademii Nauk SSSR. — 1991. — Vol. 321, no. 2. — P. 381–385. — (In Russian).
- Shimaraev M. N., Troitskaya E. S. and Domyshva V. M. Intensity of Vertical Water Exchange in Individual Basins of Baikal // Geography and Natural Resources. — 2003. — No. 3. — P. 68–73. — (In Russian).
- Shimaraeva S. V., Pislegina E. V., Kraschuk L. S., et al. Dynamics of chlorophyll *a* concentration in the South Baikal pelagic during the direct temperature stratification period // Inland Water Biology. — 2017. — Vol. 10, no. 1. — P. 59–63. — <https://doi.org/10.1134/s1995082917010163>.
- Sidelev S. I. and Babanazarova O. V. The Link Analysis of the Pigmentary and Structural Characteristics of the High-Eutrophic Lake Phytoplankton // Journal of Siberian Federal University. Biology. — 2008. — Vol. 1, no. 2. — P. 162–177. — EDN: [JRFEIB](https://www.edn.ru/jrfeib); (in Russian).
- Tarasova E. N. and Meshcheryakova A. I. Current State of the Hydrochemical Regime of Lake Baikal. — Novosibirsk: Nauka, 1992. — 144 p. — (In Russian).
- Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M., et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // Journal of Great Lakes Research. — 2016. — Vol. 42, no. 3. — P. 487–497. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>.
- Timoshkin O. A., Sitnikova T. Ya., Rusinek O. T., et al. Index of Animal Species Inhabiting Lake Baikal and Its Catchment Area. Vol. I: Lake Baikal, Book 1. — Novosibirsk: Nauka, 2001. — 832 p. — (In Russian).
- Usoltseva M. V., Titova L. A., Firsova A. D., et al. Long-term dynamics of dominant diatom species abundance of spring phytoplankton in three basins of the pelagic zone of Lake Baikal in 1964-1984 and 2007-2016 // Limnology and Freshwater Biology. — 2023. — No. 2. — P. 55–62. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-a-2-55>.
- Verbolov V. I. Currents and water exchange in lake Baikal // Water resources. — 1996. — Vol. 23, no. 4. — P. 381–391.

- Vinberg G. G. Primary Production of Water Bodies. — Minsk : Izd-vo AN BSSR, 1960. — 329 p. — (In Russian).
- Votintsev K. K. Hydrochemistry of Lake Baikal. — Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1961. — 310 p. — (In Russian).
- Votintsev K. K., Meshcheryakova A. I. and Popovskaya G. I. Cycle of Organic Matter in Lake Baikal. — Novosibirsk : Nauka, 1975. — 189 p. — (In Russian).
- Weyhenmeyer G. A. Rates of change in physical and chemical lake variables - are they comparable between large and small lakes? // *Hydrobiologia*. — 2008. — Vol. 599, no. 1. — P. 105–110. — <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9193-z>.
- Zaitseva S. V. and Dagurova O. P. Chlorophyll and Nutrients Content in the Coastal Water of Lake Baikal // *Bulletin of the Buryat State University*. — 2013. — No. 3. — P. 33–35. — EDN: [QARXXZ](#) ; (in Russian).