

ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В ЮЖНОМ БАЙКАЛЕ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С СЕДИМЕНТАЦИОННЫМИ ЛОВУШКАМИ

Е.Г. Вологина, М. Штурм*

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

** Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, POB 611 D-bendorf, CH-8600, Switzerland*

Представлены оригинальные данные по потокам осадочного вещества в водном столбе Южной котловины оз. Байкал (гл. 1366 м), полученные с помощью седиментационных ловушек в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа. Эти исследования были проведены в рамках международного долгосрочного проекта, который начался в марте 1999 г. с целью исследования современного осадконакопления в озере.

Общий поток осадочного материала был значительно выше в 2000 г., чем в 1999 г. Это обусловлено исключительным ростом кремнистых диатомовых водорослей рода *Aulacoseira* в 2000 г., что привело к так называемому «мелозирному году». В составе осадочного вещества биогенный кремнезем преобладает и может достигать 56 %, в то время как концентрации органического углерода и общего азота не превышают 16 и 1 % соответственно.

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

PARTICULATE FLUXES IN SOUTH BAIKAL: EVIDENCE FROM SEDIMENT TRAP EXPERIMENTS

E.G. Vologina and M. Sturm

We present original data on fluxes of particulate matter through a 1366 m thick water column, measured with sediment traps near the Neutrino Telescope Station in South Baikal. The research was part of a long-term international research project which started in March 1999 in order to investigate current sedimentation in the lake.

The total flux of sedimenting particles was considerably higher in 2000 as compared with 1999. This was due to the exceptional growth of siliceous diatoms of the genus *Aulacoseira* in 2000, leading to the so-called *Melosira* year. Biogenic silica is predominant in the particulate matter and might reach 56 %, whereas the concentrations of organic carbon and total nitrogen do not exceed 16 % and 1%, respectively.

Sediment traps, sediment particle flux, biogenic silica, organic carbon, total nitrogen, diatoms, Lake Baikal

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения оз. Байкал представляют собой своеобразный архив, в котором отражены региональные и глобальные изменения природной среды [Коллектив..., 2000; Кузьмин и др., 2001; BDP-99..., 2005]. Для интерпретации процессов осадконакопления в прошлые эпохи и проведения палеореконструкций необходимы исследования современной седиментации, на что указывали признанные ученые. Так, Н.М. Страхов отмечал: «Общие представления геологов о древнем литогенезе на каждой данной ступени развития литологии определялись, в конце концов, суммой знаний о современном осадконакоплении» [Страхов, 1971, с. 576]. А.П. Лисицын указывал на важность инситу изучения осадочного материала в толще вод морей и океанов [Лисицын, 2004]. На сегодняшний день накоплен достаточно большой опыт изучения потоков осадочного вещества, отобранного с помощью седиментационных ловушек, как в оз. Байкал [Грачев и др., 1996; Mackay et al., 2000; Ryves et al., 2003; Muller et al., 2005; Sturm et al., 2015], так и в других водных бассейнах [Lignell et al., 1993; Olli et al., 2002; Лисицын, 2004; Wassmann et al., 2004; Ильяш и др., 2013; Лисицын и др., 2014]. Необходимость таких работ на Байкале связана также с мониторингом состояния озера в условиях современного потепления климата на планете, которое является неоспоримым фактом [Brohan et al., 2006; Wilson et al., 2007].

В статье представлены данные исследования осадочного вещества, отобранного седиментационными ловушками с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г. и с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. в Южной

Рис. 1. Схема оз. Байкал и местоположение буйковой станции (черная точка).

котловине оз. Байкал в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа (рис. 1). Комплексный анализ осадочного материала помог установить его вещественный состав и рассчитать его потоки. Исследования проводились в рамках соглашения о научном сотрудничестве по изучению лимнологии оз. Байкал, которое было заключено 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

Для исследования процессов современного осадконакопления в Байкале была установлена притоленная буйковая станция в 4 км от северного берега Южной котловины озера в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа. Координаты станции — $51^{\circ}46.076'$ с.ш., $104^{\circ}24.948'$ в.д., глубина озера в точке исследования — 1366 м (см. рис. 1). Схема буйковой станции приведена на рис. 2, а. Отбор осадочного вещества осуществлялся с помощью седиментационных ловушек двух типов: 1) двухстаканные (интегральные) ловушки (EAWAG-130) (см. рис. 2, б), отбирающие взвесь за весь период, и 2) автоматизированные ловушки (TECHNICAP®-PPS4/3) (рис. 2, в), позволяющие отбирать пробы в заранее установленный интервал времени.

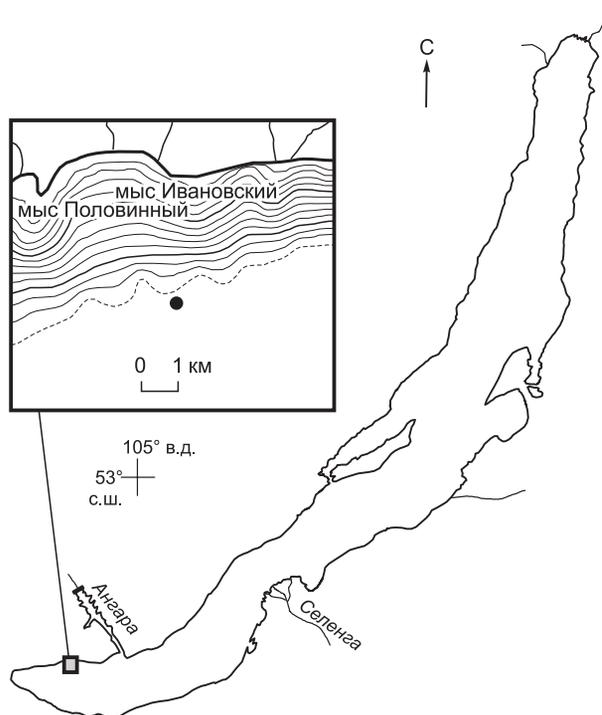
Двухстаканные (интегральные) ловушки (EAWAG-130) (см. рис. 2, б) состоят из двух цилиндрических трубок длиной 100 см и диаметром 9 см. Активная площадь составляет 130 см^2 , а соотношение сторон (длина/диаметр) — 11, что позволяет избежать взмучивания собранного материала. В нижней части трубок расположены съемные стаканы, каждый из которых имеет объем 700 мл. Трубки и стаканы изготовлены из Acrylic® стекла и установлены в съемном держателе. В каждом стакане имеются четыре сливных отверстия (500, 400, 300, 200 мл) для слива воды после подъема ловушек. Во время отбора проб эти отверстия закрыты заглушками [Bloesch, Sturm, 1986; Ohlendorf, Sturm, 2001; Kulbe et al., 2008].

Автоматизированные ловушки (TECHNICAP®-PPS4/3) (см. рис. 2, в) состоят из воронки для отбора проб, в нижней части которой расположена карусель с 12 пластиковыми стаканами, каждый из которых имеет объем 250 мл. Карусель управляется микропроцессорным шаговым двигателем. Время отбора взвеси может быть запрограммировано для каждого стакана от 1 ч до 18 мес. Ловушки имеют высоту 120 см и активную площадь 500 см^2 . Автоматизированные ловушки данной модели были разработаны для высокоразрешающих исследований в 1980 г. [Jannasch et al., 1980; Sturm et al., 1982], они могут иметь различные размеры и содержать разное количество стаканов [<http://www.technicap.com/products/traps/traps.htm>].

Всего на буйковой станции было установлено 15 двухстаканных ловушек (Z1, Z2, ... Z15) на разных глубинах водной толщи и две автоматизированные ловушки на глубинах 510 м (S-1) и 1361 м (S-2) (см. рис. 2, а). Отбор проб проводился почти непрерывно в течение двух лет — с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г. и с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г.

Отобранный материал был высушен посредством вымораживания (freeze-dried) на приборе FD ALPHA и взвешен на аналитических весах. Качественный состав взвеси определялся на световом микроскопе марки SK14 (увел. $\times 100$).

В каждой пробе, отобранной двухстаканными ловушками, были измерены содержания органического углерода ($C_{орг}$) и общего азота ($N_{общ}$) на CNS-газохроматографе «НЕКАТЕСН Евро АЕ» в Швейцарском федеральном институте науки и технологии окружающей среды. В этом же институте выполнены определения концентраций биогенного кремнезема ($SiO_{2биог}$) в пробах, полученных в период с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г., методом, описанным в [Ohlendorf, Sturm, 2008]. Рассчитаны общие



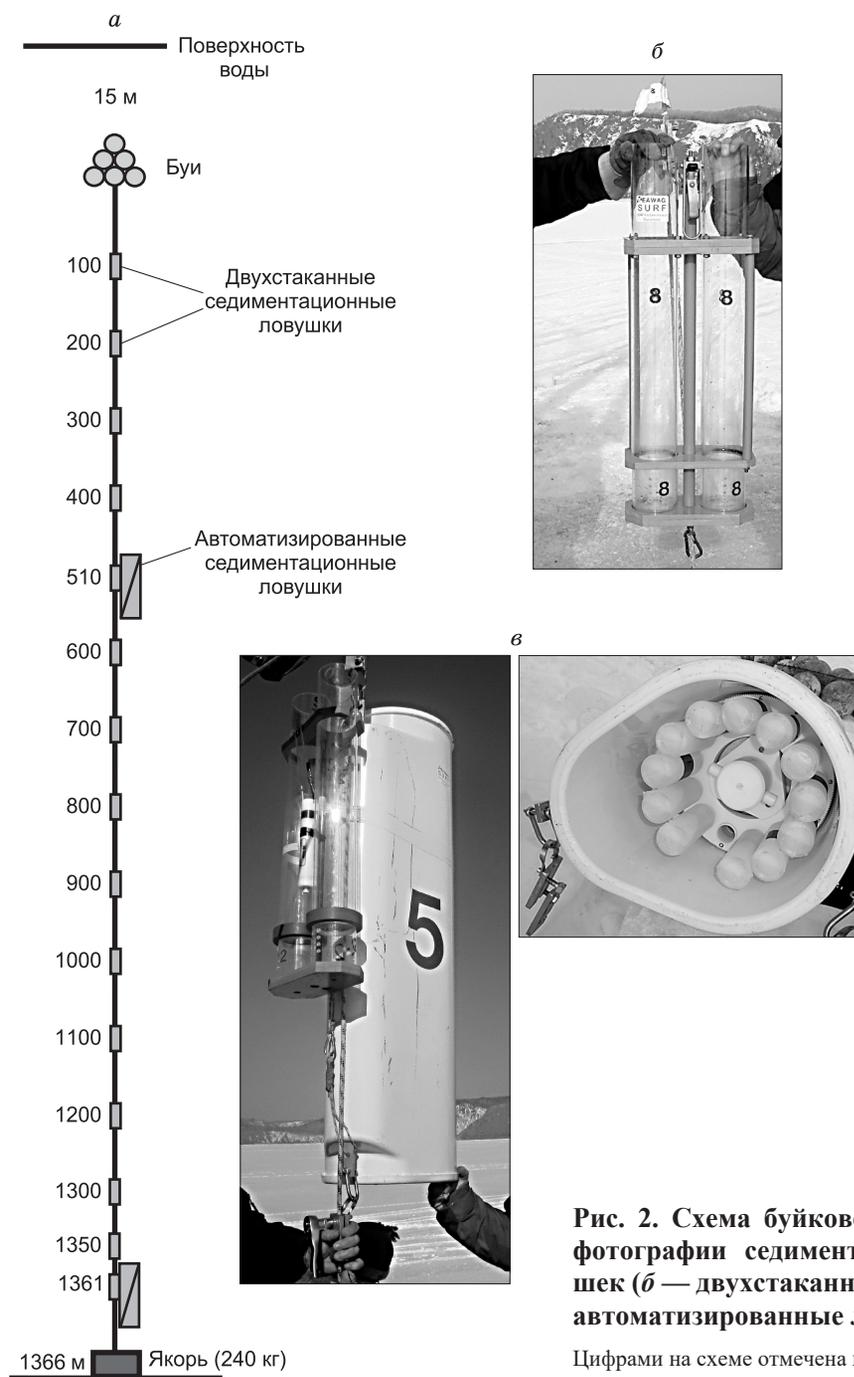


Рис. 2. Схема буйковой станции (а) и фотографии седиментационных ловушек (б — двухстаканные ловушки; в — автоматизированные ловушки).

Цифрами на схеме отмечена глубина озера.

потоки осадочного вещества и потоки биогенных компонентов на разных глубинах водной толщи в граммах на 1 м^2 в год ($\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$) для двухстаканных ловушек и в миллиграммах на квадратный метр в сутки ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$) для автоматизированных ловушек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Просмотр сфер-слайдов показал, что осадочный материал, отобранный двухстаканными ловушками в Южном Байкале, представлен створками диатомовых водорослей преимущественно видов родов *Aulacoseira*, *Cyclotella* и *Synedra*; незначительной примесью пелита, единичными минеральными зёрнами алевроитовой размерности и частицами пыли; в некоторых пробах присутствуют остатки рачков-бокоплавов (род *Gammarus*) и спикулы губок. Таким образом, во всех ловушках преобладает биогенный материал, состоящий в основном из створок диатомей. Результаты комплексного анализа осадочного вещества приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. **Содержания биогенных элементов, C/N отношение и потоки осадочного вещества, отобранного двухстаканными ловушками с разных глубин водной толщи с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г.**

Номер ловушки	Глубина, м	C _{орг}	N _{общ}	C/N*	Поток		
					Общий	C _{орг}	N _{общ}
		%			г/м ² /год		
Z1	100	8.12	0.80	10.1	73.7	5.98	0.59
Z2	200	5.76	0.58	10.0	99.1	5.71	0.57
Z3	300	6.01	0.56	10.7	111	6.69	0.63
Z4	400	4.29	0.44	9.80	118	5.09	0.52
Z5	510	3.91	0.36	11.0	135	5.27	0.48
Z6	600	4.35	0.42	10.3	130	5.65	0.55
Z7	700	3.64	0.39	9.40	129	4.70	0.50
Z8	800	3.93	0.37	10.5	120	4.72	0.45
Z9	900	3.93	0.37	10.6	145	5.71	0.54
Z10	1000	3.84	0.37	10.4	129	4.94	0.48
Z11	1100	4.22	0.39	10.9	113	4.76	0.44
Z12	1200	3.81	0.36	10.6	131	4.98	0.47
Z13	1300	4.08	0.39	10.4	138	5.62	0.54
Z14	1350	3.60	0.33	11.0	98.3	3.54	0.32
Z15	1361	3.56	0.34	10.6	146	5.19	0.49
Среднее		4.47	0.43	10.4	121	5.24	0.50
Минимальное		3.56	0.33	9.40	73.7	3.54	0.32
Максимальное		8.12	0.80	11.0	146	6.69	0.63

* Молярное.

Таблица 2. **Содержания биогенных элементов, C/N отношение и потоки осадочного вещества, отобранного двухстаканными ловушками с разных глубин водной толщи с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г.**

Номер ловушки	Глубина, м	C _{орг}	N _{общ}	SiO ₂ биог	C/N*	Поток			
						Общий	C _{орг}	N _{общ}	SiO ₂ биог
		%				г/м ² /год			
Z1	100	8.94	0.89	51.0	11.7	126	11.3	1.12	64.4
Z2	200	7.24	0.90	55.9	9.30	136	9.86	1.23	76.1
Z3	300	7.77	0.79	52.3	11.4	162	12.6	1.28	84.7
Z4	400	8.55	0.82	47.4	12.2	165	14.1	1.35	78.2
Z5	510	7.96	0.76	50.1	12.2	230	18.3	1.75	115
Z6	600	7.63	0.77	50.6	11.5	175	13.4	1.35	88.5
Z7	700	8.13	0.79	47.5	11.9	172	14.0	1.37	81.8
Z8	800	8.23	0.86	52.9	11.2	156	12.9	1.34	82.7
Z9	900	9.45	0.74	52.6	15.0	166	15.7	1.22	87.3
Z10	1000	8.20	0.75	50.0	12.7	156	12.8	1.17	77.8
Z11	1100	6.82	0.71	52.7	11.2	154	10.5	1.10	81.2
Z12	1200	6.02	0.68	50.0	10.3	158	9.51	1.08	78.9
Z13	1300	5.27	0.67	50.6	9.10	151	7.97	1.02	76.5
Z14	1350	5.43	0.68	—	9.30	152	8.23	1.03	—
Z15	1361	15.9	1.11	49.6	16.7	150	23.8	1.66	74.2
Среднее		8.10	0.80	50.9	11.7	161	13.0	1.30	81.9
Минимальное		5.27	0.67	47.4	9.10	126	7.97	1.02	64.4
Максимальное		15.9	1.11	55.9	16.7	230	23.8	1.75	115

*Молярное.

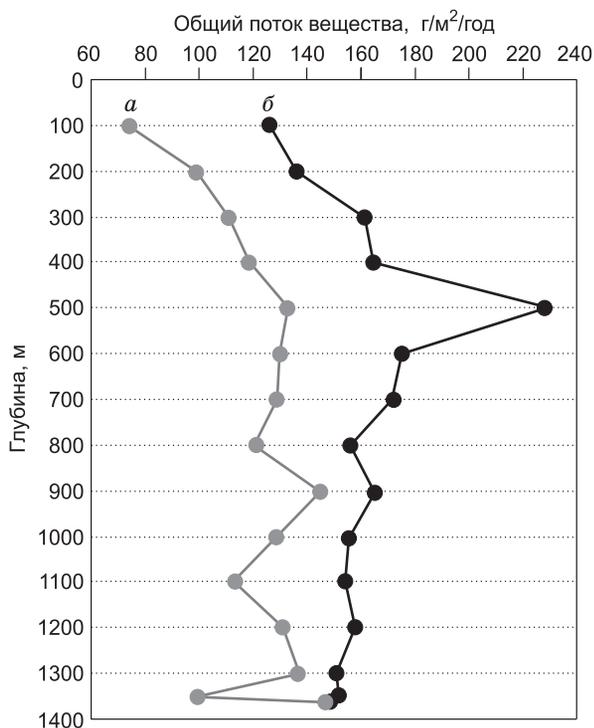


Рис. 3. Общие потоки осадочного вещества ($\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$) на разных глубинах Южного Байкала в периоды с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г. (а) и с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. (б).

Содержания органического углерода в пробах, отобранных с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г., изменяется от 3.56 до 8.12 % при средней величине 4.47 %. При этом максимальные значения отмечаются в самой верхней части водного столба до глубины 300 м, а минимальные — в придонной зоне на глубине 1361 м. Концентрации общего азота примерно на порядок ниже от 0.33 до 0.80 % и в среднем составляют 0.43 %. Максимальные значения наблюдаются в верхних трех ловушках до глубины 300 м, минимальные — в нижних ловушках, соответствующих глубинам 1350 и 1361 м (см. табл. 1).

В пробах, отобранных с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г., содержания $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ значительно выше, чем в предыдущий год. Концентрации $C_{\text{орг}}$ изменяются от 5.27 до 15.9 % и в среднем составляют 8.10 %. $N_{\text{общ}}$ варьирует от 0.67 до 1.11 % при среднем значении 0.80 %. Максимальные величины $C_{\text{орг}}$ и

$N_{\text{общ}}$ обнаружены в самой нижней ловушке на глубине 1361 м. Концентрации биогенного кремнезема, источником которого служат главным образом створки диатомовых водорослей, в исследованных пробах в среднем составляют 50.9 %, минимальные и максимальные значения соответственно равны 47.4 и 55.9 % (см. табл. 2). Таким образом, основная часть биогенных компонентов в пробах представлена биогенным кремнеземом.

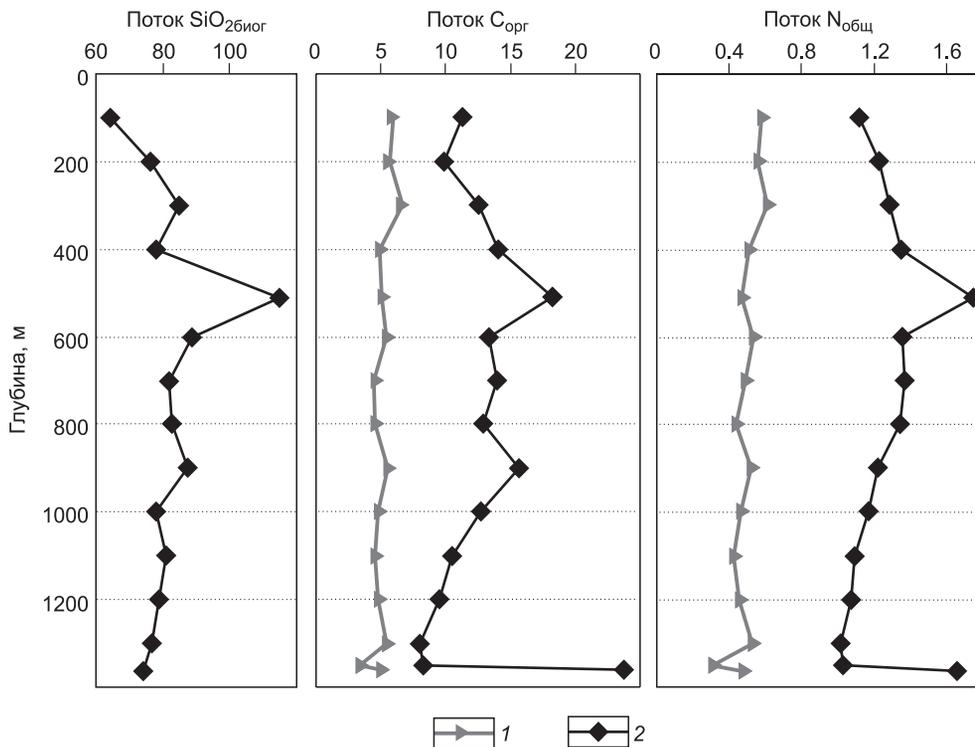


Рис. 4. Потоки биогенного кремнезема, органического углерода и общего азота ($\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$) на разных глубинах Южного Байкала в периоды с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г. (1) и с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. (2).

Отношение C/N, измеренное для образцов, отобранных с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г., изменяется от 9.40 до 11.0 при средней величине 10.4 (см. табл. 1). Для осадочного материала, накопленного с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г., C/N варьирует от 9.1 до 16.7 и в среднем составляет 11.7 (см. табл. 2). При этом максимальное значение (16.7) соответствует самой нижней ловушке (гл. 1361 м), что связано, вероятно, с взмучиванием донных отложений верхнего слоя. Отношение C/N, позволяющее оценивать генезис органической составляющей осадков [Выхристюк, 1980; Durga Madhab Maharatra et al., 2011; и др.], указывает, что в большинстве проанализированных проб преобладает автохтонное планктоногенное органическое вещество.

Общий поток осадочного вещества в седиментационных ловушках, установленных с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г., изменяется от 73.7 до 146 г/м²/год и в среднем составляет 121 г/м²/год (см. табл. 1, рис. 3). Максимальное значение потока соответствует самой нижней ловушке, установленной на глубине 1361 м, что, скорее всего, связано с взмучиванием поверхностных илов на границе раздела осадок—вода. В период с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. общий поток вещества значительно выше, чем в предыдущий год. Он варьирует от 126 до 230 г/м²/год и в среднем равен 161 г/м²/год (см. табл. 2, рис. 3).

В целом аналогичная картина наблюдается и для потоков органического углерода и общего азота. Потоки $C_{орг}$ и $N_{общ}$ изменяются от 3.54 до 6.69 г/м²/год при средней величине 5.24 г/м²/год и от 0.32 до 0.63 г/м²/год при среднем значении 0.50 г/м²/год соответственно в период с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г. (см. табл. 1, рис. 4). С 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. потоки $C_{орг}$ и $N_{общ}$ варьируют от 7.97 до 23.8 г/м²/год при средней величине 13.0 г/м²/год и от 1.02 до 1.75 г/м²/год при среднем значении 1.30 г/м²/год соответственно (табл. 2, рис. 4). Поток $SiO_{2биог}$ в период с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. изменяется от 64.4 до 115 г/м²/год и в среднем равен 81.9 г/м²/год (табл. 2, рис. 4). Таким образом, общий поток осадочного вещества в седиментационных ловушках определяется главным образом потоком $SiO_{2биог}$, в меньшей степени — $C_{орг}$, незначительная доля приходится на $N_{общ}$. Полученные результаты свидетельствуют, что концентрации биогенных элементов и их потоки значительно выше в период с

Таблица 3. Общие потоки осадочного вещества, отобранного автоматизированными ловушками на глубинах 510 и 1361 м с 14 марта 1999 г. по 1 марта 2000 г. и с 10 марта 2000 г. по 4 марта 2001 г.

Период отбора проб	Номер проб	Продолжительность отбора проб, количество дней	Общий поток, мг/м ² /сут	
			Ловушка S-1 (510 м)	Ловушка S-2 (1361 м)
14.03.1999 — 25.04.1999	1	42	2.52	20.0
25.04.1999 — 16.05.1999	2	21	4.48	30.6
16.05.1999 — 06.06.1999	3	21	5.90	28.5
06.06.1999 — 27.06.1999	4	21	—	81.3
27.06.1999 — 18.07.1999	5	21	—	19.3
18.07.1999 — 08.08.1999	6	21	—	24.5
08.08.1999 — 29.08.1999	7	21	—	41.8
29.08.1999 — 19.09.1999	8	21	—	195
19.09.1999 — 04.11.1999	9	46	—	1005
04.11.1999 — 05.12.1999	10	31	—	73.0
05.12.1999 — 02.01.2000	11	28	—	122
02.01.2000 — 01.03.2000	12	59	—	320
10.03.2000 — 14.04.2000	1	35	3.62	89.8
14.04.2000 — 19.05.2000	2	35	8.98	128
19.05.2000 — 09.06.2000	3	21	677	—
09.06.2000 — 30.06.2000	4	21	4821	—
30.06.2000 — 21.07.2000	5	21	361	825
21.07.2000 — 18.08.2000	6	28	62.6	201
18.08.2000 — 15.09.2000	7	28	117	56.6
15.09.2000 — 06.10.2000	8	21	157	456
06.10.2000 — 03.11.2000	9	28	58.9	326
03.11.2000 — 01.12.2000	10	28	630	232
01.12.2000 — 05.01.2001	11	35	108	241
05.01.2001 — 04.03.2001	12	58	218	106

8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. по сравнению с предыдущим годом (период с 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г.).

Известно, что основная доля биогенного кремнезема в Байкале содержится в створках диатомовых водорослей, численность и биомасса которых характеризуются резкими межгодовыми и сезонными колебаниями [Вотинцев и др., 1975; Поповская, 1977; Popovskaya, 2000; Jewson, Granin, 2014]. Так, существует уникальное явление увеличения биомассы диатомовых водорослей в так называемые «мелозирные годы», когда происходит значительный всплеск урожайности видов рода *Melosira* (в настоящее время переименован в род *Aulacoseira*) [Кожова, 1961; Кожов, 1962; Антипова, 1963; Евстафьев и др., 2010]. Обнаружена определенная цикличность в повторении «мелозирных лет», которая с высокой долей вероятности связана с ритмами солнечной активности [Евстафьев, Бондаренко, 2000; Bondarenko, Evstafyev, 2006]. Согласно опубликованным данным, 2000 год относился к «мелозирным годам» [Евстафьев и др., 2010; Jewson, Granin, 2014]. Этим, очевидно, и объясняются повышенные значения потоков осадочного вещества и биогенных элементов в период с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. (см. рис. 4).

Сравнение полученных данных с результатами измерения потоков осадочного вещества в седиментационных ловушках, установленных в трех разных районах Байкала с 2001 по 2002 г. [Muller et al., 2005] показало следующее. Общий поток материала в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа на разных глубинах водной толщи с 2001 по 2002 г. составил 126 и 136 г/м²/год. В центральной части Южного Байкала этот показатель равен 138 и 117 г/м²/год [Muller et al., 2005]. Эти значения близки к данным, полученным нами за период март 1999 г. — март 2000 г., но меньше величин, измеренных за период март 2000 г. — март 2001 г. Вероятно, это связано с тем, что 2001 год, как и 1999 год, не являлся «мелозирным годом» [Bondarenko, Evstafyev, 2006]. В Северном Байкале с 2001 по 2002 г. отмечался более низкий поток осадочного вещества (63 и 94 г/м²/год) сравнительно с Южной котловиной озера [Muller et al., 2005].

Полученные результаты в целом хорошо согласуются с данными исследования других водных бассейнов. Так, в водной толще морей и океанов в составе осадочного материала, как и в Байкале, преобладает биогенное вещество, большую часть которого составляют диатомеи [Лисицын, 2004; Wassmann et al., 2004; Ильях и др., 2013]. Средние многолетние значения потоков осадочного вещества для глубоководной части Белого моря равны 213 г/м²/год [Лисицын и др., 2014], что выше средней величины потоков, зафиксированных нами для Байкала в период март 1999 г. — март 2001 г. (141 г/м²/год). Однако в отдельные годы эти значения хорошо соотносятся между собой.

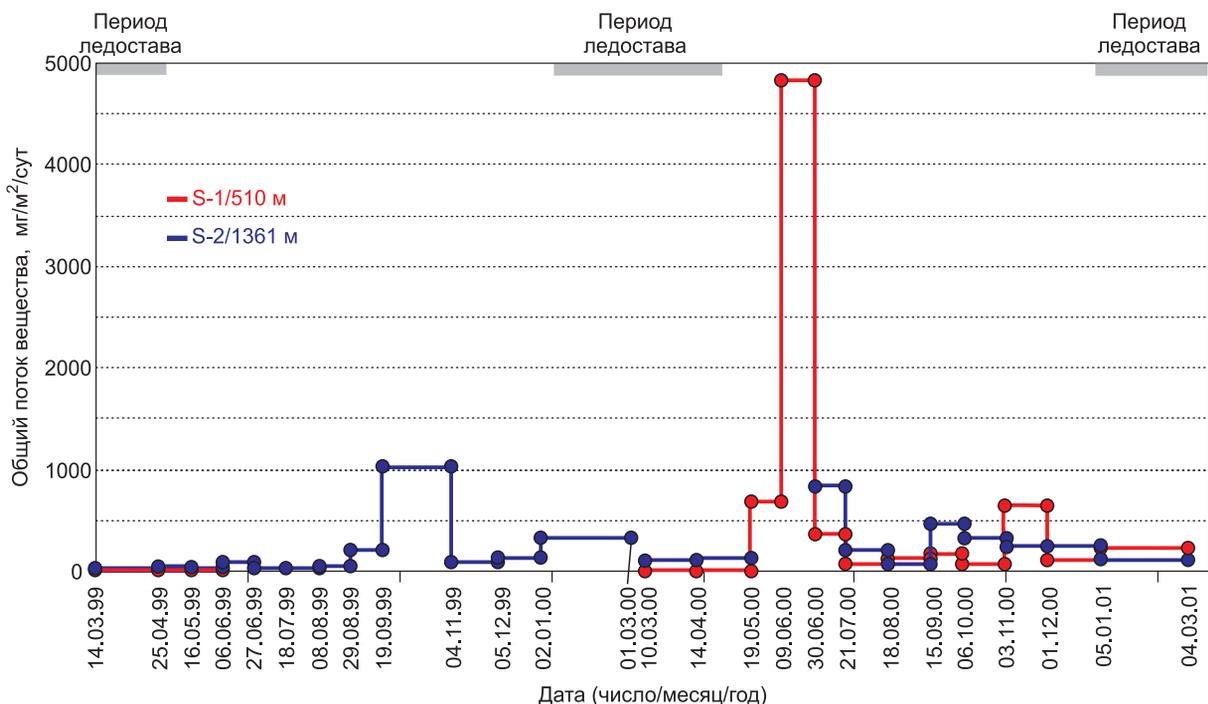


Рис. 5. Общие потоки осадочного вещества, отобранного автоматизированными ловушками S-1 и S-2 в Южном Байкале на глубинах 510 и 1361 м соответственно за периоды с 14 марта 1999 г. по 1 марта 2000 г. и с 10 марта 2000 г. по 4 марта 2001 г. (охвачено 24 временных интервала).

Потоки осадочного вещества, отобранного автоматизированными ловушками на глубинах 510 м (S-1) и 1361 м (S-2) за период с 14 марта 1999 г. по 1 марта 2000 г. и с 10 марта 2000 г. по 4 марта 2001 г., приведены в табл. 3 и на рис. 5. Результаты следующие.

Верхняя ловушка (S-1) не отбирала пробы с 6 июня 1999 г. по 1 марта 2000 г. Максимальные потоки осадочного вещества отмечаются в конце весны—начале лета 2000 г. между 19 мая и 30 июнем и составляют 677 и 4821 мг/м²/сут. Достаточно высокий поток (630 мг/м²/сут) наблюдается осенью 2000 г. между 3 ноября и 1 декабря. В период между 30 июнем 2000 г. и 4 марта 2001 г. средний поток вещества в ловушке S-1 составил 214 мг/м²/сут. За тот же период средний поток материала в ловушке S-2 был выше (305 мг/м²/сут). Нижняя ловушка (S-2) не отбирала пробы с 19 мая по 30 июня 2000 г. Таким образом, она не работала во время, когда были зафиксированы максимальные потоки осадочного вещества в верхней ловушке. Однако с 30 июня по 21 июля 2000 г. в ловушке S-2 отмечен высокий поток материала (825 мг/м²/сут). Он частично соответствует максимальному пику в ловушке S-1. Кроме того, в нижней ловушке дополнительно отмечаются три повышенных потока осадочного вещества: 1) 1005 мг/м²/сут (между 19 сентября и 4 ноября 1999 г.); 2) 320 мг/м²/сут (между 2 января и 1 марта 2000 г.); 3) 456 мг/м²/сут (в период между 15 сентября и 6 октября 2000 г.).

Таким образом, максимальный поток осадочного вещества, отмеченный в верхней ловушке (гл. 510 м) в конце весны — начале лета 2000 г. связан с массовым цветением диатомей рода *Aulacoseira* сразу после вскрытия озера ото льда в «мелозирный год» (см. рис. 5). Средний поток материала в нижней ловушке (гл. 1361 м) в 2000 г. составил 266 мг/м²/сут, что выше этого показателя в 1999 г. (163 мг/м²/сут). Повышенные потоки осадочного вещества в осенне-зимний период, отмеченные в ловушках S-1 и S-2, связаны с развитием диатомей вида *Cyclotella minuta* [Jewson et al., 2015]. В целом хорошая сходимость данных между двумя ловушками S-1 и S-2, расположенными на расстоянии 851 м между собой, может объясняться высокими темпами осаждения диатомей. Так, в период цветения диатомовых водорослей их створки могут опускаться из продуктивной зоны эпилимниона на дно Байкала со скоростью более 60 м в день, что связано с агрегацией клеток в пределах продуктивной части водного столба [Maskay et al., 2000; Ryves et al., 2003; Sturm et al., 2015].

Сезонная изменчивость состава и потоков осадочного вещества отмечалась в Байкале и в другие годы [Грачев и др., 1996; Maskay et al., 2000]. Изменения вертикальных потоков фитопланктона в разные сезоны наблюдались также в Балтийском, Баренцевом и Белом морях [Lignell et al., 1993; Olli et al., 2002; Ильяш и др., 2013].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ осадочного вещества, отобранного с разных глубин водной толщи за два года (март 1999 г.—март 2000 г. и март 2000 г.—март 2001 г.) в глубоководной части Южного Байкала, позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Максимальные значения общего потока осадочного вещества в двухстаканных ловушках отмечались в период с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г. и составляли в среднем 161 г/м²/год. С 11 марта 1999 г. по 6 марта 2000 г. эта величина в среднем равна 121 г/м²/год.

2. Осадочный материал представлен главным образом биогенным кремнеземом (от 47 до 56 % в период с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г.), органический углерод и общий азот не превышают 16 и 1 % соответственно.

3. Общий поток осадочного вещества в седиментационных ловушках определяется главным образом потоком SiO₂биог, на C_{орг} и N_{общ} приходится незначительная доля. При этом величины потоков прямо пропорциональны между собой.

4. Высокие значения общего потока осадочного вещества и потоков биогенных элементов в 2000 г. (период исследования — с 8 марта 2000 г. по 8 марта 2001 г.) связаны с тем, что этот год был «мелозирным годом».

5. Результаты, полученные для автоматизированных ловушек, свидетельствуют о наличии максимального потока осадочного вещества в верхней ловушке (гл. 510 м) весной и летом 2000 г., когда происходило массовое цветение диатомовых водорослей рода *Aulacoseira*.

Подобные исследования необходимо продолжать, поскольку они могут дать новый импульс как в изучении изменений окружающей среды в настоящее время, так и способствовать прогнозам на будущее. Сопоставление полученных данных с результатами изучения донных отложений Байкала позволит более качественно проводить реконструкции осадконакопления в прошлые эпохи.

Авторы искренне благодарны д.ф.-м.н. профессору Н.М. Будневу и участникам экспедиции НИИ-ИПФ ИГУ за неоценимую помощь в проведении работ, И. Брюннер (EAWAG) за аналитическую работу. Авторы также глубоко признательны В.П. Шевченко за ознакомление с рукописью статьи и высказанные конструктивные замечания и рекомендации, позволившие улучшить ее содержание.

Работа выполнена при частичной поддержке EAWAG (EU-проект CONTINENT/EVK2-СТ-2000-00057).

ЛИТЕРАТУРА

Антипова Н.Л. О колебаниях численности видов мелозеры в планктоне озера Байкал // Труды Всесоюзного гидробиологического общества, 1963, т. 13, с. 235—241.

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.

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 Иркутского государственного университета. 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 // Труды Всесоюзного гидробиологического общества, 1961, т. 11, с. 28—43.

Коллектив участников проекта «Байкал-бурение». Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал (по результатам исследования 600-метрового керна глубокого бурения) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (1), с. 3—32.

Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каван Т., Вильямс Д., Бычинский В.А., Кербер Е.В., Кравчинский В.А., Безрукова Е.В., Прокопенко А.А., Гелетий В.Ф., Калмычков Г.В., Горегляд А.В., Антипин В.С., Хомутова М.Ю., Сошина Н.М., Иванов Е.В., Хурсевич Г.К., Ткаченко Л.Л., Солотчина Э.П., Йошида Н., Гвоздков А.Н. Глубоководное бурение на Байкале — основные результаты // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 8—34.

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.

Поповская Г.И. Динамика фитопланктона пелагиали // Биологическая продуктивность пелагиали Байкала и ее изменчивость / Ред. М.Ю. Бекман. Новосибирск, Наука, 1977, с. 5—39.

Страхов Н.М. Развитие литогенетических идей в России и СССР. М., Наука, 1971, 622 с.

BDP-99 Baikal Drilling Project Members. A new Quaternary record of regional tectonic, sedimentation and paleoclimate changes from drill core BDP-99 at Posolskaya Bank, Lake Baikal // Quat. Int., 2005, v. 136, p. 105—121.

Bloesch J., Sturm M. Settling fluxes and sinking velocities of particulate phosphorus (PP) and particulate organic carbon (POC) in Lake Zug, Switzerland / Ed. G. Sly // Sediments and water interaction, 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.

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, doi:10.1029/2005JD006548.

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.

Jannasch H.W., Zafriou O.C., Farrington J.W. A sequencing sediment trap for time-series studies of fragile particles // Limnol. Oceanogr., 1980, v. 25, p. 939—943.

Jewson D.H., Granin N.G. Cyclical size change and population dynamics of a planktonic diatom, *Aulacoseira baicalensis*, in Lake Baikal // Europ. J. Phycol., 2014, p. 1—19.

Jewson D.H., Granin N.G., Gnatovsky R.Y., Lowry S.F., Teubner K. Coexistence of two *Cyclotella* diatom species in the plankton of Lake Baikal // *Freshwater Biol.*, 2015, p. 1–14, doi:10.1111/fwb.12636.

Kulbe T., Livingstone D.M., Guilizzoni P., Sturm M. The use of long-term, high-frequency, automatic sampling data in a comparative study of the hypolimnia of two dissimilar Alpine lakes // *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 2008, v. 30, № 3, p. 371–376.

Lignell R., Heiskanen A.S., Kuosa H., Gundersen K., Kuoppo-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. Progress 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.

Muller B., Maerki M., Schmid M., Vologina E.G., Wehrli B., Wuest 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.

Ohlendorf C., Sturm M. Precipitation and dissolution of calcite in a Swiss High Alpine Lake // *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 2001, v. 33, № 4, p. 410–417.

Ohlendorf C., Sturm M. A modified method for biogenic silica determination // *J. Paleolimnol.*, 2008, v. 54, 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.

Popovskaya G.I. Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal // *Aquat. Ecosyst. Health Manage.*, 2000, v. 3, p. 215–225.

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.

Sturm M., Zeh U., Müller J., Sigg L., Stabel H.H. Schwebstoff untersuchungen im Bodensee mit Intervall-Sedimentations fallen // *Eclog. 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, Switzerland, 5–10 July 2015, vol. abstract, p. 165.

Wassmann P., Bauerfeind E., Fortier M., Fukuchi M., Hargrave B., Moran B., Noji T., Nöthig E.M., Olli K., Peinert R., Sasaki H., Shevchenko V. Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean* / Eds. R. Stein, R.W. Macdonald. Berlin, Springer Verlag, 2004, p. 101–138.

Wilson R., D'Arrigo R., Buckley B., Buntgen 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, 112:D17103. doi: 10.1029/2006JD008318.

<http://www.technicap.com/products/traps/traps.htm>.

*Рекомендована к печати 6 декабря 2016 г.
Д.В. Гражданкиным*

*Поступила в редакцию
15 апреля 2016 г.*