

УДК 550.42:504.455:551.583.1

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В СОЛЕНОМ МЕРОМИКТИЧЕСКОМ ОЗЕРЕ ШИРА (ХАКАСИЯ)

Бабич Валерий Васильевич¹,
vbabich@igm.nsc.ru

Дарьин Андрей Викторович¹,
avd@igm.nsc.ru

Калугин Иван Александрович¹,
ikalugin@igm.nsc.ru

Маркович Татьяна Ивановна¹,
mark@igm.nsc.ru

Зыков Виктор Владимирович²,
rigozin@ibp.ru

Рогозин Денис Юрьевич²,
rigozin@ibp.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 360090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Институт биофизики СО РАН,
Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения сезонных вариаций объема и состава седиментационных потоков в современных озерах и их связи с погодноклиматическими факторами, что может послужить основой для реконструкции климатических изменений в прошлом.

Цель: на основе обобщения и анализа результатов многолетнего ежесезонного мониторинга материала седиментационных ловушек, инкубируемых в озере, оценить сезонные изменения массы, скорости и химического состава поступающего в оз. Шира осадочного материала.

Объектом исследования являлось бессточное слабосоленое меромиктическое озеро Шира, расположенное в степной межгорной впадине на территории республики Хакасия.

Методы: многолетний ежесезонный мониторинг осадочного материала, формирующего донные отложения, с использованием седиментационных ловушек, инкубируемых в озере; исследование полученного материала на широкий спектр параметров (биологические, гидрохимические, литолого-геохимические, гранулометрические и др.) различными общепринятыми методами в том числе методом рентгенофлуоресцентного микроанализа на пучках синхротронного излучения (РФА-СИ), адаптированного для исследования образцов донных отложений; компьютерный статистический анализ полученных данных (метод множественной регрессии, кросскорреляционный анализ и др.) с целью выявления связи массы и химического состава осаждающегося материала от региональных температур.

Результаты. На основе исследования количества и элементного состава осадочного материала сезонных донных ловушек озера Шира, собранного в 2012–2017 гг., сформулирована динамическая модель сезонного поступления седиментационных потоков в озерах подобного ландшафтно-геохимического типа. Установлено, что наиболее интенсивное осаждение материала происходит в летне-осенний период, в меньшей мере – в зимне-весенний. При этом весной преобладает аккумуляция аллохтонного (терригенного) алевроитового материала, поступающего с паводковыми водами, в летне-осенний период одновременно с осаждением кластогенного пелитового материала в осадках накапливаются в больших количествах биогенный и хемогенный материалы. В зимний период кластогенные и биогенные процессы осадконакопления практически прекращаются, наблюдается лишь хемогенное осаждение карбонатов. Установлено, что осаждение основной массы аллохтонного материала, попадающего в водоём, происходит на протяжении двух–трех месяцев, что свидетельствует об определённой инертности седиментационных процессов. Показано наличие устойчивой связи массы и химического состава поступающего в озеро терригенного материала с региональной температурой приповерхностного воздуха, являющегося одним из главных регуляторов водного баланса водоёма.

Ключевые слова:

Донные отложения, седиментационные ловушки, солёные озёра, микро-РФА, синхротронное излучение, регрессионный анализ.

Введение

Изучение динамики климата и состояния природных экосистем в прошлом и настоящем дает фундаментальную основу для прогноза будущих климатических изменений и их влияния на окружающую среду. Многие особенности климатически-обусловленных

процессов не антропогенного характера, необходимые при прогнозировании, могут быть выявлены только с помощью расшифровки природных «архивов», какими являются донные отложения водоёмов.

Озёра, особенно бессточные, чутко реагируют на погодноклиматические вариации в конкретном реги-

оне, а донные отложения являются богатейшим архивом изменений параметров окружающей среды, контролирующих процесс седиментации.

Исследуя озёрные осадки на широкий спектр параметров (биологические, гидрохимические, литолого-геохимические, гранулометрические и др.) можно ставить и решать самые разнообразные задачи: строить палеорекострукции различных климатических факторов, выявлять хронологию вариации уровня водоемов, изменения солёности озера и его стратификации, оценивать степень антропогенного влияния на экосистемы и т. д. [1–6 и др.].

Особую ценность в этом плане представляют солёные меромиктические водоемы, к числу которых относится оз. Шира. В подобных системах сочетание анаэробных условий в придонных горизонтах водной толщи с отсутствием гидроциркуляции (течений, перемешиваний) способствует образованию годичных слоёв (варв) донных отложений в строгой хронологической последовательности [7]. Данное обстоятельство – сохранение ненарушенной тонкой структуры осадка, является ключевым моментом при изучении не только межгодовых, но и межсезонных изменений условий осадконакопления. Таким образом, донные тонко стратифицированные отложения таких озёр являются репрезентативным материалом для палеоклиматических и палеолимнологических реконструкций различных природно-климатических показателей [5, 8–14 и др.].

Однако для интерпретации результатов реконструкций и более глубокого понимания процессов осадкообразования требуется информация о современных сезонных вариациях состава седиментационных потоков, их связи с погодно-климатическими факторами, а также с гидрологическими, физико-химическими и биологическими характеристиками изучаемой экосистемы. Эта информация может быть получена прямыми наблюдениями процессов осадконакопления *in situ* с помощью седиментационных ловушек.

В последние годы меромиктическое озеро Шира является объектом комплексного научного исследо-

вания. Анализ кернов донных отложений на основе биологических и геохимических индикаторов позволил выявить изменения режима циркуляции водной толщи [15]. Построена физико-химическая модель минералообразования в данной системе [16]. По спорово-пыльцевому составу керна выявлены климатически-обусловленные изменения наземного растительного покрова [17]. Проведена реконструкция динамики уровня воды на основе изменения элементного состава донных отложений [18]. Однако до настоящего времени в литературе отсутствует информация о закономерностях процесса осадконакопления при смене сезонов в течение года, остаются неясными факторы окружающей среды, контролирующие качественный и количественный состав осадка.

Цель настоящей работы – на основе обобщения и анализа результатов многолетнего ежесезонного мониторинга материала седиментационных ловушек, инкубируемых в озере, выявить зависимость характерных особенностей (массы, элементного состава и др.) седиментационных потоков в оз. Шира от погодных факторов, в первую очередь от температуры приповерхностного воздуха, и сформулировать сезонную динамическую модель поступления осадочного материала в водоём.

Объект исследования, пробоотбор, пробоподготовка

Объектом исследования являлось бессточное слабосолёное меромиктическое озеро Шира, расположенное в степной межгорной впадине на территории республики Хакасия. Площадь водного зеркала озера составляет 35 км² при максимальной глубине 24 м. Длина озера с северо-запада на юго-восток – 9,5 км, наибольшая ширина – 5,3 км.

Пробоотбор осаждающегося на дно озера материала проводился с помощью донных седиментационных ловушек на базе научно-исследовательского стационара на озере Шира. Ловушки устанавливались в наиболее глубоком месте озера (глубина 24 м) в период с марта 2012 г. по октябрь 2017 г. Информация о длительности экспозиции аккумуляции осадка в ловушках представлена в табл. 1.

Таблица 1. Информация о времени установки и снятия донных ловушек

Table 1. Information on the time of installation and removal of bottom traps

Порядковый номер ловушки Trap serial number	Дата постановки Trap installation date	Дата выемки Trap removal date
1	14 марта/March 2012	26 мая/May 2012
2	27 мая/May 2012	7 июля/July 2012
3	8 июля/July 2012	4 сентября/September 2012
4	4 сентября/September 2012	24 октября/October 2012
5	16 марта/March 2013	31 мая/May 2013
6	31 мая/May 2013	8 июля/July 2013
7	10 июля/July 2013	3 сентября/September 2013
8	4 сентября/September 2013	23 октября/October 2013
9	13 марта/March 2014	26 мая/May 2014
10	28 мая/May 2014	9 июля/July 2014
11	10 марта/March 2016	25 мая/May 2016
12	25 мая/May 2016	3 августа/August 2016
13	6 августа/August 2016	16 октября/October 2016
14	11 марта/March 2017	27 мая/May 2017
15	4 августа/August 2017	24 октября/October 2017

Подготовка полученного с помощью ловушек материала для аналитических исследований проводилась по следующей схеме. Содержимое ловушки тщательно перемешивалось и после полного отстаивания методом декантации свободный объем жидкой фазы отделялся от осадка. Остаток воды из влажного осадка удалялся методом лиофильной сушки с предварительным замораживанием суспензии жидким азотом. Масса испарившейся воды рассчитывалась по разности веса влажного и сухого осадка. Получаемый таким образом сухой остаток включает в себя как терригенный материал, так и солевую компоненту, образующуюся при дистиллировании озерной воды. Для определения соотношения количества соли и терригенного седиментационного материала в сухих остатках проб были проведены дополнительные исследования по определению солености озерной воды в каждой ловушке. Для этой цели в отдельные пробирки были отобраны аликвоты жидкой фазы по 10 мл. Пробы выдерживались в сушильном шкафу при 90 °С до полного высыхания (сутки) и взвешивались. Параллельно проводилось измерение плотности озерной воды во всех пробах.

Содержание спектра химических элементов в твердой фазе материала ловушки и солевой составляющей озерной воды определялось методом рентгенофлуоресцентного микроанализа на пучках синхротронного излучения (РФА-СИ), адаптированного для исследования образцов донных осадков. Проведён-

ные исследования послужили исходной информационной базой для всех последующих расчётов.

Оценка массы сезонных седиментационных потоков

Донные ловушки по временной привязке их экспозиций были разделены на три группы: «весна» (март–май, №№ 1, 5, 9, 11, 14), «лето» (июнь–август, №№ 2, 3, 6, 7, 10, 12) и «осень» (сентябрь–ноябрь, №№ 4, 8, 13, 15). Поскольку установка и снятие ловушек в период с января по февраль сопряжены с большими техническими трудностями, зимний сезон в рамках выбранной схемы мониторинга не рассматривался. Информация о динамике осадконакопления в этот период реконструировалась по косвенным и литературным данным.

Предварительно для каждой ловушки рассчитывалось количество твёрдого вещества (солевой и коллоидной составляющих), образующегося при испарении 1 г воды:

$$K = m_{\text{соль}} / (10 \times \rho - m_{\text{соль}}),$$

где $m_{\text{соль}}$ – масса сухого остатка после высушивания 10 мл аликвоты (г); ρ – плотность озерной воды из ловушки (г/л). Окончательный расчёт массы осадка бессолевой фазы, попавшего в ловушку за период её экспозиции, производился по формуле:

$$m_{\text{осадка}} = m_{\text{сух}} - K \times (m_{\text{сув}} - m_{\text{сух}}),$$

где $m_{\text{сув}}$ – вес суспензии (г); $m_{\text{сух}}$ – вес сухого остатка после лиофильной сушки (г). Результаты произведённых расчётов сведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчёта массы осаждающегося материала с указанием исходных расчётных параметров
Table 2. Results of calculating the mass of the deposited material, indicating the initial design parameters

Порядковый номер ловушки Trap serial number	Сезон Season	Экспозиция (сутки) Exposition (day)	$m_{\text{сув}}$, г $m_{\text{suв}}$, g	$m_{\text{сух}}$, г $m_{\text{dгy}}$, g	K	$m_{\text{осадка}}$, г m_{sed} , g
1	Весна/Spring	74	5,703	0,205	0,01626	0,1168
2	Лето/Summer	41	9,085	0,308	0,02062	0,1296
3	Лето/Summer	58	9,669	0,290	0,01678	0,1349
4	Осень/Autumn	50	7,616	0,384	0,01636	0,2674
5	Весна/Spring	76	3,369	0,120	0,01958	0,0573
6	Лето/Summer	39	5,602	0,194	0,01926	0,0914
7	Лето/Summer	55	6,448	0,271	0,01843	0,1588
8	Осень/Autumn	49	10,261	0,309	0,01937	0,1192
9	Весна/Spring	74	6,136	0,247	0,01864	0,1385
10	Лето/Summer	41	6,658	0,268	0,01771	0,1563
11	Весна/Spring	76	4,347	0,175	0,01823	0,0100
12	Лето/Summer	70	11,502	0,463	0,01678	0,2610
13	Осень/Autumn	71	8,148	0,328	0,01440	0,2168
14	Весна/Spring	77	5,514	0,222	0,01771	0,1295
15	Осень/Autumn	81	11,654	0,469	0,01471	0,3066

Средняя масса осадка, накопившегося в ловушках за время их экспозиции (три месяца), составляет: в весенний период – 0,1294 г, в летний период – 0,2759 г, в осенний период – 0,3263 г. Скорости накопления осадка, рассчитанные с учётом площади дна ловушки (115 см²), составляют: в весенний период – 0,0011 г/см², в летний – 0,0024 г/см², в осенний – 0,0028 г/см².

Таким образом, выявляются очевидные межсезонные отличия в скоростях седиментационных потоков. Наиболее интенсивно процесс осадконакопления происходит в летне-осенний период, в меньшей мере – весной. По указанной ранее причине подобных данных по зимнему периоду мы не имеем, однако, поскольку с ноября по март оз. Шира находится подо-

льдом и поступление терригенного материала в него крайне ограничено, можно предположить, что зимой процесс седиментации существенно замедляется, и масса выпадающего осадка в этот период минимальна.

Сезонные вариации химического состава осаждающегося материала

Согласно методике пробоподготовки сухой остаток из донной ловушки кроме твёрдого терригенного материала содержит также солевую компоненту, искажающую результаты аналитических исследований. Для вычета вклада солевой составляющей в содержание химических элементов в твердой фазе материала были проанализированы сухие остатки выпаривания

озёрной воды из каждой ловушки. Химический состав твёрдого осадка бессолевой фазы определялся по формуле:

$$C_{эл,ос} = [C_{эл,сух} \times m_{сух} - C_{эл,солев} \times K \times (m_{суе} - m_{сух})] / [m_{сух} - K \times (m_{суе} - m_{сух})],$$

где $m_{суе}$ – вес суспензии; $m_{сух}$ – вес сухого остатка; $C_{эл,сух}$ – концентрация элемента в сухом остатке; K – количество твёрдой солевой фазы, образующейся при испарении 1 г озёрной воды; $C_{эл,солев}$ – концентрация элемента в растворимой и коллоидной фазах (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав осадка донных ловушек оз. Шира без солевой и коллоидной фаз (в ppm)

Table 3. Chemical composition of the sediment of bottom traps of the lake Shira of saltless and colloidal phases (in ppm)

Порядковый номер ловушки Trap serial number	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
1	175903	137217	27998,9	146296	6696,4	273,8	128,4	1117,5	71420,4	55,2	127,1
2	254797	170953	28486,7	126807	7523,3	438,1	96,4	1202,8	67386,0	73,3	192,6
3	443146	317009	48134,6	235788	7969,5	211,2	90,1	1246,8	56733,0	41,2	61,9
4	119316	92934	42266,0	433883	6636,7	394,1	86,9	1895,6	68946,3	58,5	57,6
5	181761	142049	33609,8	180327	7892,6	432,6	118,9	1487,4	82526,1	79,7	151,2
6	201687	129137	35633,1	172950	7732,3	350,4	61,0	1572,3	80156,5	54,4	113,6
7	226105	155439	41598,0	197945	6998,2	283,7	91,7	1254,4	59437,6	25,7	69,7
8	120345	86890	18654,2	138715	4192,5	185,7	77,3	1224,1	51977,0	27,2	46,0
9	137225	100511	22374,9	131418	6173,1	204,9	95,7	1099,1	61427,8	45,0	78,3
10	157166	107439	24053,8	115192	5092,7	272,5	27,2	959,9	53908,1	52,2	89,7
11	156364	106216	17745,1	86940	4302,9	240,4	116,3	722,5	55138,7	43,3	100,8
12	196025	127199	18257,8	87015	4074,9	266,5	19,6	689,2	40554,8	36,2	61,5
13	254678	168846	22988,6	127375	3992,3	314,5	46,9	706,2	36522,1	31,1	44,9
14	176167	117411	21416,3	121536	4921,7	170,7	102,8	958,8	67438,6	56,0	79,8
15	272636	124723	20486,5	123102	3613,6	157,6	20,6	789,5	40233,6	23,2	29,7
Порядковый номер ловушки Trap serial number	Zn	Ga	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	
1	428,1	12,4	48,5	882,5	49,9	1029,1	17,5	104,1	7,7	10,6	
2	696,1	18,8	40,9	1199,6	52,7	1254,3	12,6	113,9	5,6	7,9	
3	219,2	6,8	39,7	981,7	23,2	1137,6	8,1	54,0	2,2	5,1	
4	172,3	18,3	17,6	535,0	52,7	2169,6	13,9	82,4	5,2	2,9	
5	290,1	16,7	51,3	869,1	57,6	1277,8	18,8	100,5	6,7	7,2	
6	221,9	24,8	45,8	1049,1	71,9	1475,3	19,4	118,0	8,3	5,7	
7	141,2	9,8	21,7	584,8	29,0	999,8	7,8	54,3	3,3	10,0	
8	159,8	15,7	33,7	1373,7	40,3	1906,9	11,2	72,5	4,4	15,0	
9	224,0	15,1	44,2	845,1	45,2	1122,1	17,0	139,2	5,5	3,2	
10	801,1	12,2	30,7	921,2	53,7	1211,5	11,3	77,0	5,2	12,8	
11	347,1	15,1	49,0	1274,4	37,4	1226,1	13,7	102,0	4,1	3,8	
12	133,8	12,0	26,5	1005,2	34,2	1100,1	7,1	55,7	3,6	4,0	
13	100,7	8,1	24,5	852,0	22,6	1014,3	5,6	35,1	1,6	6,8	
14	211,0	13,8	43,0	1140,8	46,6	1069,3	12,4	101,7	6,1	4,2	
15	105,8	10,9	32,7	881,0	25,7	1169,7	5,8	44,4	2,5	9,0	

Сравнительный анализ усредненных нормализованных по минимаксной методике концентраций элементов в донных осадках озера Шира показал, что седиментационный материал разных сезонов отличается по своему химическому составу (табл. 4). Весенние порции осаждающегося материала обладают повышенными концентрациями As, Cr, Y, Zr, Fe, Nb, Ni,

Rb, Cu; летние обогащены Ti, V, K; S, Zn, Cl; осенние – Sr, Mo и Ca (рис. 1).

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить сезонные особенности процесса осадконакопления, выражающиеся в различии массы осаждающегося седиментационного материала, а также его химического состава.

Таблица 4. Усреднённые нормализованные по минимаксной методике сезонные концентрации элементов в донных осадках оз. Шира

Table 4. Average seasonal concentrations of elements in bottom sediments of Lake Shira

Сезон Season	Элементы Elements										
	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
Весна/Spring	0,142	0,147	0,226	0,133	0,547	0,381	0,877	0,322	0,675	0,577	0,477
Лето/Summer	0,393	0,352	0,492	0,199	0,678	0,521	0,508	0,385	0,504	0,424	0,420
Осень/Autumn	0,224	0,137	0,275	0,343	0,228	0,376	0,306	0,385	0,280	0,207	0,091
	Zn	Ga	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	
Весна/Spring	0,285	0,435	0,878	0,557	0,502	0,124	0,743	0,715	0,664	0,241	
Лето/Summer	0,383	0,407	0,493	0,503	0,437	0,168	0,395	0,420	0,467	0,387	
Осень/Autumn	0,048	0,359	0,282	0,448	0,259	0,483	0,255	0,226	0,275	0,455	

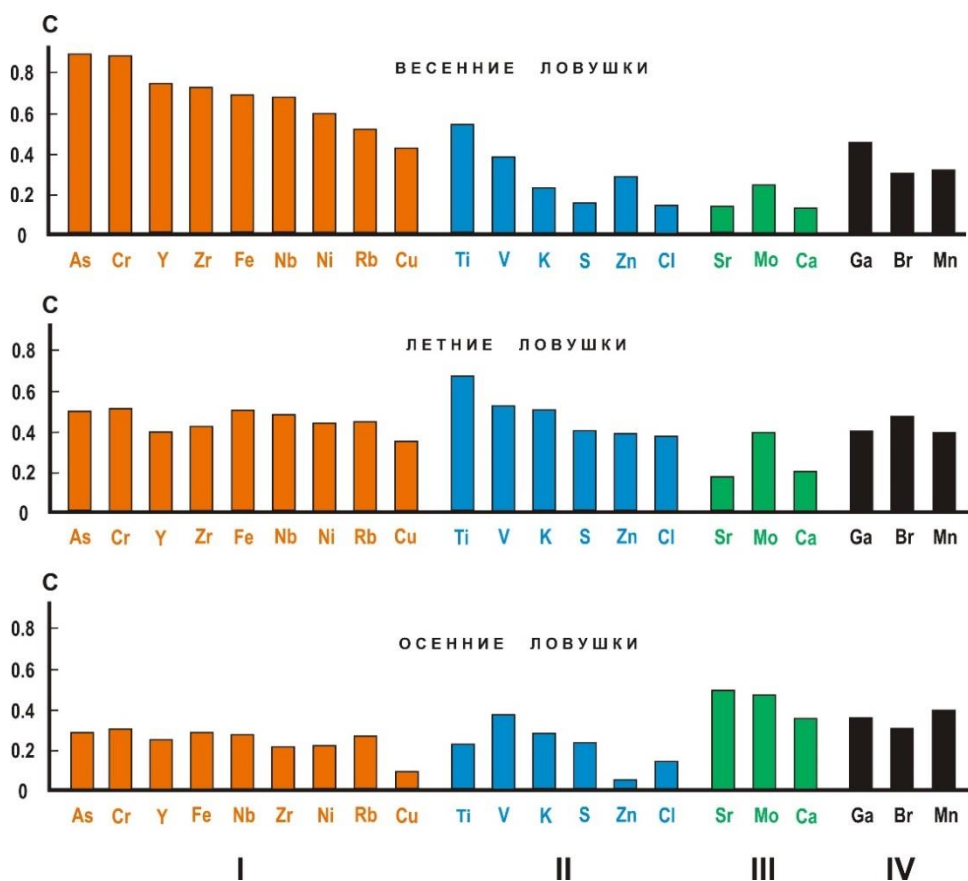


Рис. 1. Типизация химических элементов по особенностям сезонной концентрации в донных ловушках оз. Шира: I – элементы, концентрация которых достигает максимума в весенний период; II – элементы, концентрация которых достигает максимума в летний период; III – элементы, концентрация которых достигает максимума в осенний период; IV – элементы, не имеющие очевидно сезонной привязки. По вертикальной оси указаны концентрации элементов, преобразованные по процедуре минимаксной нормализации (С)

Fig. 1. Typification of chemical elements according to the characteristics of seasonal concentration in bottom traps of Lake Shira: I – elements, which concentration reaches maximum in spring; II – elements, which concentration reaches maximum in summer; III – elements, which concentration reaches maximum in autumn; IV – elements that have no obvious seasonal reference. The vertical axis shows the concentrations of elements converted by the minimax normalization procedure (C)

Связь сезонных седиментационных потоков с региональными температурами

Одним из важнейших метеопараметров, влияющих на процесс осадконакопления, является температура приповерхностного воздуха, которая опосредованно регулирует поступление в водоём аллохтонного материала, образование хемогенных и биогенных осадков.

Для проверки предположения о связи массы и химического состава поступающего в водоём материала не только с календарными сезонами на качественном уровне, но и с непрерывным внутригодовым температурным рядом была использована информация о среднемесячных температурах приповерхностного воздуха по результатам инструментальных наблюдений на метеостанции Шира [19] за период 2012–2017 гг.

Поскольку средняя экспозиция сезонных ловушек составляет два месяца, т. е. накопленный в них материал есть результат седиментационного процесса в течение двух предыдущих месяцев до момента снятия ловушки, температурные показатели также были приведены к средним двухмесячным значениям.

Сопоставление средних двухмесячных температур с интерполированными на месячную временную шкалу значениями масс выпадающего осадочного материала показало наличие между этими величинами незначительной положительной корреляционной зависимости ($r=0,13$). Однако при сдвиге кривой массонакопления вниз по временной шкале коэффициент корреляции резко возрастает, достигая максимума (0,66) при смещении на два месяца (рис. 2–4).

Таким образом, устанавливается достаточно высокая статистически достоверная ($n=44$, $p=0,99$) зависимость массы седиментационного потока от регионального температурного режима, при этом наблюдается двухмесячное временное запаздывание процесса осадконакопления от благоприятных погодных-климатических условий.

С привлечением метода множественной регрессии была также проанализирована связь региональных температур с химическим составом осаждающегося материала. В результате была получена регрессионная модель, позволяющая с достаточно высокой точностью восстанавливать значения средних двухмесячных температур приповерхностного воздуха:

$$\text{Темп.} = -0,085 \text{ Cr} - 0,143 \text{ Ni} - 0,511 \text{ As} + 0,0158 \text{ Sr} - 0,619 \text{ Y} - 0,082 \text{ Zr} - 1,204 \text{ Nb} + 24,853.$$

При этом кросскорреляционным анализом установлено, что максимальная корреляция ($r=+0,94$, $n=44$, $P=0,999$) между температурной кривой и её реконструкцией достигается при сдвиге последней

вниз по временной шкале на три месяца (рис. 5–7). Данный факт позволяет предполагать, что время осаждения основной массы аллохтонного вещества, попадающего в водоём, составляет в среднем около трёх месяцев.

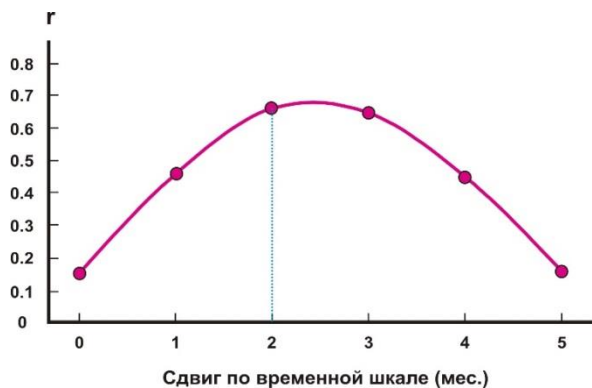


Рис. 2. Correlogram, отображающая изменение корреляции между средними двухмесячными температурами и массой выпадающего осадка при сдвиге вниз по временной шкале

Fig. 2. Correlogram showing the change in the correlation between the average two-month temperatures and the mass of precipitation when shifted down the time scale

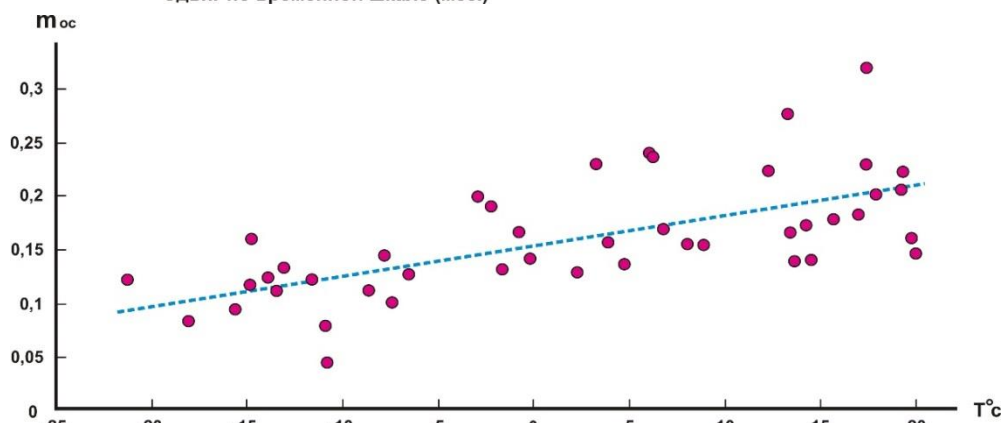


Рис. 3. График корреляционной зависимости средних двухмесячных температур приповерхностного воздуха (T °C) и массы осаждающегося материала ($m_{ос}$) с учётом двухмесячного запаздывания

Fig. 3. Graph of the correlation dependence of the average two-month temperatures of the near-surface air (T °C) and the mass of the deposited material ($m_{ос}$), taking into account a two-month delay

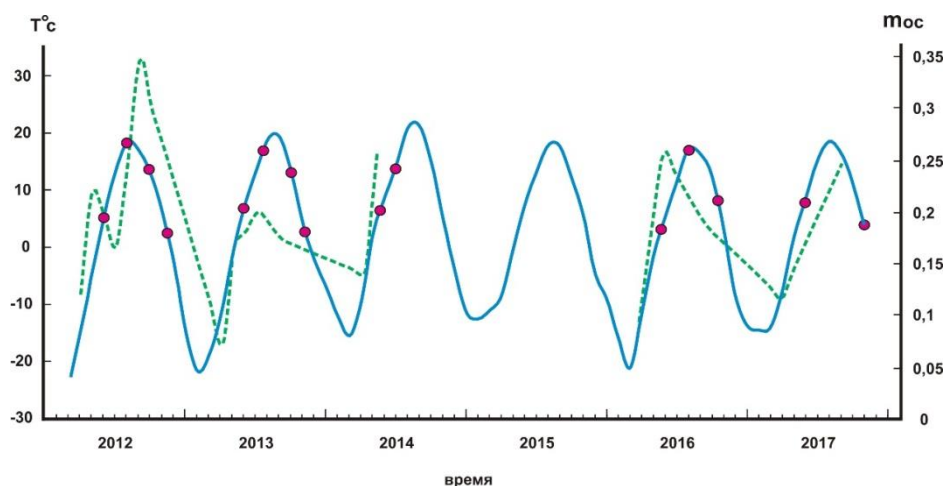


Рис. 4. Сопоставление средних двухмесячных значений инструментально измеренных температур приповерхностного воздуха T °C (сплошная линия) и массы выпадающего осадка $m_{ос}$ (штриховые линии). Точками обозначена временная привязка снятия ловушек. Линии масс выпадающих осадков сдвинуты влево по временной шкале на два месяца

Fig. 4. Comparison of the two-month average values of the instrumentally measured temperatures of the near-surface air T °C (solid line) and the mass of precipitation $m_{ос}$ (dashed lines). The dots indicate the timing of the removal of traps. The mass lines of precipitation are shifted to the left on the time scale by two months

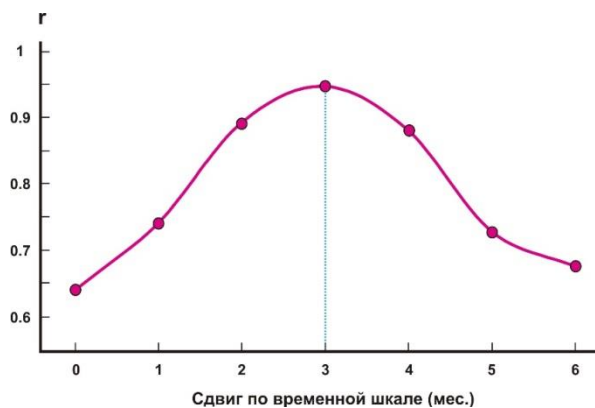


Рис. 5. Коррелограмма, отображающая изменение корреляции между средними двухмесячными температурами и их реконструкцией по уравнению регрессии при сдвиге реконструкции вниз по временной шкале

Fig. 5. Correlogram showing the change in the correlation between the average two-month temperatures and their reconstruction according to the regression equation when the reconstruction is shifted down the time scale

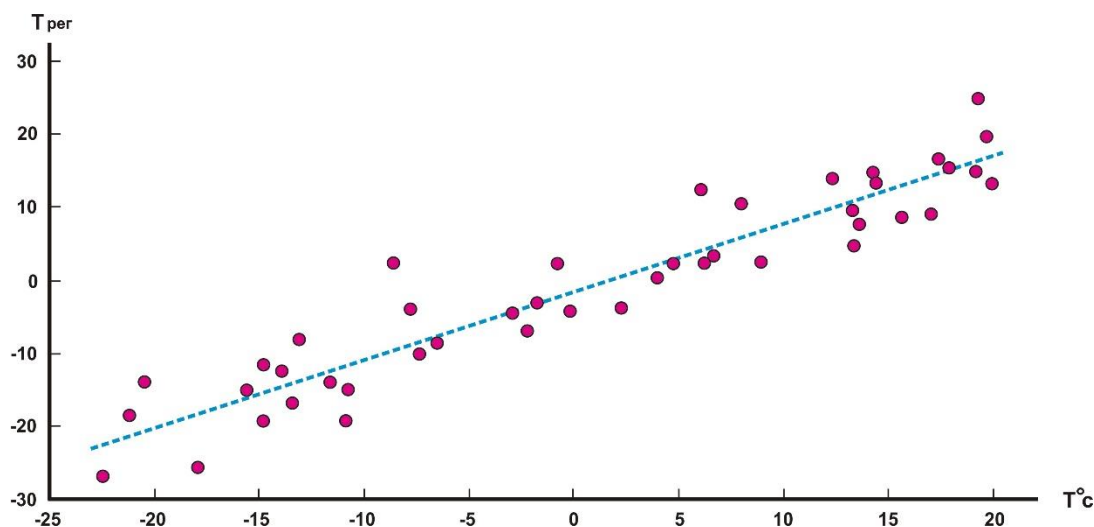


Рис. 6. График корреляционной зависимости средних двухмесячных температур приповерхностного воздуха ($T^{\circ}\text{C}$) и её реконструкции по регрессионной функции, построенной по химическому составу осадочного материала ($T_{\text{рег}}$)

Fig. 6. Graph of the correlation dependence of the average two-month temperatures of the near-surface air ($T^{\circ}\text{C}$) and its reconstruction according to the regression function constructed from the chemical composition of sedimentary material ($T_{\text{рег}}$)

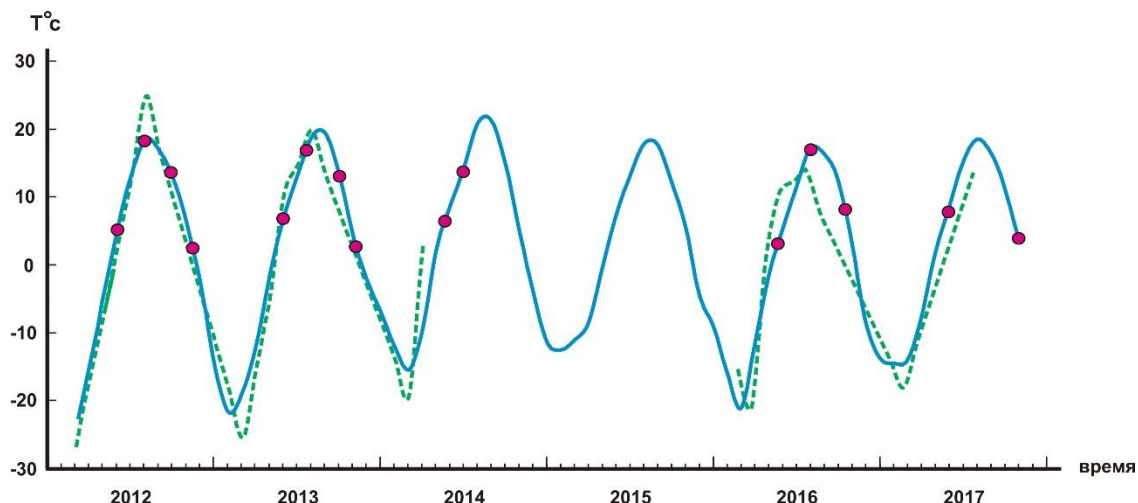


Рис. 7. Сопоставление инструментально измеренных средних двухмесячных температур приповерхностного воздуха (сплошная линия) с их реконструкцией по химическому составу проб (штриховые линии). Точками обозначена временная привязка снятия ловушек. Линии реконструкций сдвинуты вниз по временной шкале на три месяца

Fig. 7. Comparison of instrumentally measured average two-month temperatures of near-surface air (solid line) with their reconstruction according to the chemical composition of samples (dashed lines). The dots indicate the timing of the removal of traps. Reconstruction lines were shifted down the timeline by three months

Динамическая модель сезонного осадконакопления оз. Ши́ра

Типичные варвы представляют собой чередование светлых и тёмных слоёв осадка, обусловленных гидрологическим режимом озера, который, в свою очередь, связан с сезонностью процесса осадкообразования. Светлый, более мощный слой состоит из частиц крупного (песчано-алевритистого) размера, которые осаждаются в период активного стока воды в весенне-летний и частично осенний период и условно называется «летним». Тёмный, значительно более тонкий слой сложен глинистым материалом, отлагающимся в осенне-зимний период и называется «зимним» [20–24].

Керны современных донных илов оз. Ши́ра имеют хорошо выраженную субмиллиметровую ритмичную слоистость из светло-серых, темных и черных слоев. Толщина светлых слоев в сравнении с темными имеет кратное превышение. Таким образом, оз. Ши́ра является типичным представителем водоёмов с ярко выраженным ритмичным осадконакоплением, отображающим сезонные колебания гидрометеорологических условий [25]. С учётом полученных данных о сезонных вариациях массы и состава седиментационного потока и его связи с региональными температурами приповерхностного воздуха динамическая модель осадконакопления представляется следующим образом.

В весенний период за счёт эрозионной деятельности паводковых вод в озеро сносится достаточно большой объём терригенного материала, при этом наблюдается его неравномерное осаждение. Наиболее крупные алевритовые частицы достаточно быстро оседают на дно водоёма, о чём свидетельствуют повышенные концентрации «терригенных» элементов в весенних ловушках – Fe, Ni, Rb, Y, Zr, Cr, Nb и др. [16, 20]. Более мелкие глинистые частицы достаточно долго остаются во взвешенном состоянии и осаждаются на протяжении двух–трех месяцев, захватывая и летний сезон. Этим объясняется сравнительно небольшие массы осадочного материала, выпадающего в весенний период. По результатам электронной микроскопии в материале весенних ловушек установлены: кварц, полевой шпат, плагиоклаз, алюмосиликаты, слюдяные частицы, ильменит, титаномагнетит, рутил, циркон, пироксен, амфибол апатит, монацит, гидроокислы железа, барит.

За летний сезон в озере накапливается материала практически в два раза больше, чем весной. Это обусловлено продолжающимся осаждением частиц, вброшенных весенними тальми водами, сносом терригенного материала летними водотоками, а также биопродукцией. Осадки данного сезона характеризуются более низкими, чем весенние, концентрациями «терригенных» элементов, при этом в них наблюдается повышение содержания K, Cl, S. В летних ловушках кроме упомянутых выше минералов наблюдается большое количество диатомовых, органических пеллет, травинок, окисленных сульфидов железа, цинка, а также солевой агрегат – пластинки галита, сульфатные кристаллические пакеты, кальцит, мирабилит. Это говорит о том, что в этот период при про-

гревании водной толщи процесс осадконакопления контролируется как физико-химическими, так и биогенными факторами.

Накопление материала в осенний период незначительно превышает по массе летний привнос. Продолжается осаждение аллохтонного терригенного материала летнего сноса при более ограниченном объёме поставки алюмосиликатов осенними водотоками. В осенних ловушках, кроме обычного набора аллохтонных частиц породообразующих минералов, возрастает доля химически осажденных микрокристаллов: кальцита (3–8 мкм), Mg-кальцита, доломита, арагонита, пирита (фраamboиды), сфалерита, а также органических остатков – кремнистых скелетов диатомовых, травинок, растительных волокон и частиц фитопланктона. Последние, как правило, содержат еще и Vg. В целом количество водорастворимых солей, по сравнению с летними ловушками, существенно уменьшается, а преобладают в основном карбонаты. Только в осенних ловушках обнаруживаются частицы Sr-содержащего кальцита величиной до 50 мкм, имеющего структуру карбонатного микростроматолита. Этим объясняются наиболее высокие, по сравнению с другими сезонами, концентрации в седиментационном материале Ca, Mo и особенно Sr. По термодинамическим расчётам повышение растворимости Sr происходит в тёплой среде [16, 26] в противоположность кальциту. Этот факт позволяет предполагать наличие временного запаздывания процесса прогревания большого водного бассейна от высоких летних температур.

В зимний период, в условиях ледостава, поступление аллохтонного материала и выпадение продуктов биопродуцирования резко сокращается [27, 28]. Процесс осадкообразования сводится к осаждению мелких глинистых частиц, попавших в озеро осенью, образованию карбоната в результате окисления органического вещества, накопленного в предыдущие сезоны, а также выпадению его из раствора за счет понижения температуры воды и повышения её солёности [16]. В силу этих обстоятельств накопление осадочного материала в озере в зимний сезон минимально.

Основные выводы

Изучение материала из донных ловушек, собранного в 2012–2017 гг., показало, что наиболее интенсивное осаждение материала происходит в летне-осенний период, в меньшей мере – в зимне-весенний. При этом весной преобладает аккумуляция аллохтонного (терригенного) алевритового материала, поступающего с паводковыми водами, что отражается и в его химическом составе: осадки, выпадающие в весенний период, характеризуются повышенными концентрациями «терригенных» элементов – As, Cr, Y, Zr, Fe, Nb, Ni, Rb, Cu. В летне-осенний период одновременно с осаждением кластогенного пелитового материала в осадках накапливаются в больших количествах биогенный и хемогенный материалы. При этом если в летних осадках соли представлены галитом, мирабилитом, кальцитом, то в осенних преобладают карбонаты – кальцит, доломит, стронцианит. Соот-

ветственно, летние отложения отличаются повышенными содержаниями K, Cl, S, осенние – Sr, Ca, Mo. В зимний период кластогенные и биогенные процессы осадконакопления практически прекращаются, наблюдается лишь хемогенное осаждение карбонатов. Таким образом, по классификации Ю.А. Жемчужникова [21], оз. Шира может быть отнесено к солёным озёрам смешанного осадконакопления, в которых осаждается материал разного генезиса – кластогенного, биогенного и хемогенного.

Известно, что мощность годовых слоёв в варвных отложениях коррелирует с годовыми региональными температурами [21, 29]. Однако наши исследования показали, что седиментационные потоки, формирующие донные озёрные отложения, намного более чувствительны к температурным вариациям. Устанавливается не только зависимость массы и химического состава накапливающегося осадочного материала от календарного сезона его накопления, но и высокая статистически достоверная линейная связь с непрерывным внутrigодовым временным рядом средних двухмесячных температур на достаточно протяжённом временном интервале. Кроме того, кросскорреляционным анализом установлен также факт временного запаздывания процесса выпадения осадка на дно водоёма от температуры приповерхностного воздуха, т. е. осаждение основной массы аллохтонного материала, попавшего в водоём, происходит в течение двух–трех месяцев. Такое же временное запаздывание отклика на температурные флуктуации проявляется и при выпадении хемогенных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Palaeoenvironmental changes during the last 1600 years inferred from the sediment record of a cirque lake in southern Patagonia (Laguna Las Vizcachas, Argentina) / M. Fey, C. Korr, C. Ohlendorf, B. Zolitschka, N.I. Maidana, M.L. Carrevedo, H. Corbella, S. Dietrich, F. Schäbitz, A. Lücke, T. Haberzettl, G. Kuhn, C. Mayr, M.M. Paez, F.A. Quintana // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009. – V. 281. – P. 363–375.
2. Late Quaternary hydrological changes inferred from lake level fluctuations of Nam Co (Tibetan Plateau, China) / G. Daut, R. Mäusbacher, J. Baade, G. Gleixner, E. Kroemer, I. Mügler, J. Wallner, J. Wang, L. Zhu // *Quaternary International*. – 2010. – V. 218. – Iss. 1–2. – P. 86–93.
3. A multi-proxy approach to reconstruct hydrological changes and Holocene climate development of Nam Co, Central Tibet / I. Mügler, G. Gleixner, F. Günther, R. Mäusbacher, G. Daut, B. Schütt, J. Berking, A. Schwalb, L. Schwark, B. Xu, T. Yao, L. Zhu, C. Yi // *Journal of Paleolimnology*. – 2010. – V. 43. – P. 625–648.
4. A reconstruction of the thawing of the permafrost during the last 170 years on the Taimyr Peninsula (East Siberia, Russia) / A.P. Fedotov, M.A. Phedorin, I.V. Enushchenko, K.E. Vershinin, M.S. Melgunov, T.V. Khodzher // *Global and Planetary Change*. – 2012. – V. 98–99. – P. 139–152.
5. Indian ocean summer monsoon (IOSM)-dynamics within the past 4 ka recorded in the sediments of lake Nam Co, central Tibetan plateau (China) / T. Kasper, T. Haberzettl, S. Doberschütz, G. Daut, J. Wang, L. Zhu, N. Nowaczyk, R. Mäusbacher // *Quaternary Science Reviews*. – 2012. – V. 39. – P. 73–85.
6. Лозовик П.А., Кулик Н.В., Ефременко Н.А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // *Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология*. – Петрозаводск: ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2020. – № 4. – С. 62–74.

Всё это свидетельствует об определённой инертности природных процессов и явлений, связанных причинно-следственными связями.

Варвы представляют собой важный источник палеоклиматической информации. При этом информационная насыщенность годичного слоя несёт кумулятивный характер, поскольку складывается из информационного вклада разнообразных природных процессов, участвующих в его формировании. В данной работе объектом исследования являлись не уже сформированные годичные слои, которые мы наблюдаем в кервах озёрных осадков, а седиментационный материал разного генезиса, из которого они формируются. Поэтому нельзя с полной уверенностью утверждать, что полученные в данной работе закономерности могут быть напрямую применены к керновому материалу. Однако, предполагая, что информация об установленной связи химического состава седиментационных потоков с температурным региональным режимом сохраняется в достаточно детерминированной форме и на уровне годичных слоёв, можно надеяться, что привлечение для анализа образцов донных осадков метода РФА-СИ может позволить строить палеотемпературные хронологии с сезонным и более высоким разрешением.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН, поддержанному Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, при частичной поддержке РФФИ – грант 21-54-52001 (установка ловушек, пробоотбор) и грант 19-05-50046 (микро-РФА-СИ).

7. Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. – New Jersey, USA: The Blackburn Press. Caldwell, 1983. – 316 p.
8. Environmental changes since 8.4 ka reflected in the lacustrine core sediments from Nam Co, central Tibetan Plateau, China / L. Zhu, Y. Wu, J. Wang, X. Lin, J. Ju, M. Xie, M. Li, R. Mäusbacher, A. Schwalb, G. Daut // *The Holocene*. – 2008. – V. 18 (5). – P. 831–839. DOI: 10.1177/0959683608091801
9. Lateglacial and Holocene variation in Aeolian sediment flux over the northeastern Tibetan Plateau recorded by laminated sediments of a saline meromictic lake / S. Mischke, C. Zhang, A. Börner, U. Herzschuh // *Journal of Quaternary Science*. – 2010. – V. 25. – P. 162–177. DOI: org/10.1002/jqs.1288
10. Conditions for deposition of annually laminated sediments in small meromictic lakes: a case study of Lake Suminko (northern Poland) / W. Tylmann, K. Szpakowska, C. Ohlendorf, M. Woszczyk, B. Zolitschka // *Journal of Paleolimnology*. – 2012. – V. 47. – P. 55–70.
11. Laminated lake sediments in northeast Poland: distribution, preconditions for formation and potential for paleoenvironmental investigation / W. Tylmann, B. Zolitschka, D. Enters, C. Ohlendorf // *Journal of Paleolimnology*. – 2013. – V. 50. – P. 487–503.
12. Varves in lake sediments – a review / B. Zolitschka, P. Francus, A.E.K. Ojala, A. Schimmelmann // *Quaternary Science Reviews*. – 2015. – V. 117. – P. 1–41.
13. Tylmann W., Zolitschka B. Annually laminated lake sediments – recent progress // *Quaternary*. – 2020. – V. 5. – P. 1–3. DOI: 10.3390/quat3010005
14. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia / T. Hang, V. Gurbich, D. Subetto, V. Strakhovenko, M. Potakhin, N. Belkina, M.A. Zobkov // *Quaternary International*. – 2019. – V. 524. – P. 13–23. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.03.021
15. Показатели оксидных и аноксидных обстановок современного осадконакопления в соленом озере Шира (Хакасия) по данным высокоразрешающего РФА-СИ замороженных in situ образцов донных осадков / И.А. Калугин, А.В. Дарьин, В.В. Ба-

- бич, Т.И. Маркович, Я. В. Ракшун, Ф. А. Дарьин, Д. С. Сороколетов, Д. Ю. Rogozin // Известия Российской Академии Наук. Серия физическая. – 2019 – Т. 83. – № 2. – С. 247–252.
16. Физико-химические условия сезонного осаждения карбонатов в озере Ши́ра (Хакасия) / Г.А. Третьяков, И.А. Калугин, А.В. Дарьин, Д.Ю. Rogozin, А.Г. Дегерменджи // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 446. – № 2. – С. 197–200.
17. Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia / S. Hildebrandt, S. Müller, I.A. Kalugin, A.V. Dar'in, M. Wagner, D.Yu. Rogozin, P.E. Tarasov // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2015. – V. 426. – P. 75–84.
18. Реконструкция уровня оз. Ши́ра за последние 1500 лет на годовой временной шкале (по данным рентгенофлуоресцентного микроанализа на пучках синхротронного излучения) / А.В. Дарьин, И.А. Калугин, М.А. Максимов, Д.Ю. Rogozin, Я.В. Ракшун, Ф.А. Дарьин, Д.С. Сороколетов // Известия Российской Академии Наук. Серия физическая. – 2015. – Т. 79. – № 1. – С. 141–145.
19. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТ) // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. 2008 URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 15.05.2021).
20. Александрин М.Ю. Отложения приледниковых озёр – основа для создания непрерывных летописей истории голоценового оледенения // Палеогляциология. Лёд и Снег. – 2015. – № 1 (129). – С. 89–102. DOI: 10.15356/IS.2015.01.08.
21. Жемчужников Ю.А. Сезонная слоистость и периодичность осадконакопления // Труды ГИН АН СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – Вып. 86. – С. 69.
22. Иванов М.Н. Метод отбора озёрных отложений для палеогляциологических реконструкций // Водные ресурсы, экология и гидрогеологическая безопасность: Шестая международная научная конференция. – М.: ИВП РАН, 2012. – С. 206–210.
23. Микроаналитические исследования замороженных образцов современных донных осадков оз. Ши́ра / А.В. Дарьин, Д.Ю. Rogozin, И.А. Калугин, В.В. Бабич, Т.И. Маркович, Ф.А. Дарьин, Я.В. Ракшун // Геология морей и океанов: материалы XXIII международной научной конференции по морской геологии. – М., 18–22 ноября 2019. – Т. 1. – С. 79–84.
24. The first Holocene varve chronology for the UK: based on the integration of varve counting, radiocarbon dating and tephrostratigraphy from Diss Mere (UK) / C.M. Puertas, A.A. Walsh, S.P.E. Blockley, P. Harding, G.E. Biddulph, A. Palmer, A. Ramisch, A. Brauer // Quaternary Geochronology. – 2021. – V. 61. – P. 101–134.
25. Rogozin D.Yu. Меромиктические озера Северо-Минусинской котловины: закономерности стратификации и экология фототрофных серных бактерий. – Красноярск: Изд-во ИФ СО РАН, 2019. – 242 с.
26. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия / пер. с англ. – М.: Изд-во «Мир», 1968. – 371 с.
27. Распределение и состав взвешенных веществ в воде и снежном покрове в Калининградском заливе / В.А. Чечко, В.Ю. Топчая, Б.В. Чубаренко, В.А. Пилипчук // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 1. – С. 37–46. DOI: 10.7868/S0321059616010053.
28. A seasonal cycle of terrestrial inputs in Lake Van, Turkey / C. Huguet, S. Fietz, N. Moraleda, T. Heumann, G. Litt, M. Stockhecke, F.S. Anselmetti, M. Sturm // Environmental Science and Pollution Research International. – 2012. – V. 19 (8). – P. 3628–3635. DOI: 10.1007/s11356-012-0948-3.
29. Leonard E.M. Varve studies at Hector Lake, Alberta, Canada and the relationship between glacial activity and sedimentation // Quaternary Research. – 1986. – V. 25. – Iss. 2. – P. 199–214.

Поступила 28.10.2021 г.

Информация об авторах

Бабич В.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Дарьин А.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Калугин И.А., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Маркович Т.И., кандидат химических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Зыков В.В., кандидат биологических наук, младший научный сотрудник Института биофизики СО РАН.

Рогозин Д.Ю., доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института биофизики СО РАН.

UDC 550.42: 504.455: 551.583.1

SEASONAL VARIABILITY OF SEDIMENTATION FLOWS IN SALT MEROMICTIC LAKE SHIRA (KHAKASSIA)

Valery V. Babich¹,
vbabich@igm.nsc.ru

Andrey V. Darin¹,
avd@igm.nsc.ru

Ivan A. Kalugin¹,
ikalugin@igm.nsc.ru

Tatyana I. Markovich¹,
mark@igm.nsc.ru

Viktor V. Zykov²,
rogozin@ibp.ru

Denis Yu. Rogozin²,
rogozin@ibp.ru

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 360090, Russia.

² Institute of Biophysics SB RAS,
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to study seasonal variations in the volume and composition of sedimentation flows in modern lakes and their relationship with weather and climatic factors, which can serve as a basis for reconstructing climatic changes in the past.

The main aim: to assess seasonal changes in the mass, velocity and chemical composition of sedimentary material entering Lake Shira on the basis of generalization and analysis of the results of multiyear annual monitoring of the material of sedimentation traps incubated in the lake.

Object of the study was the drainless, slightly saline meromictic lake Shira, located in the steppe intermontane depression on the territory of the Republic of Khakassia.

Methods: long-term seasonal monitoring of sedimentary material forming bottom sediments using sedimentation traps incubated in the lake; study of the obtained material for a wide range of parameters (biological, hydrochemical, lithological-geochemical, granulometric, etc.) by various conventional methods, including the method of X-ray fluorescence microanalysis on synchrotron radiation beams (XRF-SI), adapted for the study of bottom samples; computer statistical analysis of the data obtained (multiple regression method, cross-correlation analysis, etc.) in order to identify the relationship between regional temperatures and the chemical composition of the deposited material with the construction of a regression model.

Results. Based on the study of the amount and elemental composition of the sedimentary material of the seasonal bottom traps of Lake Shira, collected for 2012–2017, a dynamic model of the seasonal influx of sedimentary flows in lakes of this landscape-geochemical type was formulated. It has been established that the most intensive sedimentation of the material occurs in the summer-autumn period, less – in the winter-spring period. At the same time, in spring, the accumulation of allochthonous (terrigenous) aleurite material, supplied with flood waters, predominates; in the summer-autumn period, simultaneously with the deposition of clastogenic pelitic material, biogenic and chemogenic materials are accumulated in sediments in large quantities. In winter, clastogenic and biogenic processes of sedimentation practically stop, only chemogenic sedimentation of carbonates is observed. It was established that the sedimentation of allochthonous material entering the reservoir occurs during two–three months, which indicates a certain inertness of sedimentation. The presence of a stable relationship between the mass and chemical composition of terrigenous material entering the lake with the regional temperature of the near-surface air, which is one of the main regulators of the water balance of the reservoir, is shown.

Key words:

Bottom sediments, sedimentation traps, salt lakes, micro-XRF, synchrotron radiation, regression analysis.

The work was carried out on state assignment of IGM SB RAS, supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, with partial support of the RFBR - grant 21-54-52001 (setting of traps, sampling) and grant 19-05-50046 (micro-XRF-SR).

REFERENCES

1. Fey M., Korr C., Maidana N.I., Carrevedo M.L., Corbella H., Dietrich S., Haberzettl T., Kuhn G., Lücke A., Mayr C., Ohlendorf C., Paez M.M., Quintana F.A., Schäbitz F., Zolitschka B. Palaeoenvironmental changes during the last 1600 years inferred from the sediment record of a cirque lake in southern Patagonia (Laguna Las Vizcachas, Argentina). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, vol. 281, pp. 363–375. DOI: 10.1016/j.palaeo.2009.01.012
2. Daut G., Mäusbacher R., Baade J., Gleixner G., Kroemer E., Mügler I., Wallner J., Wang J., Zhu L. Late Quaternary hydrological changes inferred from lake level fluctuations of Nam Co (Tibetan Plateau, China). *Quaternary International*, 2010, vol. 218, Iss. 1–2, pp. 86–93. Available at:

- <https://doi.org/10.1016/j.quaint>. 2010.01.001 (accessed 15 September 2021).
3. Mügler I., Gleixner G., Günther F., Mäusbacher R., Daut G., Schütt B., Berking J., Schwalb A., Schwark L., Xu B., Yao T., Zhu L., Yi C. A multi-proxy approach to reconstruct hydrological changes and Holocene climate development of Nam Co, Central Tibet. *Journal of Paleolimnology*, 2010, vol. 43, pp. 625–648.
 4. Fedotov A.P., Phedorin M.A., Enushchenko I.V., Vershinin K.E., Melgunov M.S., Khodzher T.V. A reconstruction of the thawing of the permafrost during the last 170 years on the Taimyr Peninsula (East Siberia, Russia). *Global and Planetary Change*, 2012, vol. 98–99, pp. 139–152. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.09.002> (accessed 15 September 2021).
 5. Kasper T., Haberzettl T., Doberschütz S., Daut G., Wang J., Zhu L., Nowaczyk N., Mäusbacher R. Indian ocean summer monsoon (IOSM)-dynamics within the past 4 ka recorded in the sediments of lake Nam Co, central Tibetan plateau (China). *Quaternary Science Reviews*, 2012, vol. 39, pp. 73–85. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.02.11> (accessed 15 September 2021).
 6. Lozovik P.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. Litofilnye element i tyazhelye metally v Onezhskom ozere: istochniki postupleniya, sodержanie i transformatsiya [Lithophilic elements and heavy metals in Lake Onega: sources of input, content and transformation]. *Trudy Karelskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Limnologiya* [Labors of Karelian Research Center of Russian Academy of Science. Ser. Limnology]. Petrozavodsk, Federal Research Center «Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences» Publ., 2020. No. 4, pp. 62–74. DOI: 10.17076/lim1189
 7. Hakanson L., Jansson M. *Principles of Lake Sedimentology*. New Jersey, USA, The Blackburn Press. Caldwell, 1983. 316 p.
 8. Zhu L., Wu Y., Wang J., Lin X., Ju J., Xie M., Li M., Mäusbacher R., Schwalb A., Daut G. Environmental changes since 8.4 ka reflected in the lacustrine core sediments from Nam Co, central Tibetan Plateau, China. *The Holocene*, 2008, vol. 18 (5), pp. 831–839. DOI: 10.1177/0959683608091801
 9. Mischke S., Zhang C., Börner A., Herzschuh U. Late glacial and Holocene variation in Aeolian sediment flux over the northeastern Tibetan Plateau recorded by laminated sediments of a saline meromictic lake. *Journal of Quaternary Science*, 2010, vol. 25, pp. 162–177. DOI: [org/10.1002/jqs.1288](https://doi.org/10.1002/jqs.1288)
 10. Tylmann W., Szpakowska K., Ohlendorf C., Woszczyk M., Zolitschka B. Conditions for deposition of annually laminated sediments in small meromictic lakes: a case study of Lake Suminko (northern Poland). *Journal of Paleolimnology*, 2012, vol. 47, pp. 55–70.
 11. Tylmann W., Zolitschka B., Enters D., Ohlendorf C. Laminated lake sediments in northeast Poland: distribution, preconditions for formation and potential for paleoenvironmental investigation. *Journal of Paleolimnology*, 2013, vol. 50, pp. 487–503.
 12. Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E.K., Schimmelmann A. Varves in lake sediments – a review. *Quaternary Science Reviews*, 2015, vol. 117, pp. 1–41.
 13. Tylmann W., Zolitschka B. Annually laminated lake sediments – recent progress. *Quaternary*, 2020, vol. 5, pp. 1–3. DOI: 10.3390/quat3010005
 14. Hang T., Gurbich V., Subetto D., Strakhovenko V., Potakhin M., Belkina N., Zobkov M. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia. *Quaternary International*, 2019, vol. 524, pp. 13–23. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.03.021
 15. Kalugin I.A., Dar'in A.V., Babich V.V., Markovich T.I., Rakshun Ya.V., Dar'in F.A., Sorokoletov D.S., Rogozin D.Yu. Indicators of oxide and anoxide environments of modern sedimentation in the salt lake Shira (Khakasia) according to the data of high-resolution XRF-SR frozen in situ samples of bottom sediments. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical series*, 2019, vol. 83, no. 2, pp. 247–252. In Rus.
 16. Tretyakov G.A., Kalugin I.A., Dar'in A.V., Rogozin D.Yu., Degermendzhi A.G. Physicochemical conditions of seasonal sedimentation of carbonates in Lake Shira (Khakasia). *Reports of the Academy of Sciences*, 2012, vol. 446, no. 2, pp. 197–200. In Rus.
 17. Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I.A., Dar'in A.V., Wagner M., Rogozin D.Yu., Tarasov P.E. Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, vol. 426, pp. 75–84.
 18. Dar'in A.V., Kalugin I.A., Maximov M.A., Rogozin D.Yu., Rakshun Ya.V., Dar'in F.A., Sorokoletov D.S. Reconstruction of the level of the lake. Shira over the past 1500 years on an annual time scale (according to X-ray fluorescence microanalysis data using synchrotron radiation beams). *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical series*, 2015, vol. 79, no. 1, pp. 141–145. In Rus.
 19. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. Opisaniye massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukh i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR). Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620942. 2008 [Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR). Certificate of state registration of the database No. 2014620942. 2008] Available at: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#description-data-mass> (accessed 15 May 2021).
 20. Alexandrin M.Yu. Periglacial lake deposits – the basis for the creation of continuous chronicles of the history of the Holocene glaciation. *Paleoglaciology. Ice and Snow*, 2015, no. 1, vol. 129, pp. 89–102. DOI: 10.15356 / IS.2015.01.08.
 21. Zhemchuzhnikov Yu.A. Sezonnaya sloistost i periodichnost osadkonakopleniya [Seasonal layering and periodicity of sedimentation]. *Proceedings of the GIN AN SSSR*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1963. Iss. 86, pp. 69.
 22. Ivanov M.N. Metod otbora ozernykh otlozheniy dlya paleoglyatsiologicheskikh rekonstruktsii [Method of selection of lake sediments for paleoglaciological reconstructions]. *Shestaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Vodnye resursy, ekologiya i gidrogeologicheskaya bezopasnost* [Sixth international scientific conference. Water resources, ecology and hydrogeological safety]. Moscow, IVP RAS Publ., 2012. pp. 206–210.
 23. Dar'in A.V., Rogozin D.Yu., Kalugin I.A., Babich V.V., Markovich T.I., Dar'in F.A., Rakshun Ya.V. Mikroanaliticheskie issledovaniya zamorozhennykh obraztsov sovremennykh donnykh osadkov ozera Shira [Microanalytical studies of frozen samples of modern bottom sediments of the lake Shira]. *Geologiya morey i okeanov. Materialy XXIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii po morskoy geologii* [Geology of seas and oceans. Materials of the XXIII international scientific conference on marine geology]. Moscow, 18–22 November 2019. Vol. 1, pp. 79–84.
 24. Puertas C.M., Walsh A.A., Blockley S.P.E., Harding P., Biddulph G.E., Palmer A., Ramisch A., Brauer A. The first Holocene varve chronology for the UK: based on the integration of varve counting, radiocarbon dating and tephrostratigraphy from Diss Mere (UK). *Quaternary Geochronology*, 2021, vol. 61, pp. 101–134.
 25. Rogozin D.Yu. *Meromekticheskie ozera Severo-Minusinskoj kotloviny: zakonomernosti stratifikatsii i ekologiya fototrofnikh sernykh bakteriy* [Meromictic lakes of the Severo-Minusinsk depression: regularities of stratification and ecology of phototrophic sulfur bacteria]. Krasnoyarsk, Institute of Philosophy SB RAS Publ. house, 2019. 242 p.
 26. Garrels R.M., Christ Ch.L. *Rastvory, mineraly, ravnovesiya* [Solutions, minerals, equilibria]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1968. 371 p.
 27. Chechko V.A., Topchaya V.Yu., Chubarenko B.V., Pilipchuk V.A. Distribution and composition of suspended solids in water and snow cover in the Kaliningrad Bay. *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 37–46. In Rus. DOI: 10.7868 / S0321059616010053.
 28. Huguet C., Fietz S., Moraleda N., Heumann T., Litt G., Stockhecke M., Anselmetti F.S., Sturm M. A seasonal cycle of terrestrial inputs in Lake Van, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2012, vol. 19 (8), pp. 3628–3635. DOI: 10.1007/s11356-012-0948-3.
 29. Leonard E.M. Varve studies at Hector Lake, Alberta, Canada and the relationship between glacial activity and sedimentation. *Quaternary Research*, 1986, vol. 25, Iss. 2, pp. 199–214.

Received: 28 October 2021.

Information about the authors

Valery V. Babich, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Andrey V. Darin, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Ivan A. Kalugin, Dr. Sc., leading researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Tatyana I. Markovich, Cand. Sc., researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Viktor V. Zykov, Cand. Sc., junior researcher, Institute of Biophysics SB RAS.

Denis Yu. Rogozin, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Biophysics SB RAS.