УДК 551.3.051(282.256.341)

ПОТОКИ И СОСТАВ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДНОМ СТОЛБЕ ЮЖНОГО БАЙКАЛА (*с марта 2015 по март 2016 г.*) Е.Г. Вологина¹, М. Штурм², С.С. Воробьева³

¹Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

²Швейцарский федеральный институт науки и технологии окружающей среды, CH-8600, Дюбендорф, n/я 611, Швейцария

3Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, п/я 4199, Россия

Показаны результаты экспериментов с седиментационными ловушками, установленными в глубоководной части Южной котловины оз. Байкал (глубина 1366 м) с марта 2015 по март 2016 г. с целью изучения современного осадконакопления. Приведены данные по общим потокам осадочного вещества и потокам биогенных компонентов (SiO_{2био}, C_{орг} и N_{общ}) на разных глубинах водной толщи как в целом за год, так и в отдельные периоды. Выполнен диатомовый анализ полученных проб.

Общий поток осадочного материала составил в среднем 94.9 г/м²/год, средние величины потоков SiO_{26иог}, С_{орг} и N_{общ} соответственно равны 23.9, 11.6 и 0.94 г/м²/год. Отношение C/N (молярное), варьирующее от 11 до 21, указывает на преобладание аллохтонного материала почти во всех исследованных пробах из седиментационных ловушек.

Максимальные потоки осадочного вещества были зафиксированы с 20 июня по 20 июля 2015 г. Этот период соответствует цветению диатомей вида *Synedra acus*. Во всех пробах, отобранных за год, этот вид составляет более 94 % от общего содержания диатомей. Доминирование *Synedra acus*, отмечаемое в последние годы, в водной толще и в поверхностных донных осадках Южного Байкала мы связываем с потеплением климата.

Седиментационные ловушки, потоки осадочного вещества, биогенный кремнезем, органический углерод, общий азот, диатомеи, озеро Байкал

FLUXES AND COMPOSITION OF PARTICULATE MATTER IN THE WATER COLUMN OF SOUTH BAIKAL (between March 2015 and March 2016)

E.G. Vologina, M. Sturm, S.S. Vorob'eva

The paper provides the results of experiments with sediment traps in the deep-water part of the South Basin of Lake Baikal (depth of 1366 m), installed from March 2015 to March 2016 in order to study recent sedimentation within the lake. We present new data on total fluxes of particulate matter and fluxes of biogenic components (SiO_{2biog}, C_{org}, and N_{tot}) at different depths of the water column both for the whole year and for individual periods of the year. Diatom analyses were carried out for all obtained samples. The total flux of sedimentary material averaged 94.9 g/m²/y; the average fluxes of SiO_{2biog}, C_{org}, and N_{tot} were 23.9, 11.6, and 0.94 g/m²/y, respectively. The molar C/N ratio varies from 11 to 21 and indicates a predominance of allochthonous material in almost all samples. Maximum fluxes of sedimentary matter were recorded from 20 June to 20 July 2015. This period corresponds to the bloom of diatoms of the species *Synedra acus*. This species amounts to >94% of the total diatom content in all samples taken during this year. The recent predominance of *Synedra acus* in the water column, as well as in the surface bottom sediments of South Baikal, is probably due to the climate warming.

Sediment traps, fluxes of particulate matter, biogenic silica, organic carbon, total nitrogen, diatoms, Lake Baikal

введение

Значительные изменения климата, в частности установленное за последние десятилетия повышение глобальных и региональных температур поверхности Земли [Brohan et al., 2006; Wilson et al., 2007; National..., 2022], вызывают серьезную обеспокоенность ученых и общественности [Митрова и др., 2020; Santos, Bakhshoodeh, 2021]. В этой связи необходимо изучение окружающей среды, важной составляющей которого является исследование потоков и состава осадочного материала в толще водных бассейнов [Лисицын, 2004].

Исследование потоков осадочного вещества в оз. Байкал и в других водоемах стало возможным благодаря применению седиментационных ловушек [Sturm et al., 1982, 2015; Bloesch, Sturm, 1986; Гра-

© Вологина Е.Г. [∞], Штурм М., Воробьева С.С., 2023 [∞]e-mail: vologina@crust.irk.ru



Рис. 1. Схема оз. Байкал и местоположение буйковой станции (отмечена черной точкой на рисунке).

чев и др., 1996; Muller et al., 2005; Лисицын и др., 2014; Вологина, Штурм, 2017; и др.]. Их использование явилось настоящим прорывом в изучении современного осадконакопления.

Целью представляемой работы является исследование современной седиментации в оз. Байкал в условиях изменяющегося климата. Исследования проводились в рамках соглашения о научном сотрудничестве по изучению лимнологии оз. Байкал между Институтом земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН), Институтом прикладной физики Иркутского государственного университета (НИИПФ ИГУ) и Швейцарским федеральным институтом науки и технологии окружающей среды (EAWAG).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для работы послужили пробы осадочного вещества, отобранного на разных глубинах водной толщи оз. Байкал с помощью двухстаканных (интегральных) и автоматизированных седиментационных ловушек (март 2015 г.—март 2016 г.). Ловушки были размещены на притопленной буйковой станции, расположенной в четырех километрах от северного берега Южной котловины озера в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа (рис. 1). Координаты станции — 51°46.076' с.ш., 104°24.948' в.д., глубина озера в точке исследования 1366 м.

Двухстаканные (интегральные) ловушки (EAWAG-130) состоят из двух цилиндрических трубок длиной 100 см и диаметром 9 см, в нижней части которых расположены съемные стаканы объемом 700 мл каждый. В стаканах имеются отверстия для слива воды после подъема ловушек, при отборе проб эти отверстия закрыты заглушками. Трубки и стаканы изготовлены из Acrylic® стекла и установлены в съемном держателе. Отбор осадочного вещества этим типом ловушек осуществлялся весь период исследования.

*	e				ĩ				<u>^</u>
Номер	Глубина, м	C _{opr}	N _{общ}	SiO _{2биог}	C/N*	Общий поток	Поток С _{орг}	Поток N _{общ}	Поток SiO _{2биог}
ловушки			%			г/м²/год			
Z1	100	31.3	1.75	12.6	21	98.0	30.7	1.72	12.3
Z2	200	17.0	1.18	20.6	17	106	18.1	1.25	21.9
Z3	300	9.59	0.95	28.3	12	90.1	8.67	0.86	25.6
Z4	400	9.46	0.88	28.7	13	82.4	7.80	0.72	23.6
Z5	600	12.4	1.03	27.0	14	98.4	12.2	1.02	26.5
Z6	700	9.15	0.87	29.5	12	83.6	7.65	0.73	24.7
Z7	900	8.37	0.85	30.5	11	90.4	7.56	0.77	27.6
Z8	1100	7.89	0.81	28.2	11	92.8	7.33	0.75	26.2
Z9	1300	8.35	0.84	27.6	12	100	8.38	0.84	27.7
Z10	1350	6.96	0.73	21.5	11	106	7.39	0.77	22.8
Среднее		12.0	0.99	25.5	13	94.9	11.6	0.94	23.9
Минимальное		6.96	0.73	12.6	11	82.4	7.33	0.72	12.3
Максимальное		31.3	1.75	30.5	21	106	30.7	1.72	27.7

Таблица 1. Содержания биогенных элементов, С/N отношение и потоки осадочного вещества, отобранного двухстаканными ловушками с разных глубин водной толщи с 17 марта 2015 г. по 5 марта 2016 г.

*Молярное.

		Π	Общий поток, мг/м ² /сут			
Период отбора проб	Номер пробы	продолжительность отбора проб, количество дней	Ловушка S-1 (600 м)	Ловушка S-2 (1350 м)		
17.03.15—16.04.15	1	30	1.73	81.1		
16.04.15-11.05.15	2	25	8.80	90.1		
11.05.15-05.06.15	3	25	1.44	92.2		
05.06.15-20.06.15	4	15	258	125		
20.06.15-05.07.15	5	15	902	736		
05.07.15-20.07.15	6	15	1118	2233		
20.07.15-04.08.15	7	15	235	1186		
04.08.15-25.08.15	8	21	41.8	729		
25.08.15-21.09.15	9	27	4.37	291		
21.09.15-15.11.15	10	55	13.1	232		
15.11.15-09.01.16	11	55	33.7	187		
09.01.16-04.03.16	12	55	7.64	179		
Среднее		219	513			
Минимальное		1.44	81.1			
Максимальное		1118	2233			

Таблица 2. Общие потоки осадочного вещества, отобранного автоматизированными ловушками на глубинах 600 и 1350 м с 17 марта 2015 г. по 4 марта 2016 г.

Автоматизированные ловушки (TECHNICAP®–PPS4/3) состоят из воронки, в нижней части которой расположена карусель с двенадцатью пластиковыми стаканами объемом 250 мл каждый. Карусель управляется микропроцессорным шаговым двигателем. Время отбора проб может быть запрограммировано отдельно для каждого стакана от 1 ч до 18 мес. Ловушки имеют высоту 120 см и активную площадь 500 см².

Двухстаканные цилиндрические ловушки (Z1, Z2,... Z10; всего 10 штук) были установлены на глубинах 100, 200, 300, 400, 600, 700, 900, 1100, 1300 и 1350 м (табл. 1). Отбор проб проводился с 17 марта 2015 г. по 5 марта 2016 г. (354 дня). Автоматизированные ловушки были размещены на глубинах 600 м (ловушка S-1) и 1350 м (ловушка S-2). Периоды отбора проб автоматизированными ловушками приведены в табл. 2. При этом продолжительность отбора изменялась от 15 до 55 дней с учетом времени цветения диатомей (ловушки сменялись чаще поздней весной, летом и ранней осенью).

Отобранный материал высушивали посредством вымораживания (freeze-dried) на приборе FD AL-PHA и взвешивали на аналитических весах. Качественный состав осадочного вещества определялся в смер-слайдах под световым микроскопом марки SK14 (увел. ×100).

В полученных пробах измерены содержания органического углерода (C_{орг}) и общего азота (N_{общ}) на CNS-газохроматографе «НЕКАТЕСН Евро AE» в Швейцарском федеральном институте науки и технологии окружающей среды. В этом же институте выполнены определения концентраций биогенного кремнезема (SiO_{2бног}) методом, описанным в [Ohlendorf, Sturm, 2008]. Рассчитаны общие потоки осадочного вещества и потоки биогенных компонентов на разных глубинах водной толщи в граммах на 1 м² в год (г/м²/год) для двухстаканных ловушек и в миллиграммах на квадратный метр в сутки (мг/м²/сут) для автоматизированных ловушек.

Проведен диатомовый анализ проб, отобранных двухстаканными ловушками, по методикам, предложенным ранее [Грачев и др., 1997].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные, полученные для двухстаканных ловушек. Описание смер-слайдов показало, что в пробах присутствует как терригенный, так и биогенный материал. Терригенная часть представлена пелитом, единичными минеральными зернами алевритовой размерности и частицами пыльцы. Биогенный материал состоит в основном из створок диатомей рода *Synedra*. Также присутствуют створки родов *Cyclotella* и, реже, *Aulacoseira*. В некоторых образцах наблюдаются остатки рачков-бокоплавов (род *Gammarus*) и спикулы губок.

Содержания органического углерода варьируют от 6.96 до 31.3 % при средней величине 12 % (см. табл. 1). При этом максимальное значение отмечается в самой верхней ловушке на глубине 100 м. В ловушке, расположенной на 200 м, Сорг составляет 17.0 % и далее снижается с глубиной. Минимальная



Рис. 2. Потоки биогенных компонентов (SiO_{2биог}, C_{орг}, N_{обш}) и общие потоки осадочного вещества на разных глубинах Южной котловины Байкала в период с 17 марта 2015 г. по 5 марта 2016 г.

концентрация C_{opr} (6.96 %) соответствует глубине 1350 м. Общий азот изменяется от 0.73 до 1.75 % и в среднем составляет 0.99 %. Подобно C_{opr} , повышенные содержания $N_{oбщ}$ отмечаются на глубинах 100 и 200 м (1.75 и 1.18 % соответственно), а минимальная величина (0.73 %) — на 1350 м (см. табл. 1).

Концентрация биогенного кремнезема, источником которого служат створки диатомовых водорослей, цисты золотистых водорослей и спикулы губок, в среднем составляет 25.5 %, минимальные и максимальные значения соответственно равны 12.6 и 30.5 % (см. табл. 1). Таким образом, за исключением самой верхней ловушки (100 м), содержания SiO_{2биог} выше концентраций С_{орг} и N_{общ} во всех пробах.

Отношение C/N (молярное) изменяется от 11 до 21 и в среднем равно 13. Максимальные значения этого параметра соответствуют ловушкам Z1 и Z2 на глубинах 100 и 200 м соответственно (см. табл. 1). В целом C/N за исследованный период выше, чем этот показатель в пробах, отобранных с

11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г. (от 9.4 до 11.0) и с 8 марта 2000 по 8 марта 2001 г. (от 9.1 до 16.7) [Вологина, Штурм, 2017]. Известно, что отношение С/N характеризует генезис органической составляющей осадков [Выхристюк, 1980; Durga Madhab Mahapatra et al., 2011]. Таким образом, в пробах, отобранных с марта 2015 г. по март 2016 г., аллохтонный материал в целом преобладает.

Общий поток осадочного вещества изменяется от 82.4 до 106 г/м²/год и в среднем составляет 94.9 г/м²/год. При этом максимальные значения (106 г/м²/год) соответствуют глубинам 200 и 1350 м (см. табл. 1; рис. 2). Повышенный поток в самой нижней ловушке (1350 м), скорей всего, связан с взмучиванием поверхностных илов на границе раздела осадок—вода. В целом общий поток материала за изученный период соизмерим с данными, полученными для этой точки исследования в 1999 г., когда этот по-казатель изменялся от 73.7 до 146 г/м²/год. В 2000 г. общий поток вещества здесь был значительно выше (126—230 г/м²/год при среднем значении 161 г/м²/год) [Вологина, Штурм, 2017], так как этот год, согласно [Евстафьев и др., 2010; Jewson, Granin, 2014], был «мелозирным годом» с высокой урожайностью диатомей рода *Melosira* (в настоящее время переименован в род *Aulacoseira*). В 2013 г. общий поток осадочного вещества варьировал от 46.6 до 66.1 г/м²/год при среднем значении 56.8 г/м²/год, а в 2014 г. этот показатель был максимален — от 161 до 237 г/м²/год при средней величине 213 г/м²/год [Вологина и др., 2019]. Таким образом, в разные годы величина общего потока вещества значительно изменялась, что, в частности, связано с различной урожайностью диатомей [Кожова, 1961; Кожов, 1962; Антипова, 1963; Евстафьев и др., 2010], которая, в свою очередь, обусловлена цикличностью их цветения [Евстафьев, Бондаренко, 2000; Bondarenko, Evstafyev, 2006].

Кроме того, общие потоки материала могут значительно отличаться в разных районах Байкала. Так, в Северном Байкале с 2001 по 2002 г. зафиксирован достаточно низкий поток осадочного вещества (63—94 г/м²/год) сравнительно с Южной котловиной озера (126—132 г/м²/год) [Muller et al., 2005], что, очевидно, связано с более низкой биологической продуктивностью в этой части Байкала [Домышева и др., 1998].

На рисунке 2 также показано, как изменяются потоки биогенных компонентов. Поток SiO_{2бног} значительно выше, чем потоки C_{opr} и N_{ofut} (исключение составляет лишь проба, отобранная на 100 м). Он изменяется от 12.3 до 27.7 г/м²/год и в среднем составляет 23.9 г/м²/год. Потоки C_{opr} и N_{ofut} варьируют от 7.33 до 30.68 г/м²/год при средней величине 11.6 г/м²/год и от 0.72 до 1.72 г/м²/год при среднем



Рис. 3. Содержание и состав наиболее часто встречаемых микрофоссилий в пробах, отобранных двухстаканными ловушками.

значении 0.94 г/м²/год соответственно (см. табл. 1; рис. 2). Таким образом, общий поток осадочного вещества в седиментационных ловушках определяется главным образом потоком SiO_{2биог}, в меньшей степени — потоком С_{орг}, незначительная доля приходится на поток N_{общ}. Такая же закономерность фиксировалась нами и ранее [Вологина, Штурм, 2017]. Величина потоков биогенных компонентов в разные годы также довольно сильно различается. Так, в 2000 г. отмечались повышенные потоки SiO_{2биог}, С_{орг} и N_{общ} по сравнению с 1999 г. и с 2015 г. Тогда средние их значения составляли соответственно 81.9, 13.0 и 1.3. г/м²/год [Вологина, Штурм, 2017]. Это, как уже было отмечено выше, объясняется тем, что 2000 г. являлся «мелозирным годом».

Результаты диатомового анализа проб, отобранных двухстаканными ловушками, приведены на рис. 3 и в таблицах 3 и 4. Всего зарегистрировано 96 видов и разновидностей диатомовых водорослей, включающих 26 планктонных таксонов и 70 — бентосных. Также отмечались цисты золотистых водорослей, спикулы губок и пыльца растений. Планктонные виды доминировали (до 99.8 %), содержание бентосных не превысило 0.2 % от общей численности (см. рис. 3, табл. 3). Планктонные диатомеи представлены 10 родами и 5 семействами (см. табл. 4). Их содержание изменялось от 912 до 2798 млн ств./г (см. рис. 3; табл. 3). Во всех пробах преобладал вид *Synedra acus* subsp. *radians* — 870—2739 млн ств./г (94.5—97.9 % от общей численности). Виды *Aulacoseira baicalensis, A. islandica* со спорами, *Cyclotella minuta, C. baicalensis* и прочие водоросли (21 таксон) составляли незначительную долю от общей численности (0.02—0.42 %, 0.16—0.38 %, 1.75—4.17 %, 0.02—0.04 % и 0.01—0.23 % соответственно). Бентосные диатомеи представлены 28 родами и 12 семействами (см. табл. 4), количество створок в ловушках изменялось от 3.11 до 7.65 млн ств./г (см. рис. 3, табл. 3). В водном столбе под квадратным метром поверхности озера численность планктонных диатомей достигла 851 млрд кл./м², основная часть кото-

Harran		Преобладающие диатомеи, млн ств./г									Другие микрофоссилии, млн экз./г		
ловуш- ки	Глуби- на, м	Synedra acus	Aulaco- seira baica- lensis	Aulaco- seira islan- dica	Cyclo- tella minuta	Cyclo- tella baica- lensis	Про- чие	Планк- тон	Бентос	Общая числен- ность	Цисты	Спику- лы	Пыльца
Z1	100	869.51	0.153	1.861	38.365	0.382	2.14	912.45	7.65	920.1	19.12	0.051	0.82
Z2	200	2185.24	0.387	3.62	45.583	0.746	1.03	2236.61	5.06	2241.67	16.71	0.083	1.24
Z3	300	2290.18	0.376	4.776	49.82	0.423	0.92	2346.49	4.1	2350.59	23.5	0.047	1.13
Z4	400	1776.06	0.728	3.427	37.488	0.45	0.58	1818.74	5.49	1824.23	20.14	0.075	1.18
Z5	600	2502.72	0.563	3.992	44.779	0.64	0.22	2552.94	4.31	2557.25	17.66	0.026	1.07
Z6	700	2123.17	0.957	4.218	42.618	0.478	0.33	2171.77	4.09	2175.86	17.29	0.098	0.83
Z7	900	2739.38	1.057	4.463	51.682	0.799	0.38	2797.76	3.74	2801.5	19.97	0.047	0.96
Z8	1100	2022.12	1.33	4.924	49.487	0.724	0.43	2079.01	3.11	2082.12	19.8	0.085	0.84
Z9	1300	2524.36	3.261	6.733	48.2813	0.809	0.7	2584.15	3.84	2587.99	19.3	0.078	0.99
Z10	1350	2510.39	11.05	9.974	75.977	0.856	0.7	2608.95	3.72	2612.67	23.48	0.083	0.63

Таблица 3. Состав и содержание микрофоссилий в пробах, отобранных двухстаканными ловушками с 17 марта 2015 г. по 5 марта 2016 г.

рых представлена видом *Synedra acus* subsp. *radians* (829 млрд кл./м²). Содержание бентосных видов составило 1.74 млрд кл./м². Суммарная численность диатомей — 853 млрд кл./м². Количество цист золотистых водорослей равно 15.2 млрд экз./м², спикул губок — 52 млн экз./м², пыльцы растений — 747 млн экз./м². Следует отметить, что спикулы губок отмечались во всех изученных пробах (см. табл. 3). Их наличие, вероятно, связано с действием течений. Этому также может способствовать взвешивающий эффект, влияющий на поведение частиц в воде [Соколов, Конюхов, 1986].

В 2000 г. в осадочном материале из седиментационных ловушек доминировал род *Aulacoseira* [Вологина, Штурм, 2017]. Виды этого рода являются планктонными и холоднолюбивыми [Вотинцев и др., 1975; Черняева и др., 2008]. В пробах, отобранных седиментационными ловушками в 2013 г., преобладающими видами были *Aulacoseira* и *Synedra*, а в 2014 г. — только *Synedra* [Вологина и др., 2019]. Доминирование рода *Synedra* было отмечено как в осадочном материале водной толщи, так и в поверхностных донных осадках Южной котловины озера [Roberts et al., 2018; Вологина и др., 2019; Bondarenko et al., 2020; Vologina et al., 2020]. Вероятно, это связано с более теплыми климатическими условиями их накопления. Этот вывод отчасти подтверждается результатами изучения донных отложений, вскрытых буровым керном BDP-96 на подводном Академическом хребте оз. Байкал. В изученном разрезе пики численности *Synedra* приурочены к изотопным стадиям более теплых периодов [Хурсевич и др., 2001].

По данным метеостанций, расположенных на берегах Южного и Северного Байкала, с 1950 по 2017 г. установлено повышение среднегодовых температур воздуха [Шимараев и др., 2019]. Подобная картина наблюдается и для температуры байкальской воды. В период с 1970 по 2016 г. значения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала варьировали в отдельные годы, однако в целом отмечается тренд на их повышение [Шимараев, Троицкая, 2018; Swann et al., 2020]. Потепление климата способствует развитию эвтрофикации оз. Байкал [Izmest'eva et al., 2016; Потемкина и др., 2018] и является, вероятно, причиной смены доминирующих диатомей.

Результаты, полученные для автоматизированных ловушек. Общий поток осадочного вещества в верхней ловушке S-1 (гл. 600 м) изменяется от 1.44 до 1118 мг/м²/сут при среднем значении 219 мг/ M^2 /сут (см. табл. 2). Минимальные значения общего потока приходятся на период ледостава — 1.73 мг/ M^2 /сут с 17 марта до 16 апреля 2015 г. и 7.64 мг/м²/сут с 9 января до 4 марта 2016 г., а также с 16 апреля по 11 мая (8.80 мг/м²/сут) и с 11 мая по 5 июня 2015 г. (1.44 мг/м²/сут) (см. табл. 2; рис. 4). С 5 по 20 июня поток составляет 258 мг/м²/сут, с 20 июня до 5 июля он возрастает до 902 мг/м²/сут и достигает максимальной величины с 5 по 20 июля — 1118 мг/м²/сут (см. табл. 2; рис. 4). Далее происходит уменьшение потока — 235 мг/м²/сут с 20 июля по 4 августа, 41.8 мг/м²/сут с 4 по 25 августа, 4.37 мг/м²/сут с 25 августа по 21 сентября. С 21 сентября по 15 ноября 2015 г. и с 15 ноября 2015 г. по 19 января 2016 г. также фиксируются невысокие значения общего потока (13.1 и 33.7 мг/м²/сут соответственно).

В нижней ловушке S-2 (гл. 1350 м) общий поток варьирует от 81.1 до 2233 мг/м²/сут и в среднем составляет 513 мг/м²/сут. Он несколько ниже, чем в верхней ловушке с 5 по 20 июня (125 мг/м²/сут) и с 20 июня до 5 июля (736 мг/м²/сут). В остальные периоды отбора проб величина потока на глубине 1350 м значительно выше, чем на глубине 600 м (см. табл. 2; рис. 4). Самый большой пик (2233 мг/м²/сут) сут) соответствует периоду с 5 по 20 июля. С 20 июля по 4 августа и с 4 по 25 августа потоки также до-

Таблица 4.

Состав диатомей в пробах, отобранных двухстаканными ловушками с 17 марта 2015 г. по 5 марта 2016 г.

Семейство Stephanodiscus — 6 видов: Stephanodiscus meyeri, St. minutulus, St. makarovae, St. hantzschii, St. inconspicuous, St. agassizensis 2. Pog Cyclotella — 5 видов: Stephanodiscus meyeri, St. minutulus, St. makarovae, St. hantzschii, St. inconspicuous, St. agassizensis 2. Pog Cyclotella — 5 видов: Cyclotella minuta, C. ocellata 3. Pog Discostella — 1 вид: Discostella pseudostelligera 4. Pog Cyclostephanos — 1 вид: Cyclostephanos dubius 5. Pog Pliocaenicus — 1 вид: Cyclostephanos dubius 5. Pog Pliocaenicus — 1 вид: Cyclostephanos dubius 5. Pog Pliocaenicus — 1 вид: Discostella pseudostatus Ceseйство Aulacosiraceae — 1 pog 1. Pog Achmanthaceae — 2 poga 1. Pog Cymbella — 5 видов: 2. Pog Amphonea — 5 видов: 2. Pog Didymosphaemia — 2 вида Ceseйство Aulacosiraceae — 1 pog 1. Pog Surjeella — 5 видов: 2. Pog Meridion — 1 вид 2. Pog Asterionella — 1 вид: Synedra acus subsp. radians, S. ulna; 2. Pog Asterionella — 1 вид: Sterionella formosa Ceseйство Paraliaceae — 1 pog 1. Pog Surjeellaceae — 2 poga 1. Pog Surjeellaceae — 1 pog 1. Pog Naviculaceae — 6 pogob 1. Pog Naviculaceae — 6 pogob 1. Pog Surjeellaceae — 1 pog 1. Pog Eunotaceae — 1 pog 1. Pog Surjeels — 1 вид Cesefictros Rhogabloaecae — 1 pog 1. Pog Rhoicosphenia — 1 вид Cesefictros Rhogableaecae — 1 pog 1. Pog Rhoicosphenia — 1 вид	Планктонные диатомеи	Бентосные диатомеи				
Семейство Rhoicospheniaceae — 1 род 1. Род <i>Rhoicosphenia</i> — 1 вид Семейство Rhopalodiaceae — 1 род	Семейство Stephanodiscaceae — 5 родов 1. Род Stephanodiscus — 6 видов: Stephanodiscus meyeri, St. minutulus, St. makarovae, St. hantzschii, St. inconspicuous, St. agassizensis 2. Род Cyclotella — 5 видов: Cyclotella minuta, C. baicalensis, C. antiqua, C. meneghiniana, C. ocellata 3. Род Discostella — 1 вид: Discostella pseudostelligera 4. Род Cyclostephanos — 1 вид: Cyclostephanos dubius 5. Род Pliocaenicus — 1 вид: Pliocaenicus costatus Семейство Aulacosiraceae — 1 род 1. Род Aulacoseira — 6 видов: Aulacoseira baicalensis, A. islandica, A. ambigua, A. granulata, A. subarctica, A. sp. Семейство Fragilariaceae — 2 рода 1. Род Synedra — 3 вида: Synedra acus subsp. radians, S. ulna var. danica, S. ulna; 2. Род Asterionella — 1 вид: Asterionella formosa Семейство Paraliaceae — 1 род 1. Род Ellerbeckia — 1 вид: Ellerbeckia arenaria var. teres Семейство Melosiraceae — 1 род 1. Род Melosira — 1 вид: Melosira varians	Семейство Achnanthaceae — 3 рода 1. Род Achnanthes — 5 видов; 2. Род Cocconeis — 4 вида; 3. Род Eucocconeis — 2 вида Семейство Cymbellaceae — 2 рода 1. Род Cymbella — 5 видов; 2. Род Amphora — 3 вида Семейство Gomphonemaceae — 2 рода 1. Род Gomphonema — 5 видов 2. Род Didymosphaenia — 2 вида Семейство Diatomaceae — 2 рода 1. Род Diatoma — 1 вид; 2. Род Meridion — 1 вид Семейство Nitzschiaceae — 2 рода 1. Род Nitzschia — 2 вида; 2. Род Hantzschia — 1 вид Семейство Epithemaceae — 2 рода 1. Род Epithemia — 3 вида; 2. Род Denticula — 1 вид Семейство Epithemaceae — 2 рода 1. Род Epithemia — 3 вида; 2. Род Denticula — 1 вид Семейство Surirellaceae — 2 рода 1. Род Surirella — 1 вид; 2. Род Cymatopleura — 1 вид Семейство Fragilariaceae — 4 рода 1. Род Fragilaria — 6 видов; 2. Род Opephora — 1 вид; 3. Род Hannaea — 2 вида; 4. Род Synedra — 3 вида Семейство Naviculaceae — 6 родов 1. Род Navicula — 4 вида; 2. Род Diploneis — 2 вида 3. Род Nadium — 2 вида; 4. Род Caloneis — 2 вида 3. Род Naidium — 2 вида; 4. Род Caloneis — 2 вида 5. Род Stauroneis — 2 вида; 6. Род Caloneis — 2 вида Семейство Eunotiaceae — 1 род 1. Род Eunotia — 3 вида				
1. Род <i>Кhopalodia</i> — 2 вида		Семейство Rhoicospheniaceae — 1 род 1. Род <i>Rhoicosphenia</i> — 1 вид Семейство Rhopalodiaceae — 1 род 1. Род <i>Rhopalodia</i> — 2 вида				

статочно велики (1186 и 729 мг/м²/сут соответственно). Затем происходит уменьшение этого параметра. В целом потоки на глубинах 600 и 1350 м хорошо коррелируют между собой. Как и в верхней ловушке, минимальные значения общего потока в нижней ловушке соответствуют периоду ледостава и периоду с 16 апреля по 5 июня 2015 г. (см. табл. 2; рис. 4).

Максимальные потоки осадочного вещества, зафиксированные на глубинах 600 и 1350 м с 20 июня по 20 июля 2015 г. приходятся на период массового развития диатомей вида *Synedra acus*. Просмотр смер-слайдов показывает, что в пробах за этот период преобладают диатомеи рода *Synedra*, также встречаются створки *Cyclotella*, *Aulacoseira*, бентосных. Терригенная составляющая представлена пелитом и единичными зернами пыльцы. Некоторое незначительное повышение потоков в ловушке S-1 в осеннезимний период (с 21 сентября 2015 г. по 9 января 2016 г.), вероятно, связано с развитием диатомей вида *Cyclotella minuta* [Jewson et al., 2015]. Изменение состава и величины вертикальных потоков осадочного материала в разные сезоны отмечалось ранее как в Байкале [Грачев и др., 1996; Mackay et al., 2000; Вологина, Штурм, 2017], так и в других водных бассейнах [Lignell et al., 1993; Olli et al., 2002; Ильяш и др., 2013]. В целом хорошая корреляция данных между ловушками S-1 и S-2, расположенными на расстоянии 750 м между собой, связана, на наш взгляд, с высокими темпами осаждения диатомей. Установлено, что скорость опускания агрегированных клеток диатомовых водорослей в период их цветения может достигать 60 м в день [Mackay et al., 2000; Ryves et al., 2003; Sturm et al., 2015].

Данные по содержаниям и потокам биогенных компонентов в автоматизированных ловушках приведены в табл. 5 и на рис. 4. Следует отметить, что в ряде проб, отобранных на глубине 600 м, SiO_{2биог}, C_{орг} и N_{общ} определены не были из-за недостаточного количества материала.

В большинстве проанализированных проб из ловушки S-1 преобладает SiO_{2биог} (от 2.62 до 37.9 % при средней величине 23.6 %). Содержания C_{opr} варьируют от 4.90 до 33.0 % и в среднем равны 17.6 %.



Рис. 4. Потоки биогенных компонентов (SiO_{2бног}, C_{орг}, N_{общ}) и общие потоки осадочного вещества (в мг/м²/сут), отобранного автоматизированными ловушками S-1 и S-2 в Южном Байкале на глубинах 600 и 1350 м соответственно с 17 марта 2015 г. по 4 марта 2016 г.

Концентрация $N_{oбщ}$ невелика и составляет 0.57—4.01 % (см. табл. 5). В ловушке S-2 в подавляющем большинстве проб также преобладает биогенный кремнезем. Содержание SiO_{2биог} изменяется от 12.8 до 31.7 % и в среднем равно 21.5 %. С_{орг} составляет 5.65—22.6 % при средней величине 10.4 %. Количество $N_{oбщ}$, как и в ловушке S-1, незначительно — 0.60—1.59 % (см. табл. 5). Отношение С/N (молярное) изменяется от 9 до 16 в ловушке S-1 и от 11 до 19 в ловушке S-2 и в среднем составляет 12 и 13 соответственно, что аналогично данным, полученным для двухстаканных ловушек (см. табл. 1).

Общий поток осадочного вещества в автоматизированных ловушках определяется главным образом потоком SiO_{2биог} (см. рис. 3), который изменяется в широких пределах — от 1.55 до 414 мг/м²/сут в ловушке S-1 и от 11.0 до 621 мг/м²/сут в ловушке S-2 (см. табл. 5). Максимальные значения в верхней ловушке соответствуют периодам с 20 июня по 5 июля и с 5 июля по 20 июля, когда происходило массовое цветение диатомей вида *Synedra acus*. В нижней ловушке повышенный поток SiO_{2биог} фиксируется с 5 июля по 20 июля и с 20 июля по 4 августа (см. табл. 2, 5). Таким образом, происходит некоторое «запаздывание» для нижней ловушки, связанное, вероятно, со временем, необходимым для опускания диатомей.

Номера проб*	С _{орг} N _{общ} SiO _{2биог}		C/N	Поток С	Поток N-би	Поток SiO25000					
помера проо		%		молярное	мг/м2/су/т						
Ловушка S-1 (600 м)											
1		—	—	_		—	_				
2		—	—				_				
3			—	_	_		_				
4	29.6	4.01	2.62	9	76.3	10.4	6.77				
5	6.74	0.74	33.4	11	60.7	6.65	301				
6	5.93	0.63	37.0	11	66.3	7.00	414				
7	4.90	0.57	31.5	10	11.5	1.33	73.8				
8	5.59	0.69	32.3	9	2.34	0.29	13.5				
9			—				_				
10	33.0	2.44		16	4.32	0.32	_				
11	27.7	2.02	4.59	16	9.34	0.68	1.55				
12	27.1	3.02	—	10	2.07	0.23	_				
Среднее	17.6	1.76	23.6	12	29.1	3.36	135				
Минимальное	4.90	0.57	2.62	9	2.07	0.23	1.55				
Максимальное	33.0	4.01	37.9	16	76.3	10.4	414				
			Ловушка S-2	(1350 м)		•					
1	19.0	1.18	13.5	19	15.4	0.96	11.0				
2	10.5	0.99	13.7	12	9.48	0.90	12.3				
3	10.7	0.91	12.8	14	9.82	0.84	11.8				
4	10.6	0.94	15.9	13	13.2	1.17	20.0				
5	22.6	1.59	15.7	17	167	11.7	116				
6	6.38	0.63	27.8	12	142	14.0	621				
7	5.65	0.60	30.5	11	67.0	7.16	362				
8	5.89	0.65	31.7	11	42.9	4.72	231				
9	6.12	0.68	28.7	11	17.8	1.97	83.4				
10	8.76	0.88	23.7	12	20.3	2.04	54.8				
11	8.98	0.98	24.8	11	16.8	1.83	46.3				
12	9.66	0.97	19.3	12	17.3	1.74	34.7				
Среднее	10.4	0.92	21.5	13	44.9	4.08	133.6				
Минимальное	5.65	0.60	12.8	11	9.48	0.84	11.0				
Максимальное	22.6	1.59	31.7	19	167	14.0	621				

Таблица 5. Содержания и потоки биогенных компонентов, С/N отношение в пробах, отобранных автоматизированными ловушками на глубинах 600 и 1350 м с 17 марта 2015 г. по 4 марта 2016 г.

*Периоды отбора проб — см. табл. 2.

Потоки C_{opr} и N_{o6ut} в целом хорошо коррелируют между собой, а также с общим потоком осадочного материала и потоком SiO_{26ног} (см. рис. 4). На глубине 600 м поток C_{opr} варьирует от 2.07 до 76.3 мг/м²/ сут и достигает максимальных значений в период с 5 по 20 июня и с 20 июня по 20 июля 2015 г. Поток N_{o6ut} на этой глубине составляет 0.23—10.4 мг/м²/сут, при этом максимальные величины также характерны для периодов наблюдения с 5 по 20 июня и с 20 июня по 20 июля 2015 г. На глубине 1350 м поток C_{opr} изменяется от 9.48 до 167 мг/м²/сут, а поток N_{o6ut} —от 0.84 до 14.0 мг/м²/сут, значительно превышая эти значения для верхней ловушки (см. рис. 4, табл. 5). Пики потоков этих компонентов зафиксированы с 20 июня по 20 июля 2015 г., т. е. как и в случае для потоков SiO_{26ног}. Таким образом, происходит сдвиг пиков в нижней ловушке за счет времени, необходимого для опускания осадочного материала с глубины 600 до 1350 м. С 20 июля до 4 августа и затем до 25 августа 2015 г. происходит снижение потоков C_{opr} и N_{o6ut} . Минимальные значения отмечаются осенью, зимой и ранней весной (см. рис. 4, табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты с седиментационными ловушками с марта 2015 г. по март 2016 г. позволили получить данные по потокам и составу осадочного материала в водной толще Южного Байкала. Отобранные

пробы состоят из терригенного и биогенного материала. В составе биогенной части большинства проб преобладает SiO_{2биог}. Содержания С_{орг} и N_{общ} достигают максимальных значений на глубинах 100 и 200 м и затем снижаются с глубиной. Общий поток осадочного вещества в среднем составляет 94.9 г/м²/ год. Во всех пробах, отобранных двухстаканными ловушками, в составе створок диатомовых водорослей доминирует *Synedra acus* (более 94 % от общего содержания диатомей). Мы связываем этот факт с потеплением климата. Результаты, полученные для автоматизированных ловушек, свидетельствуют о наличии максимального потока осадочного вещества в период с 20 июня по 20 июля 2015 г., который соответствует цветению диатомей вида *Synedra acus*.

Авторы искренне благодарны д.ф.-м.н. профессору Н.М. Будневу и участникам экспедиции НИИПФ ИГУ за неоценимую помощь в проведении работ. Мы глубоко признательны И. Брюннер (EAWAG), Е.Г. Поляковой (ИЗК СО РАН) и Т.О. Железняковой (ЛИН СО РАН) за аналитическую работу и помощь в подготовке проб для анализов, а также рецензентам за конструктивные замечания и рекомендации, позволившие улучшить содержание статьи.

Исследование выполнено благодаря долгосрочному международному сотрудничеству при поддержке EAWAG (проект № 85145); кооперации между EAWAG, ИЗК СО РАН и НИИПФ ИГУ и в рамках государственного задания ИЗК СО РАН (№ 0346-2019-0005). В работе частично задействовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Антипова Н.Л. О колебаниях численности видов мелозиры в планктоне озера Байкал // Тр. Всесоюз. гидробиологического общества, 1963, т. 13, с. 235—241.

Вологина Е.Г., Штурм М. Потоки осадочного вещества в Южном Байкале. Результаты экспериментов с седиментационными ловушками // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (9), с. 1314—1323.

Вологина Е.Г., Штурм М., Буднев Н.М. Результаты экспериментов с седиментационными ловушками в Южном Байкале с марта 2013 г. по март 2015 г. // Материалы XXIII Международной научной конференции (школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». Москва, 18—22 ноября 2019 г. М., ИО РАН, 2019, т. 3, с. 20—24.

Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск, Наука, 1975, 189 с.

Выхристюк Л.А. Органическое вещество донных осадков Байкала. Новосибирск, Наука, 1980, 80 с.

Грачев М.А., Лихошвай Е.В., Колман С.М., Кузьмина А.Е. Измерение потока седиментации диатомей в озере Байкал с помощью автоматических ловушек // ДАН, 1996, т. 350 (1), с. 87—91.

Грачев М.А., Лихошвай Е.В., Воробьева С.С., Хлыстов О.М., Безрукова Е.В., Вейнберг Е.В., Гольдберг Е.Л., Гранина Л.З., Корнакова Е.Г., Лазо Ф.И., Левина О.В., Летунова П.П., Отинов П.В., Пирог В.В., Федотов А.П., Яскевич С.А., Бобров В.А., Сухоруков Ф.В., Резчиков В.И., Федорин М.А., Золотарев К.В., Кравчинский В.А. Сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена в осадках озера Байкал // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (5), с. 957—980.

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 природные ресурсы, 1998, № 4, с. 73—81.

Евстафьев В.К., Бондаренко Н.А. Модель «стоячих волн» многолетней динамики байкальского фитопланктона // Биофизика, 2000, т. 45, № 6, с. 1089—1095.

Евстафьев В.К., Бондаренко Н.А., Мельник Н.Г. Анализ многолетней динамики основных звеньев трофической цепи в пелагиали озера Байкал // Известия ИГУ. Серия Биология. Экология, 2010, т. 3, № 1, с. 3—11.

Ильяш Л.В., Радченко И.Г., Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Вертикальный поток фитопланктона и осадочного вещества в Белом море по данным длительной экспозиции седиментационных ловушек // Океанология, 2013, т. 53, № 2, с. 216—224.

Кожов М.М. Биология озера Байкал. М., Изд-во АН СССР, 1962, 315 с.

Кожова О.М. О периодических изменениях в развитии фитопланктона озера Байкал // Тр. Всесоюз. гидробиологического общества, 1961, т. 11, с. 28—43.

Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (1), с. 15—48.

Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Шевченко В.П., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Филиппов А.С., Политова Н.В. Рассеянные формы осадочного вещества и их потоки в океанах и морях на примере Белого моря (результаты 12 лет исследований) // ДАН, 2014, т. 456, № 3, с. 355—359. Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю., Пердеро А., Мельникова М., Залюбовский Е. Глобальная климатическая угроза и экономика России: в поисках особого пути. Центр энергетики Московской школы управления Сколково, 2020, 69 с.

Потемкина Т.Г., Потемкин В.Л., Федотов А.П. Климатические факторы как риски современных экологических изменений в береговой зоне озера Байкал // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (5), с. 690—702.

Соколов Б.А., Конюхов А.И. Взвешивающий эффект — важный фактор осадконакопления в глубоководных условиях // Вестник МГУ, Серия 4, Геология, 1986, с. 67—75.

Хурсевич Г.К., Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А., Вильямс Д.Ф., Кузьмин М.И., Феденя С.А., Гвоздков А.Н., Кербер Е.В. Детальная диатомовая биостратиграфия осадков озера Байкал в эпоху Брюнес и климатические факторы видообразования // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 108—129.

Черняева Г.П., Рассказов С.В., Рассказов Г.С., Лямина Н.А. Распределение Aulacosira baicalensis (К. Meyer) Simonsen (Bacillariophyta) в позднекайнозойских озерах Восточной Сибири // Тр. XII Всероссийской палинологической конференции. Санкт-Петербург, ВНИГРИ, 29 сентября—4 октября 2008 г. СПб, 2008, т. 1, с. 214—217.

Шимараев М.Н., Троицкая Е.С. Тенденции изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала в современный период // География и природные ресурсы, 2018, № 4, с. 95— 104.

Шимараев М.Н., Сизова Л.Н., Троицкая Е.С., Куимова Л.Н., Якимова Н.И. Ледово-термический режим озера Байкал в условиях современного потепления (1950—2017 гг.) // Метеорология и гидрология, 2019, № 10, с. 67—76.

Bloesch J., Sturm M. Settling flux and sinking velocities of particulate phosphorus (PP) and particulate organic carbon (POC) in Lake Zug, Switzerland // Sediments and water interactions. New York, Springer, 1986, p. 481–490.

Bondarenko N.A., Evstafyev V.K. Eleven- and ten-year basic cycles of Lake Baikal spring phytoplankton conformed to solar activity cycles // Hydrobiologia, 2006, v. 568, p. 19–24.

Bondarenko N.A., Vorobyova S.S., Zhuchenko N.A., Golobokova L.P. Current state of phytoplankton in the littoral area of Lake Baikal, spring 2017 // J. Great Lakes Res., 2020, v. 46, p. 17—28, doi: 10.1016/j. jglr.2019.10.001.

Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // J. Geophys. Res., 2006, v. 111, D12106.

Durga Madhab Mahapatra, Chanakya H.N., Ramachandra T.V. C:N ratio of sediments in a sewage fed Urban Lake // Int. J. Geol., 2011, v. 5 (3), p. 86–92.

Izmest'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E., Ferwerda C.J., Gray D.K., Woo K.H., Pislegina H.V., Krashchuk L.S., Shimaraeva S.V., Silow E.A. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // J. Great Lakes Res., 2016, v. 42, p. 6–17, doi: 10.1016/j.jglr.2015.11.006.

Jewson D.H., Granin N.G. Cyclical size change and population dynamics of a planktonic diatom, *Aulacoseira baicalensis*, in Lake Baikal // Eur. J. Phycol., 2014, v. 50 (1), p. 1—19, doi: 10.1080/09670262.2014.979450.

Jewson D.H., Granin N.G., Gnatovsky R.Yu., Lowry S.F., Teubner K. Coexistence of two *Cyclotella* diatom species in the plankton of Lake Baikal // Freshwater Biol., 2015, v. 60 (10), p. 2113—2126, doi: 10.1111/ fwb.12636.

Lignell R., Heiskanen A.S., Kuosa H., Gundersen K., Kuuppo-Leinikki P., Pajuniemi R., Uitto A. Fate of phytoplankton spring bloom: sedimentation and carbon flow in the plankton food web in the northern Baltic // Mar. Ecol. Prog. Ser., 1993, v. 94, p. 239—252.

Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J., Jewson D., Less J.A., Ryves D.B., Sturm M. The deposition and accumulation of endemic planktonic diatoms in the sediments of Lake Baikal and an evaluation of their potential role in climate reconstruction during the Holocene // Terra Nostra, 2000, v. 9, p. 34–48.

Müller B., Maerki M., Schmid M., Vologina E.G., Wehrli B., Wüest A., Sturm M. Internal carbon and nutrient cycling in Lake Baikal: Sedimentation, upwelling and early diagenesis // Global Planet. Change, 2005, v. 46, p. 101–124.

National Aeronautics and Space Administration. Global Climate Change, https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/ (accessed 13.07.2022).

Ohlendorf C., Sturm M. A modified method for biogenic silica determination // J. Paleolimnol., 2008, v. 39, p. 137—142.

Olli K., Riser C.W., Wassmann P., Ratkova T., Arashkevich E., Pasternak A. Seasonal variation in vertical flux of biogenic matter in the marginal ice zone and the central Barents Sea // J. Mar. Syst., 2002, v. 38, p. 189–204.

Roberts S., Swann G.E.A., McGowan S., Panizzo V.N., Vologina E.G., Sturm M., Mackay A.W. Diatom evidence of 20th century ecosystem change in Lake Baikal, Siberia // PLOS One, 2019, v. 14 (2), e0213413, doi: 10.1371/journal.pone.0213413.

Ryves D.B., Jewson D.H., Sturm M., Battarbee R.W., Flower R.J., Mackay A.W., Granin N.G. Quantitative and qualitative relationships between planktonic diatom communities and diatom assemblages in sedimenting material and surface sediments in Lake Baikal, Siberia // Limnol. Oceanogr., 2003, v. 48 (4), p. 1643—1661.

Santos R.M., Bakhshoodeh R. Climate change/global warming/climate emergency versus general climate research: comparative bibliometric trends of publications // Heliyon, 2021, v. 7 (11), p. e08219, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08219.

Sturm M., Zeh U., Müller J., Sigg L., Stabel H.H. Schwebstoffuntersuchungen im Bodensee mit Intervall-Sedimentationsfallen // Eclogae Geol. Helv., 1982, v. 75 (3), p. 579—588.

Sturm M., Vologina E.G., Budnev N.M., Schurter M. Results of 20 years of sediment trap monitoring. Particle dynamics in ocean-like Lake Baikal // 9th Symposium for European Freshwater Sciences 2015 "Freshwater Sciences Coming Home." Geneva, 5—10 July 2015. 2015, Vol. Abstract, p. 165.

Swann G.E.A., Panizzo V.N., Piccolroaz S., Pashley V., Horstwood M.S.A., Roberts S., Vologina E., Piotrowska N., Sturm M., Zhdanov A., Granin N., Norman C., McGowan S., Mackay A.W. Changing nutrient cycling in Lake Baikal, the world's oldest lake // PNAS, 2020, p. 1—7, https://www.pnas.org/content/early/2020/10/13/2013181117.

Vologina E.G., Sturm M., Vorob'eva S.S., Budnev N.M. Late Holocene sediments in the profound abyss of Southern Lake Baikal // Limnol. Freshwater Biol. The 4th International conference "Palaeolimnology of Northern Eurasia," 2020, v. 4, p. 585—587, doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-585.

Wilson R., D'Arrigo R., Buckley B., Büntgen U., Esper J., Frank D., Luckman B., Payette S., Vose R., Youngblut D. A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data // J. Geophys. Res., 2007, v. 112, D17103.