

УДК «321» 581.526.325.2 (282.256.341)

Г. И. ПОПОВСКАЯ, М. В. УСОЛЬЦЕВА, В. М. ДОМЫШЕВА, М. В. САКИРКО,
В. В. БЛИНОВ, Т. В. ХОДЖЕР

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

ВЕСЕННИЙ ФИТОПЛАНКТОН ПЕЛАГИАЛИ ОЗЕРА БАЙКАЛ В 2007–2011 ГОДЫ

Дана оценка современного состояния фитопланктона пелагиали оз. Байкал за 2007–2011 гг. как продолжение многолетних исследований. Изучены видовая структура, численность, биомасса и пространственное распределение фитопланктона пелагиали Байкала. Проведено сравнение его количественных показателей за 2007–2011 гг. с данными многолетних исследований (1964–1990 гг.). Показано, что видовой состав фитопланктона в различные периоды был стабилен. Значения численности и биомассы за 2007–2011 гг. укладывались в амплитуду многолетних колебаний (1964–1990 гг.), с характерным для этого периода комплексом видов. Как и ранее, основной вклад в биомассу весеннего фитопланктона озера вносят диатомовые водоросли *Aulacoseira baicalensis*, *Synedra acus subsp. radians*, *Aulacoseira islandica* и *Stephanodiscus meyeri*. Максимальные их концентрации наблюдались в Южной и Средней котловинах озера, минимальные — в Северном Байкале. Выявлена корреляция биомассы фитопланктона с концентрацией кремния; корреляция с нитратами, фосфатами и температурой отсутствует.

Ключевые слова: фитопланктон, диатомовые водоросли, биомасса, биогенные элементы.

An assessment is made of the current status of the phytoplankton in the pelagic zone of Lake Baikal for 2007–2011, as the continuation of previous long-term research. We investigated the species composition, population, biomass and spatial distribution of the phytoplankton in the pelagic zone of Baikal. Its quantitative indicators for 2007–2011 have been compared with data of long-term investigations (1964–1990). It is shown that the species composition of the phytoplankton remained stable at different periods. The values of population and biomass for 2007–2011 fitted in the range of long-term fluctuations (1964–1990), with the species assemblage characteristic for that period. As in the case with previous research, the main contribution to the biomass of the spring phytoplankton in the lake was made by the diatoms *Aulacoseira baicalensis*, *Synedra acus subsp. radians*, *Aulacoseira islandica*, and *Stephanodiscus meyeri*. Their maximum and minimum concentrations were observed in the southern and middle lake depressions, and in Northern Baikal, respectively. The study revealed a correlation of phytoplankton biomass with silicon concentration; no correlation with nitrates, phosphates and temperature was ascertained.

Keywords: phytoplankton, diatoms, biomass, biogenic elements.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Озеро Байкал является древнейшим (25 млн лет) [1] и глубочайшим (1637 м) внутриконтинентальным водоемом с большим объемом воды (23 тыс. км³) [2]. Чистота байкальских вод во многом определяется жизнедеятельностью уникального органического мира озера. Особенно велико значение фитопланктона, обитающего в толще байкальских вод.

Со времени опубликования первой работы по сезонной и межгодовой изменчивости фитопланктона в Южном Байкале на постоянной станции наблюдения в районе пос. Большие Коты [3] прошло более 60 лет. Непрерывные мониторинговые наблюдения там проводятся с 1948 г. [4–8].

Многолетние исследования фитопланктона всей акватории Байкала осуществляются Лимнологическим институтом СО РАН с 1964 г. преимущественно в весенний период, поскольку для Байкала характерен резко выраженный весенний максимум фитопланктона, когда создается основная масса крупного растительного планктона [9–11]. Изучение пелагиали озера выполнялось по разработанной схеме в Южной, Средней и Северной котловинах озера на 12 стандартных разрезах [10, 12, 13]. В результате исследований выявлено, что фитопланктон оз. Байкал характеризуется неоднородным пространственным распределением по всей акватории озера и резкими межгодовыми и сезонными колебаниями численности и биомассы водорослей [10–12]. Весь ряд наблюдений (1964–1990 гг.) за биомассой фитопланктона классифицирован по трем градациям: высокопродуктивные годы с биомассой фитопланктона в весенний период в слое 0–25 м более 1 г/м³, среднепродуктивные — 0,5–1 г/м³ и малопродуктивные — менее 0,5 г/м³ [10]. В Южном Байкале 11 из 27 лет (1964–1990 гг.) относились к высокопродуктивным, 3 года — к среднепродуктивным и 13 лет — к малопродуктивным.

© 2015 Поповская Г. И., Усольцева М. В. (usmarina@inbox.ru), Домышева В. М. (hydrochem@lin.irk.ru), Сакирко М. В. (sakira@lin.irk.ru), Блинов В. В. (bwad@lin.irk.ru),

Ходжер Т. В. (khodzher@lin.irk.ru)

Сходная картина наблюдалась и в Среднем Байкале. В Северной котловине озера уровень развития фитопланктона был значительно ниже: преобладали малопродуктивные годы [11, 14]. В результате многолетних исследований установлено, что по численности фитопланктона Южный и Средний Байкал в пять, а по биомассе в шесть раз богаче, чем Северный. Основной вклад в биомассу вносили диатомовые водоросли *Aulacoseira baicalensis* (K. Meyer) Simonsen, *Synedra acus* subsp. *radians* (Kützing) Skabitchevsky, *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen, *Stephanodiscus meyeri* Genkal et Popovskaya и *Nitzschia graciliformis* Lange-Bertalot et Simonsen emend. Genkal et Popovskaya [11, 15]. В малопродуктивные годы интенсивно развивался пикофитопланктон, особенно в Северной котловине [16, 17].

После 1990 г. изучение весеннего фитопланктона по акватории озера проводилось по сокращенной программе и менее регулярно [18–22]. С 2007 г. возобновлены ежегодные весенние исследования по всей акватории озера [23].

Цель данной работы — изучение весеннего фитопланктона пелагиали Байкала по данным кругобайкальских экспедиций 2007–2011 гг. в сопоставлении с многолетними данными 1964–1990 гг. и оценка взаимосвязи фитопланктона с некоторыми абиотическими факторами среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для настоящей статьи послужили данные, полученные в пяти кругобайкальских экспедициях (2007–2011 гг.). Пробы отбирались в конце мая–начале июня на научно-исследовательских судах «Академик В. А. Коптюг» и «Г. Ю. Верещагин» по схеме, разработанной ранее [12] и несколько сокращенной нами (рис. 1). Работа проводилась в одну фенофазу — сразу после вскрытия озера ото льда. Исследовали верхний 25-метровый слой. Количественные пробы отбирали с помощью системы батометров карусели SBE-32 (Carousel Water Sampler, фирмы Sea-Bird Electronics, Inc. США) при одновременном измерении температуры воды высокоточным CTD-зондом SBE-25 и 19plus. Фиксацию проб проводили раствором Люголя и ацетата натрия по общепринятой методике [24]. Для определения биогенных элементов использованы фотометрические методы [25, 26].

При качественном анализе фитопланктона использовали сетные пробы, отобранные сетью Джели из шелкового газа № 70. Для количественного учета применяли осадочный метод [27, 28]. Подсчет клеток водорослей проводили по методу Гензена [27] с помощью светового микроскопа Axiovert 200 (Zeiss, Германия) с фотокамерой Pixera Penguin 600CL. Биомассу клеток определяли расчетным способом [29, 30]. Идентификация мелкоячеистых центричных диатомовых проводилась посредством сканирующего электронного микроскопа Philips SEM 525M (Голландия). Для этого использовали собранный во время экспедиции нефиксированный материал, осажденный на фильтры Millipore с диаметром пор 1,2 мкм. После высушивания на воздухе фильтры приклеивали на столик для СЭМ, напыляли золотом и анализировали на базе центра

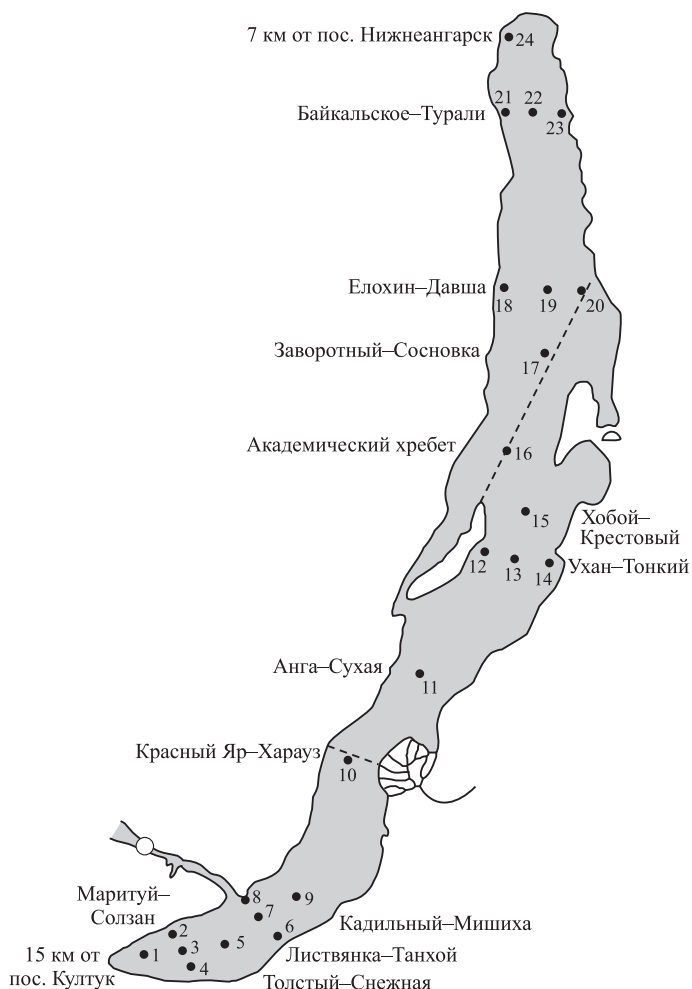


Рис. 1. Расположение станций отбора проб по акватории оз. Байкал.

1–9 — Южный Байкал, 10–16 — Средний Байкал, 17–24 — Северный Байкал.

«Электронная микроскопия» Объединенного приборного центра коллективного пользования физико-химического ультрамикрoанализа Лимнологического института СО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фитопланктон. Результаты обработки проб фитопланктона, отобранных по всей акватории озера в конце мая—начале июня 2007 г., показали, что на большей части пелагиали в массе развивались диатомовые водоросли. Основной вклад в биомассу вносил крупноклеточный вид *Aulacoseira baicalensis* (30–100 % от общей биомассы фитопланктона) (рис. 2). Субдоминантами были *Stephanodiscus meyeri*, *Aulacoseira islandica* и *Synedra acus* subsp. *radians*. На фоне интенсивного развития диатомовых водорослей золотистых было немного (2–18 %), преимущественно *Dinobryon cylindricum* Imhof и *Mallomonas van-nigera* Asmund. На долю динофитовых и криптофитовых водорослей приходилось 1–2 % от всей массы фитопланктона. В Южном Байкале общая численность фитопланктона составляла 120–652 тыс. кл/л, биомасса — 439–3048 мг/м³. По уровню развития фитопланктона Южного Байкала 2007-й год отнесен к разряду высоко- и среднепродуктивных лет (рис. 3). Фитопланктон Среднего и Северного Байкала был представлен теми же видами (см. рис. 2). Общая биомасса фитопланктона 2007 г. соответствовала уровню высокопродуктивных лет, за исключением ст. Заворотный—Сосновка (см. рис. 3).

Весной 2008 г. фитопланктон Южного и Среднего Байкала на 98 % состоял из диатомовых, с массовым развитием на всех станциях *Synedra acus* subsp. *radians*. Ее численность изменялась в Южном Байкале от 246 до 481 тыс. кл/л, в Среднем — от 464 до 586 тыс. кл/л. Постоянные компоненты фитопланктона были представлены такими видами, как *Aulacoseira baicalensis*, *Aulacoseira islandica*, *Cyclotella baicalensis* Skvortzow, *Stephanodiscus meyeri*, *Asterionella formosa* Hassal и *Dinobryon cylindricum*. Доля мелких фракций водорослей была невелика: 1–5 % от общей численности фитопланктона. К ним относились: из криптофитовых водорослей — *Rhodomonas pusilla* (Bachmann) Javornicky, из зеленых — *Koliella longiseta* (Vischer) Hindák, *Monoraphidium arcuatum* (Korshikov) Hindák, *M. contortum* (Thuret) Komárková-Legnerová, а из диатомовых — мелкоклеточные виды *Stephanodiscus*. Общая биомасса фитопланктона в Южном Байкале изменялась от 963 до 1333 мг/м³ (см. рис. 3), в Среднем — от 2022 до 2892 мг/м³, при этом 80–90 % приходилось на долю *Synedra*. Таким образом, по уровню развития фитопланктона Южного и Среднего Байкала 2008-й год характеризовался как высокопродуктивный.

Фитопланктон Северного Байкала распределен неравномерно. На станциях Елохин—Давша и 3 км от Давши наблюдалось интенсивное развитие золотистых водорослей. На остальных станциях доминирующим видом была *Aulacoseira baicalensis*. Ее численность изменялась от 1,5 до 47 тыс. кл/л. Количественные характеристики фитопланктона были низкими и соответствовали малопродуктивным годам. Только на двух станциях (3 км от Давши и 7 км от пос. Нижнеангарск) фитопланктон соответствовал уровню среднепродуктивных лет (см. рис. 3).

Таким образом, 2008 г. по развитию весеннего фитопланктона в Южной и Средней котловинах озера характеризовался как высокопродуктивный «синедровый» год, а в Северном Байкале, напротив, — как средне- и малопродуктивный.

Доминирующим видом фитопланктона Южного Байкала в 2009 г., как и в 2008 г., была *Synedra* (см. рис. 2), на долю которой приходилось 58–90 % от общей биомассы. Субдоминанты в основном представляли собой те же виды, что и весной 2008 г.: *Aulacoseira islandica*, *A. baicalensis*, *Rhodomonas pusilla* и *Koliella longiseta*. Общая биомасса фитопланктона на большинстве станций превышала 500 мг/м³, поэтому Южную котловину по фитопланктону можно характеризовать как среднепродуктивную (см. рис. 3).

Общая численность фитопланктона в Средней котловине изменялась от 121 до 326 тыс. кл/л, биомасса — от 255 до 753 мг/м³. Здесь также доминировала *Synedra acus* subsp. *radians* (см. рис. 2). Роль других групп водорослей была незначительной, за исключением *Dinobryon cylindricum* и *Aulacoseira islandica*, интенсивное развитие которой наблюдалось на ст. Академический хребет (см. рис. 2). 2009-й год по фитопланктону Среднего Байкала относится к средне- и малопродуктивным годам (см. рис. 3).

Фитопланктон Северной котловины Байкала был намного беднее, чем Южной и Средней (см. рис. 3), и имел смешанный характер (см. рис. 2). В очень небольших концентрациях встречались *Aulacoseira baicalensis*, *A. islandica*, *Cyclotella baicalensis*, *Stephanodiscus inconspicuus* Makarova et Pomazkina emend. Genkal, Kuzmina et Popovskaya, *Rhodomonas pusilla* и виды рода *Monoraphidium*. Общая численность водорослей изменялась от 11 до 106 тыс. кл/л, биомасса — от 10 до 151 мг/м³ (см. рис. 3), что соответствует малопродуктивным годам.

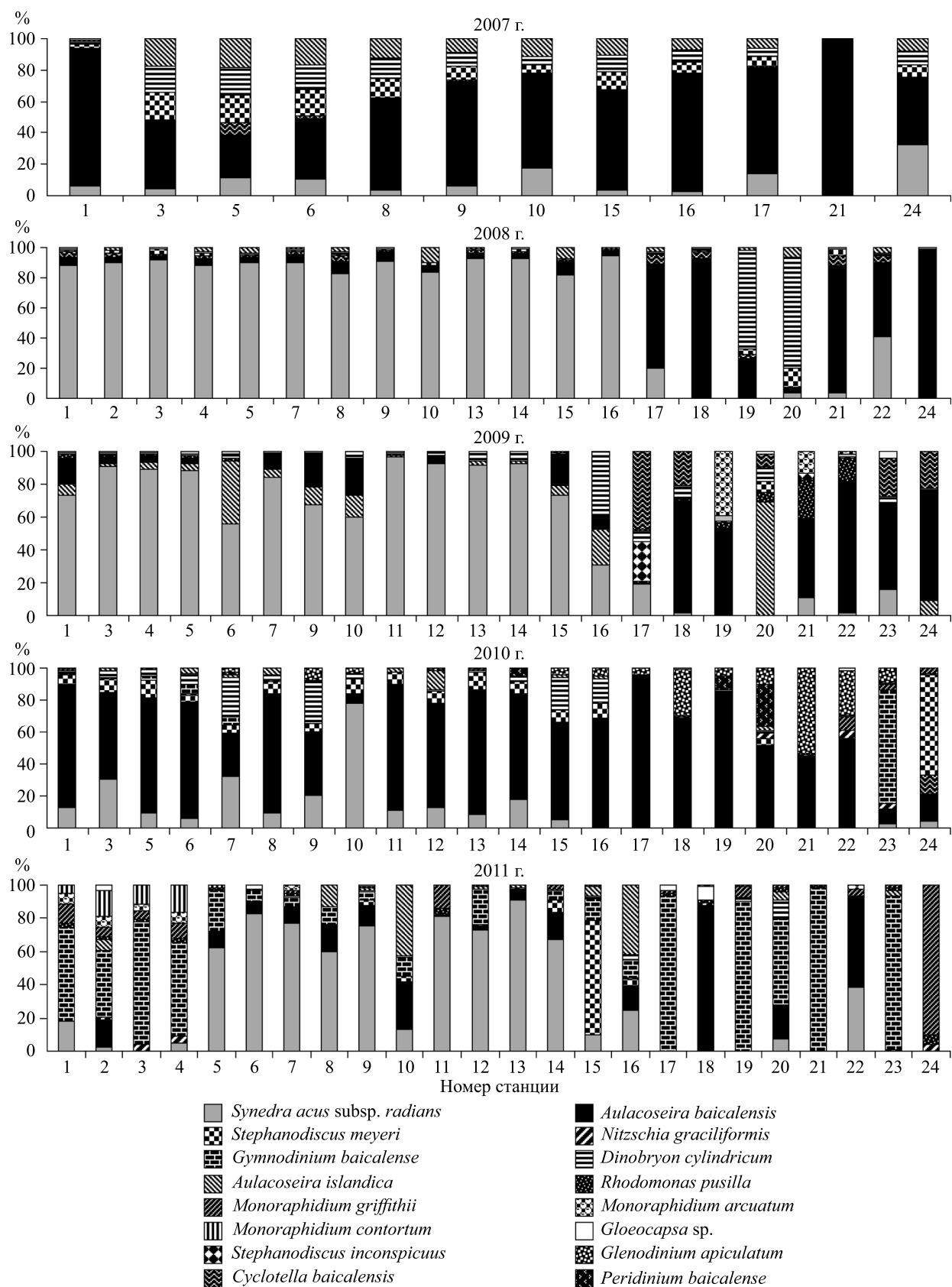


Рис. 2. Вклад различных видов в биомассу весеннего фитопланктона в 2007–2011 гг.

Здесь и на рис. 3 и 4 номера станций отбора проб указаны согласно рис. 1.

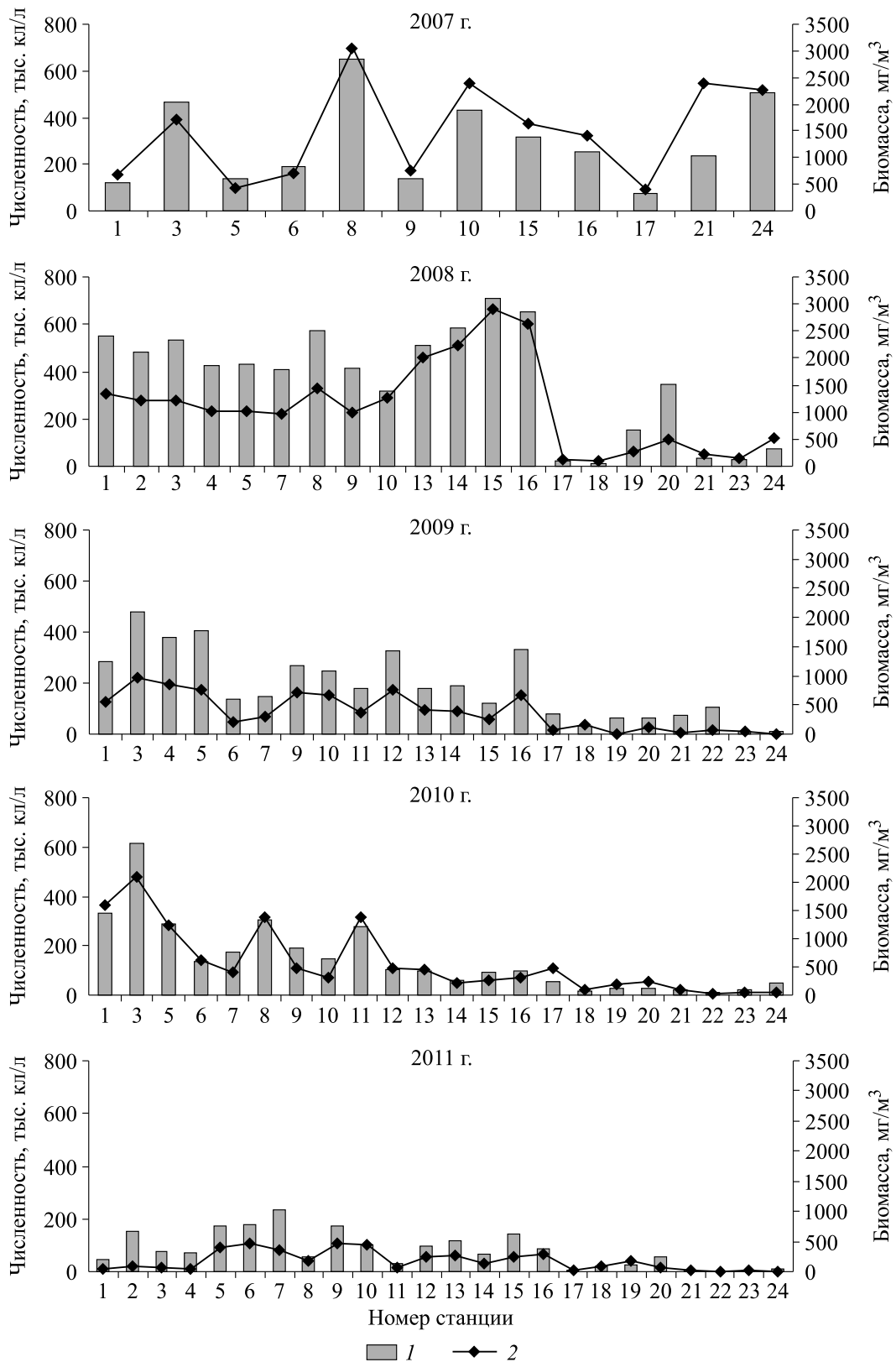


Рис. 3. Общая численность (1) и биомасса (2) весеннего фитопланктона в 2007–2011 гг.

В состав доминирующего комплекса Южного Байкала в 2010 г. входили *Aulacoseira baicalensis*, *Synedra acus* subsp. *radians*, *Stephanodiscus meyeri* и *Dinobryon cylindricum*. Общая численность и биомасса составляли 135–613 тыс. кл/л и 309–2087 мг/м³ соответственно. По биомассе преобладала *Aulacoseira baicalensis*, на долю которой в Южном Байкале приходилось 30–80 % (см. рис. 2). Значение мелких фракций водорослей было невелико (1–5 %). К ним относились *Nitzschia graciliformis*, *Rhodomonas pusilla*, *Stephanodiscus inconspicuus*, *Monoraphidium griffithii* (Berkeley) Komárková-Legnerová, *M. arcuatum*, *M. contortum*. В небольших количествах встречались крупные динофитовые водоросли *Gymnodinium baicalense* Antipova и *Glenodinium apiculatum* Zacharias. Максимальные концентрации фитопланктона зарегистрированы в самой южной оконечности озера, где общая биомасса водорослей варьировала в пределах 1234–2087 мг/м³ (см. рис. 3), что характеризует 2010 г. как высокопродуктивный. На остальных станциях биомасса фитопланктона колебалась от 309 до 612 мг/м³ и соответствовала уровню средне- и малопродуктивных лет.

Видовой состав планктона Среднего Байкала не отличался от такового в южной части озера (см. рис. 2). Общая численность фитопланктона изменялась от 58 до 275 тыс. кл/л, биомасса — от 220 до 1380 мг/м³. Максимальные концентрации водорослей наблюдались на ст. Анга–Сухая (275 тыс. кл/л и 1380 мг/м³), что отвечало уровню высокопродуктивных лет. На других станциях численность и биомасса были значительно меньше и соответствовали уровню малопродуктивных лет (см. рис. 3).

Фитопланктон Северного Байкала разнообразен и представлен диатомовыми (*Aulacoseira baicalensis*, *Nitzschia graciliformis*), криптофитовыми (*Rhodomonas pusilla*), динофитовыми (*Gymnodinium baicalense*, *Glenodinium apiculatum*) и зелеными водорослями (*Monoraphidium griffithii*, *M. arcuatum*, *M. contortum*). Общая численность фитопланктона Северного Байкала изменялась от 10 до 97 тыс. кл/л, биомасса — от 19 до 483 мг/м³, что характеризует 2010 г. как малопродуктивный.

Весной 2011 г. фитопланктон Южного Байкала был распределен неравномерно (см. рис. 2 и 3). Минимальные концентрации зарегистрированы на станциях в самой южной оконечности озера (см. рис. 3). Фитопланктон представлен диатомеей *Nitzschia graciliformis* и зелеными водорослями рода *Monoraphidium* (*M. arcuatum*, *M. griffithii*, *M. contortum*). В небольших количествах присутствовали криптофитовые (*Rhodomonas pusilla*), динофитовые (*Gymnodinium baicalense*) и золотистые водоросли (*Mallomonas vannigera* и *Chryso-sphaerella baicalensis* Поповская). На большинстве станций Южного и Среднего Байкала доминировала *Synedra acus* subsp. *radians* (см. рис. 2).

Фитопланктон Северного Байкала однообразен. В небольших концентрациях встречались *Gymnodinium baicalense*, *Aulacoseira baicalensis*, *Synedra acus*, *Rhodomonas pusilla* и *Monoraphidium griffithii* (см. рис. 2).

Общая биомасса фитопланктона в 2011 г. в Южном Байкале изменялась от 37 до 470 мг/м³, в Среднем — от 66 до 278, в Северном — от 2,4 до 298 мг/м³ (см. рис. 3), что характеризует этот год в целом как малопродуктивный, на отдельных станциях — как среднепродуктивный.

Температура. На рис. 4 показаны вариации средней температуры в слое воды 0–25 м на разных станциях отбора проб весной в 2007–2011 гг. В рассматриваемый период в каждой из трех котловин

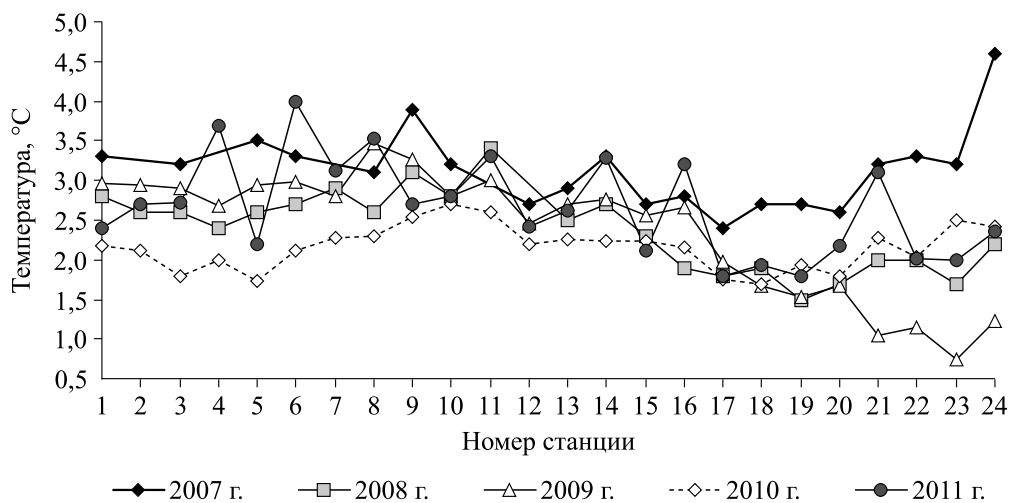


Рис. 4. Температура слоя воды 0–25 м на разных станциях в 2007–2011 гг.

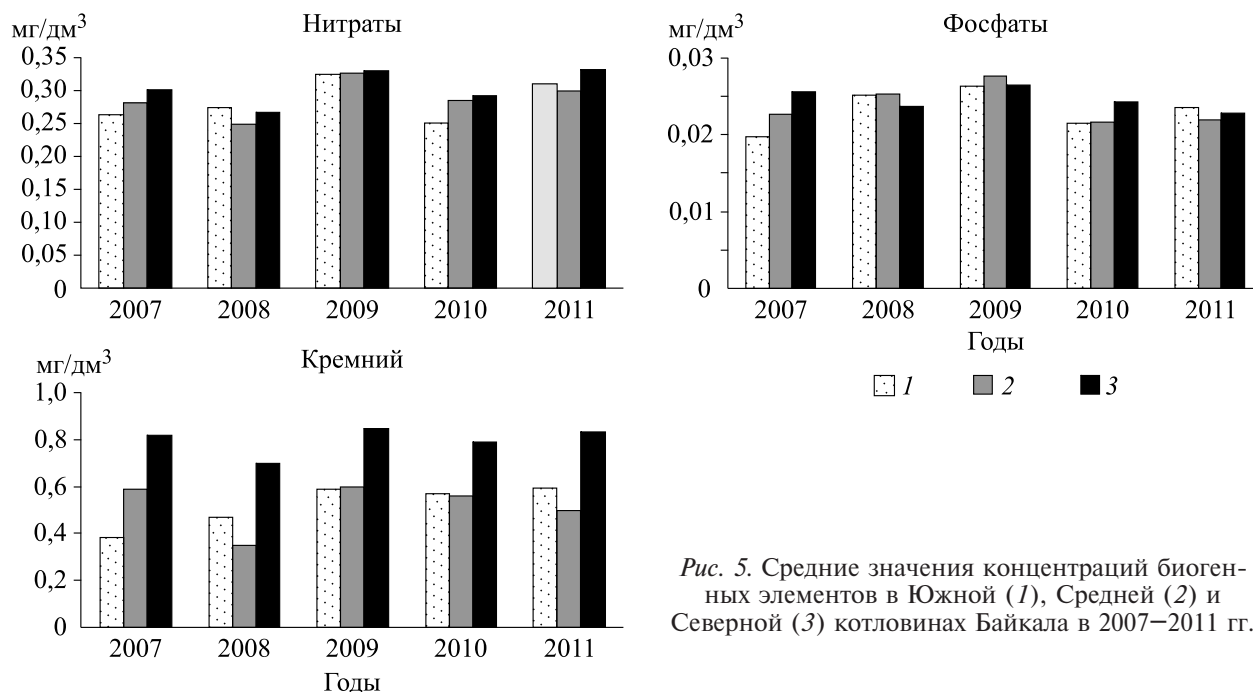


Рис. 5. Средние значения концентраций биогенных элементов в Южной (1), Средней (2) и Северной (3) котловинах Байкала в 2007–2011 гг.

наблюдались межгодовые различия температуры поверхностного слоя. Самым теплым годом был 2007 г., когда температура верхнего слоя в Южной котловине варьировала в пределах 3,1–3,8 °С, в Средней — от 2,6 до 3,3 °С, а в Северной — от 2,4 до 4,5 °С. Самые низкие температуры отмечены в Южном и Среднем Байкале в 2010 г. и в Северной котловине — в 2009 г. (см. рис. 4).

Биогенные элементы. В 2007–2011 гг. концентрация нитратов в слое воды 0–25 м изменялась от 0,21 до 0,36 мг/дм³. Минимальные концентрации отмечены в Южной котловине в 2010 г., в Средней и Северной — в 2008 г. Максимальные концентрации нитратов по всему Байкалу наблюдались в 2011 г. (рис. 5).

В распределении концентрации фосфатов по котловинам озера каких-либо закономерностей не обнаружено. Их количество варьировало от 0,012 до 0,037 мг/дм³. Различия в концентрации фосфатов в разных котловинах составляло 0,002–0,004 мг/дм³, и только в 2007 г. разница в концентрации фосфатов в воде Южной и Северной котловин была наибольшей — 0,006 мг/дм³.

Содержание кремния в слое 0–25 м было максимальным (0,7–0,87 мг/дм³) в Северной котловине в течение всего периода наблюдений (см. рис. 5), тогда как в Южной и Средней котловинах эти значения не превышали 0,66 мг/дм³. Минимальные концентрации кремния отмечены в Южной котловине в 2007 г., в Средней и Северной — в 2008 г.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Фитопланктон пелагиали озера Байкал. В ряде работ по результатам наблюдений на мониторинговой станции, расположенной в районе пос. Большие Коты (Южный Байкал), указывается на значительные изменения видовой структуры и количественных показателей фитопланктона [5, 6, 8, 31–33]. Так, из работы [8] следует, что в летние месяцы увеличилось количество мелких представителей золотистых и криптофитовых водорослей. Высказываются опасения по поводу возможного изменения структуры сообщества и замены доминирующих холодолюбивых видов *Aulacoseira baicalensis* и *Cyclotella baicalensis* представителями зеленых и синезеленых водорослей. Однако эти работы в основном опираются на изучение исследований летнего фитопланктона, тогда как основная масса крупного диатомового планктона создается весной, после вскрытия озера ото льда. Кроме того, исследования, описанные в вышеуказанных работах, проводились на одной мониторинговой станции Южного Байкала, и их результаты нельзя экстраполировать на весь Южный Байкал, а тем более на всю пелагиаль озера.

По данным наших наблюдений в 2007–2011 гг. в весенний период по всей акватории Байкала можно заключить, что эти годы различались как по уровню развития фитопланктона (см. рис. 3), так и по пространственному распределению доминирующих видов (см. рис. 2). Высокопродуктивными по фитопланктону были 2007 г. (все котловины), 2008 г. (Южный и Средний Байкал) и 2010 г. (Южный Байкал) (рис. 6). Наибольший вклад в биомассу фитопланктона в эти годы вносили виды диатомей *Aulacoseira baicalensis* (2007, 2010 гг.) и *Synedra acus* subsp. *radians* (2008 г.). 2009-й год в Южном и Среднем Байкале характеризовался как среднепродуктивный, а 2011 г. по всей акватории Байкала — как малопродуктивный, с доминированием в Южном и Среднем Байкале *Synedra acus* subsp. *radians*.

Уровень развития фитопланктона в Северном Байкале за 5-летний период наблюдений, за исключением 2007 г., был низким (см. рис. 6).

Изменился ли весенний фитопланктон пелагиали Байкала более чем за 47-летний период (1964–2011)? Из наших данных следует, что состав основных представителей флоры в целом не претерпел заметных изменений. По-прежнему в момент максимального весеннего развития фитопланктона определяющая роль принадлежит крупноклеточным диатомовым водорослям, на долю которых приходится 50–90 % от общей численности и биомассы. Доминирующими видами весеннего фитопланктона в высоко- и среднепродуктивные годы остаются *Aulacoseira baicalensis*, *Synedra acus* subsp. *radians*, *Stephanodiscus meyeri*, *Aulacoseira islandica* и *Dinobryon cylindricum*. *Nitzschia graciliformis* (*N. acicularis*) в указанный временной интервал не входила в состав доминирующих видов, хотя в предыдущий период исследования (1964–1990 гг.) в отдельные годы (1969, 1977, 1980, 1984) наблюдалось ее массовое развитие в Южной котловине озера.

Отметим, что состав массовых видов фитопланктона в конце 1990-х–начале 2000-х гг. в Южном Байкале принципиально не изменился по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (1973–1999 гг.) [6].

Что касается количественных показателей, то уровень развития фитопланктона (преимущественно диатомовых) в пелагиали озера в настоящее время соответствует таковому в другие периоды: в 1964–1969 гг. — 984 мг/м³, в 1973–1977 гг. — 583 мг/м³, в 1981–1985 гг. — 846 мг/м³. В среднем за 5-летний период наблюдений (2007–2011 гг.) биомасса весеннего фитопланктона в слое 0–25 м достигала 718 мг/м³. Среднеголетняя биомасса фитопланктона в 1964–1990 гг. составляла 736 мг/м³.

Таким образом, количественные показатели фитопланктона за 2007–2011 гг. в весенний период укладываются в амплитуду многолетних межгодовых колебаний и не превышают величин, свойственных олиготрофным водоемам.

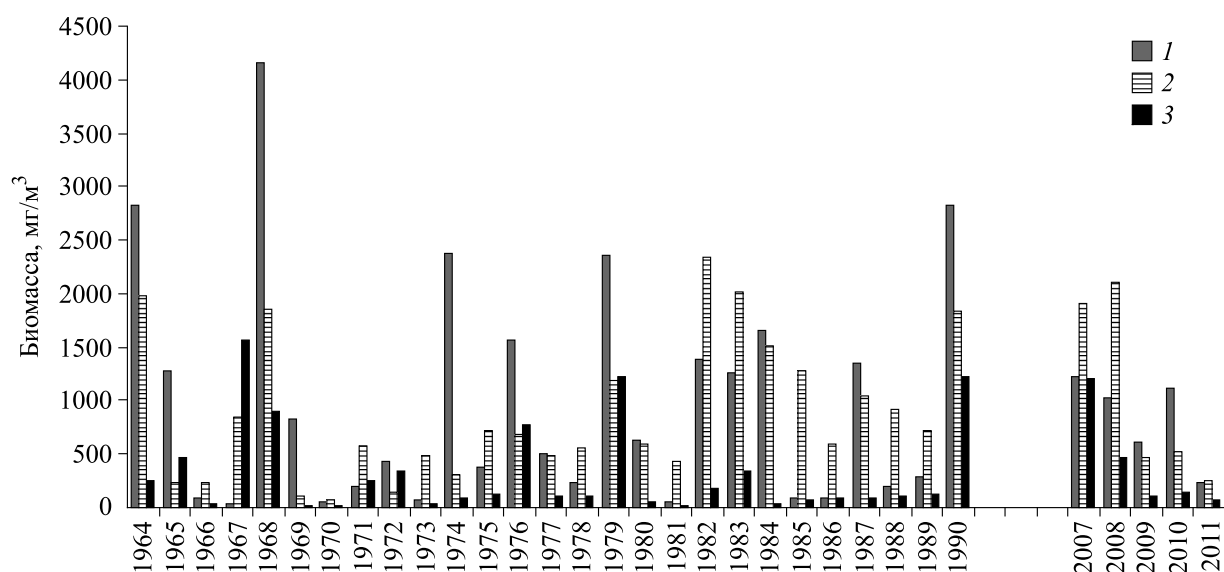


Рис. 6. Многолетняя динамика биомассы весеннего фитопланктона Байкала в 1964–1990 и 2007–2011 гг.

1 — Южный Байкал, 2 — Средний Байкал, 3 — Северный Байкал.

Температура. Известно, что в весенний период для Байкала характерна обратная температурная стратификация, когда температура поверхности воды ниже 4 °С [34]. Прогрев поверхности озера по всей акватории происходит неравномерно вследствие его значительной протяженности с юга на север.

Зависит ли развитие фитопланктона от температуры? Значения коэффициентов корреляции температуры от общей численности и биомассы фитопланктона показали, что связь между этими характеристиками слабая. При этом она может быть как положительной, так и отрицательной, что связано с влиянием динамических процессов и неравномерным распределением тепла. Наибольшая положительная зависимость численности и биомассы от температуры выявлена в 2007 г. в Среднем и Северном Байкале, где коэффициент корреляции составлял 0,86–0,94 (по численности) и 0,92–0,74 (по биомассе).

Несмотря на то что в прошедшие 60 лет постепенно возрастала температура поверхности и верхних слоев воды Байкала в теплое время года и уменьшилась продолжительность периода ледостава [35], биомасса фитопланктона последних лет соизмерима со среднемноголетней биомассой 1964–1990 гг.

Биогенные элементы. Ранее, при изучении зависимости биогенных элементов и фитопланктона, было показано, что в мае–июне при большой биомассе диатомового фитопланктона потребление ими нитратов и фосфатов низкое, а кремния — высокое [36]. Отсутствие связи между химическими показателями и количественными значениями фитопланктона Байкала отмечено в ряде работ [12, 19, 22, 37].

Результаты наших исследований за 2007–2011 гг. показали, что концентрации нитратов и фосфатов в весенний период варьируют незначительно (см. рис. 5), не отмечается каких-либо закономерностей в их распределении по акватории озера в различные по продуктивности годы. Концентрации кремния колеблются в широком диапазоне (см. рис. 5). Максимальные их значения отмечены в Северной котловине Байкала, что обусловлено влиянием рек Кичера и Верхняя Ангара, содержание кремния в которых значительно выше, чем в пелагиали озера [38]. Более прогретые воды притоков распространяются по поверхности северной части озера. Распространение речных вод прослеживается до разреза Байкальское–Турали, а иногда и южнее (как, например, в 2011 г.). Причиной высоких концентраций кремния в Северной котловине может быть также более слабое по сравнению с другими частями озера развитие диатомового фитопланктона [12]. Коэффициент корреляции (R) между биомассой фитопланктона и концентрацией кремния для разных котловин озера варьирует от 0,13 до 0,96, максимальные его значения характерны для Северного Байкала, где в 2008–2011 гг. биомасса фитопланктона была существенно ниже, чем в других котловинах (см. рис. 3).

Исследование содержания биогенных элементов в весенний период (май) в верхнем 25-метровом слое воды Байкала во второй половине XX в. показало [12], что в 1964–1968 гг. средняя концентрация нитратов изменялась от 0,15 до 0,31 мг/дм³, с минимумом в Средней котловине (0,21 мг/дм³) и практически одинаковой концентрацией в Южном (0,24 мг/дм³) и Северном Байкале (0,23 мг/дм³). Содержание фосфатов в озере в этот период варьировало от 0,009 до 0,028 мг/дм³, средняя концентрация в Южном Байкале составила 17 мкг/дм³, в Среднем и Северном — 0,018 мг/дм³.

При определении кремния в качестве раствора сравнения раньше использовали раствор хромата калия, в то время как сейчас используется стандартный раствор кремния. Чтобы сравнить данные по кремнию в различные периоды, мы применили коэффициент из работы [39]. С учетом коэффициента содержание кремния в 1964–1968 гг. в трофогенном слое воды разных котловин изменялось от 0,49 до 0,92 мг/дм³, средняя концентрация в Южном Байкале составила 0,69, в Среднем — 0,63, в Северном — 0,70 мг/дм³. В 1986–1989 гг. среднегодовое содержание биогенных элементов в Южном Байкале было следующим: нитраты — 0,24 мг/дм³, фосфаты — 0,012 мг/дм³, кремний — 0,65 мг/дм³ [40]. Средние концентрации биогенных элементов в 1960-е гг. и 2007–2011 гг. варьируют практически в одном диапазоне, следовательно, можно заключить, что значительных изменений в содержании нитратов, фосфатов и кремния в пелагиали озера в течение последних 47 лет не произошло.

Концентрация нитратов и фосфатов в продуктивные и непродуктивные по фитопланктону годы (2007–2011 гг.) различалась незначительно (см. рис. 5). В концентрации кремния отмечены существенные как межгодовые, так и межкотловинные различия. Слабая корреляция между биомассой и концентрацией кремния, а также нитратов и фосфатов обусловлена тем, что на содержание биогенных элементов влияют не только биологические факторы (потребление их фитопланктоном), но и абиотические (минерализация органического вещества, динамика водных масс озера, время освобождения отдельных участков Байкала ото льда, интенсивность прогрева поверхностного слоя воды и пр.).

Работа выполнена в рамках базовых проектов СО РАН (№ VII.62.1.3 и VIII.76.1.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мац В. Д., Уфимцев Г. Ф., Мандельбаум М. М., Алакшин А. М., Поспеев А. В., Шимараев М. Н., Хлыстов О. М.** Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: Строение и геологическая история. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. — 252 с.
2. **Атлас Байкала** / Под ред. Г. И. Галазия. — М.: Федер. служба геодезии и картографии, 1993. — 160 с.
3. **Антипова Н. Л., Кожов М. М.** Материалы по сезонным и годовым колебаниям численности руководящих форм фитопланктона оз. Байкал // Труды Иркут. ун-та. Сер. биол. — 1953. — Т. 7, вып. 1–2. — С. 63–68.
4. **Измest'ева Л. Р., Павлов Б. К., Шимараева С. В.** Современное состояние экосистемы озера Байкал и тенденции его изменения // Тезисы докл. VIII съезда гидробиол. общества РАН. — Калининград, 2001. — Т. 1. — С. 12–14.
5. **Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Katz S. L., Dennis B., Silow E. A.** Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake — Lake Baikal, Siberia // *Global Change Biology*. — 2008. — Vol. 14. — P. 1947–1958.
6. **Мокрый А. В.** Структурная организация и динамика фитопланктонного сообщества пелагиали Южного Байкала: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Иркутск, 2011. — 22 с.
7. **Измest'ева Л. А., Шимараева С. В.** Многолетняя динамика численности диатомовых водорослей рода *Aulacoseira* в Байкале // Вестн. Иркут. с.-х. академии. — 2012. — Т. 48. — С. 73–80.
8. **Hampton S. E., Gray D. K., Izmet'eva L. A., Moore M. V., Ozersky T.** The rise and fall of plankton: long-term changes in the vertical distribution of Algae and Grazers in Lake Baikal, Siberia // *PLoS ONE*. — 2014. — Vol. 9, Iss. 2. — P. 1–10.
9. **Антипова Н. Л.** Сезонные и годовые изменения фитопланктона в озере Байкал // Труды Лимнол. ин-та СО АН СССР. — 1963. — Т. 2 (22), ч. 2. — С. 12–28.
10. **Поповская Г. И.** Динамика фитопланктона пелагиали // Биологическая продуктивность пелагиали Байкала и ее изменчивость. — Новосибирск: Наука, 1977. — С. 5–39.
11. **Popovskaya G. I.** Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal // *Aquatic Ecosystem Health and Management*. — 2000. — Vol. 3. — P. 215–225.
12. **Вотинцев К. К., Мещерякова А. И., Поповская Г. И.** Круговорот органического вещества в озере Байкал. — Новосибирск: Наука, 1975. — 189 с.
13. **Поповская Г. И., Генкал С. И., Лихошвай Е. В.** Диатомовые водоросли планктона озера Байкал: Атлас-определитель. — Новосибирск: Наука, 2011. — 192 с.
14. **Поповская Г. И.** Фитопланктон глубочайшего озера мира // Труды Зоол. ин-та АН СССР. — 1987. — Т. 172. — С. 107–115.
15. **Popovskaya G. I., Likhoshway Ye. V., Genkal S. I., Firsova A. D.** The role endemic diatom algae in the phytoplankton of Lake Baikal // *Hydrobiologia*. — 2006. — Vol. 568. — P. 87–94.
16. **Поповская Г. И.** Фито- и пикопланктон (ультрананопланктон) оз. Байкал // Тезисы докл. к III Всесоюз. науч. конф. «Проблемы экологии Прибайкалья». — Иркутск: Вост.-Сиб. правда, 1988. — С. 122.
17. **Поповская Г. И., Белых О. И.** Этапы изучения автотрофного пикопланктона озера Байкал // *Гидробиол. журн.* — 2003. — Т. 39, № 6. — С. 12–24.
18. **Fietz S., Kobanova G. I., Izmet'eva L. R., Nicklisch A.** Regional, vertical and seasonal distribution of phytoplankton and photosynthetic pigments in Lake Baikal // *Journ. Plankton Res.* — 2005. — Vol. 27, N 8. — P. 793–810.
19. **Белых О. И., Помазкина Г. В., Тихонова И. В., Томберг И. В.** Характеристика летнего фитопланктона и автотрофного пикопланктона озера Байкал // *Альгология*. — 2007. — Т. 17, № 3. — С. 380–396.
20. **Bondarenko N. A., Gusel'nikova N. E., Logacheva N. F., Pomazkina G. V.** Spatial distribution of phytoplankton in Baikal, spring 1991 // *Freshwater Biology*. — 1996. — Vol. 35, N 3. — P. 517–523.
21. **Бондаренко Н. А.** Экология и таксономическое разнообразие планктонных водорослей в озерах горных областей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. — Борок, 2009. — 46 с.
22. **Помазкина Г. В., Белых О. И., Домышева В. М., Сакирко М. В., Гнатовский Р. Ю.** Структура и динамика фитопланктона в Южном Байкале (Россия) // *Альгология*. — 2010. — Т. 20, № 1. — С. 56–72.
23. **Поповская Г. И., Усольцева М. В., Фирсова А. Д., Лихошвай Е. В.** Оценка состояния весеннего фитопланктона в озере Байкал // *География и природ. ресурсы*. — 2008. — № 1. — С. 83–88.
24. **Садчиков А. П.** Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство. — М.: Университет и школа, 2003. — 157 с.
25. **Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши** / Ред. Л. В. Боева. — Ростов н/Д: НОК, 2009. — Ч. 1. — 1044 с.
26. **Строганов Н. С., Бузинова Н. С.** Практическое руководство по гидрохимии. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. — С. 69–72.
27. **Киселёв И. А.** Планктон морей и континентальных водоемов. Т. 1: Вводные и общие вопросы планктологии. — Л.: Наука, 1969. — 658 с.
28. **Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем** / Ред. В. А. Абакумов. — СПб.: Гидрометеозиздат, 1992. — 318 с.
29. **Макарова И. В., Пичкилы Л. О.** К некоторым вопросам методики вычисления биомассы фитопланктона // *Ботан. журн.* — 1970. — Т. 55, № 10. — С. 1488–1494.

30. **Руководство** по определению биомассы видов фитопланктона пелагиали озера Байкал: Метод. пособие / Ред. Е. В. Лихошвай. — Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2011. — 51 с.
31. **Shimaraeva S. V., Izmestyeva L. A., Silow E.** Long-term dynamics of under-ice community of Baikal phytoplankton and climate change // 13th World Lake Conference: Abstract volume. — Wuhan, 2009. — P. 111.
32. **Silow E.** Lake Baikal as possible sentinel of the Climate Change // 13th World Lake Conference: Abstract volume. — Wuhan, 2009. — P. 109–110.
33. **Измestyева Л. Р., Шимараева С. В.** Многолетняя динамика численности диатомовых водорослей рода *Aulacoseira* в Байкале // Вестн. Иркут. с.-х. академии. — 2012. — Вып. 48. — С. 73–80.
34. **Шимараев М. Н.** Гидрометеорологические факторы и колебания численности байкальского планктона // Лимнология придельтовых пространств Байкала: Труды Лимнол. ин-та. — Л.: Наука, 1971. — С. 259–267.
35. **Сизова Л. Н., Шимараев М. Н., Куимова Л. Н.** Циркуляция атмосферы, климат и ледово-термические процессы на Байкале в последние 60 лет // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 2. — С. 74–82.
36. **Сакирко М. В., Домышева В. М., Белых О. И., Помазкина Г. В., Шимараев М. Н., Панченко М. В.** К оценке пространственной изменчивости направления потоков углекислого газа в разные гидрологические сезоны на озере Байкал // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22, № 6. — С. 596–699.
37. **Грачёв М. А.** О современном состоянии экологической системы озера Байкал. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — 156 с.
38. **Сорокикова Л. М., Синюкович В. И., Ходжер Т. В., Голобокова Л. П., Башенхаева Н. В., Нецветаева О. Г.** Поступление биогенных элементов и органических веществ в оз. Байкал с речными водами и атмосферными осадками // Метеорология и гидрология. — 2001. — № 4. — С. 78–86.
39. **Домышева В. М., Шимараев М. Н., Горбунова Л. А., Голобокова Л. П., Коровякова И. В., Жданов А. А., Цехановский В. В.** Кремний в озере Байкал // География и природ. ресурсы. — 1998. — № 4. — С. 73–81.
40. **Тарасова Е. Н., Мещерякова А. И.** Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1992. — 143 с.

Поступила в редакцию 10 декабря 2014 г.