

УДК 551.3.051:550.46:502.51:504.5 (407.22)

## ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА ПРОЦЕССА СОВРЕМЕННОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА (НА ПРИМЕРЕ ОЗ. ЛАМБА, ПЕТРОЗАВОДСК, КАРЕЛИЯ)

**З. И. Слуковский<sup>1</sup>, Н. В. Ильмаст<sup>2</sup>, И. В. Суховская<sup>2</sup>,  
Е. В. Борвинская<sup>2</sup>, М. А. Гоголев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

<sup>2</sup>Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

Представлены данные по химическому составу донных отложений малого городского озера Ламба, расположенного в черте г. Петрозаводска (Республика Карелия). В работе использованы современные прецизионные методы исследования вещества. Химический анализ донных отложений оз. Ламба проводился с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра и масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой. Установлено, что изученные озерные отложения относятся к железистым (лимонитовым) сапропелям с повышенным содержанием органики. Показано, что распределение тяжелых металлов и сопутствующих им микроэлементов в изученных озерных осадках отражает влияние на экосистему водоема промышленных предприятий города, автомобильного и железнодорожного транспорта, а также процессы техногенного загрязнения в результате трансграничного переноса некоторых металлов. Распределение в толще изученной колонки донных отложений V, Cr, Ni указывает на значительное влияние Петрозаводской теплоцентрали (ТЭЦ). Аномально высокие концентрации Pb в слоях осадков связаны с повсеместным загрязнением окружающей среды этим тяжелым металлом вследствие его поступления от выбросов автомобильного транспорта, а также в результате переноса на значительные расстояния ряда поллютантов через атмосферу планеты. Распределение концентраций Co, Cu, Zn, Mo, W отражает воздействие на экосистему озера Ламба выбросов промышленных предприятий машиностроительного комплекса г. Петрозаводска.

Ключевые слова: донные отложения; Республика Карелия; Петрозаводск; озеро Ламба; седиментогенез; тяжелые металлы; антропогенное влияние.

**Z. I. Slukovskii, N. V. Ilmast, I. V. Sukhovskaya, E. V. Borvinskaya,  
M. A. Gogolev. THE GEOCHEMICAL SPECIFICS OF MODERN  
SEDIMENTATION PROCESSES ON THE BOTTOM OF A SMALL LAKE  
LAMBA UNDER TECHNOGENIC IMPACT**

The data on the chemical composition of bottom sediments of the small urban Lake Lamba located in the city of Petrozavodsk (Republic of Karelia) are presented. In this investigation we used modern precision methods for studying matter. Chemical analysis of bottom sediments of Lake Lamba was conducted using X-ray fluorescence spectrometer ARL ADVANT'X and mass spectrometer XSeries-2 ICP-MS. It was established that sediments in the lake are ferruginous (limonite) sapropels with a high content of organic matter. It

is shown that the distribution of heavy metals and their accompanying microelements in the studied freshwater sediments reflects the industrial history of the city of Petrozavodsk and the general man-generated pollution in anthropogenically disturbed territories of the world. The distribution of V, Cr, Ni concentrations in the bottom sediments indicates a significant influence of the Petrozavodsk heating plant. The abnormally high Pb concentrations in the sediment layers are associated with global pollution of the environment by this heavy metal due to its input from traffic emissions. The distribution of Co, Cu, Zn, Mo, W concentrations reflects the impact of industrial enterprises in Petrozavodsk on the ecosystem of Lake Lamba.

**Key words:** bottom sediments; Republic of Karelia; Petrozavodsk; Lake Lamba; sedimentogenesis; heavy metals; human impact.

## Введение

Осадконакопление, или седиментация, – это сложный процесс взаимодействия живого вещества и абиотических компонентов, происходящий на границе лито-, гидро- и биосферы. На техногенно нарушенных территориях этот процесс может приобретать крайне специфический характер, учитывая ту роль, которую играет человечество последние несколько столетий в видоизменении окружающей среды. Известно, что донные отложения (ДО) малых озер, расположенных в пределах антропогенно нарушенной среды, являются хорошими аккумуляторами различных загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты с водосборного бассейна [Даувальтер, 2012]. Кроме того, на формирование химического состава современных осадков может оказывать влияние фактор трансграничного переноса некоторых загрязнителей на огромные расстояния (в том числе Pb), происходящего через атмосферу [Norton et al., 1990; Keinonen, 1992; Даувальтер, 2006]. Таким образом, даже в ДО озер условно-фоновых районов, удаленных от прямого техногенного влияния, могут быть установлены повышенные концентрации таких элементов, как Pb, Cd, Tl, которые, как отмечается в [McConnell, Edwards, 2008], являются продуктами сжигания угля на крупных заводах, начавших свою деятельность еще в середине-конце XIX в. Экосистемы водных объектов промышленных районов и урбанизированной среды подвержены загрязнению значительно большим спектром загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов (ТМ), включающих в свой состав, кроме уже указанных элементов, Hg, As, Zn, V, Ni, Cu, Co, Cr, Mo, W, Mn, что обуславливает образование техногенных илов как особого типа ДО антропогенно нарушенной среды [Саэт и др., 1990; Янин, 2013]. Учитывая интенсивный рост городов и их числа по всему миру в течение XX и начала XXI веков, проблема загрязнения окружающей среды ТМ стала поистине

глобальной проблемой современности, актуальность которой не меняется до сих пор. При этом основу загрязнения по-прежнему составляют выбросы промышленных предприятий, от специфики которых напрямую зависит специфика набора тех или иных ТМ, накапливающихся в геологической и биологической среде. В малых бессточных озерах, расположенных на городских территориях и в промышленно развитых районах, химический состав ДО служит своеобразной летописью техногенных событий прошлого и настоящего, с которыми тесно связаны экологические изменения, то есть изменения на уровне живых организмов, в отдельно взятые периоды времени.

На территории Республики Карелия насчитывается около 61 тыс. озер. Преимущественно это малые озера площадью до 1 км<sup>2</sup>. Устойчивое развитие территории указанного региона РФ напрямую зависит от состояния его водных объектов, в том числе озер, имеющих важное хозяйственное и/или рекреационное значение. Как уже отмечалось выше, водоемы, расположенные вблизи населенных пунктов, в том числе городов, априори подвержены изменениям на уровне биотических и абиотических компонентов экосистем. Однако о степени и глубине этих изменений можно судить только по результатам детального научного исследования, задачей которого может быть выявление определенных маркеров (геохимических, химических, биологических) техногенного присутствия в среде водной экосистемы. Таким образом, целью данной работы является оценка геохимической специфики современных осадочных образований на дне малого озера Ламба, расположенного на территории города Петрозаводска, с учетом как природных, так и техногенных факторов урбанизированной среды.

## Материалы и методы

Озеро Ламба (61°48.428' с. ш. 34°14.967' в. д.) – это небольшой по площади



Рис. 1. Карта-схема расположения района исследования

водоем (0,014 км<sup>2</sup>), расположенный в северо-западной части города Петрозаводска, в микрорайоне Сулажгора (рис. 1). Берега водоема низкие, заболоченные. Из северной части озера Ламба вытекает ручей Студенец, впадающий в реку Томицу. Длина береговой линии составляет 0,58 км [Водные..., 2013]. Средняя глубина водоема равна 3,4 м, максимальная – 5,2 м [Потахин, 2011]. Для воды озера Ламба характерна высокая цветность и низкая прозрачность. Следствием данного факта является бедный видовой состав и низкая плотность фитоперифитона. В фитоперифитоне озера Ламба на немногочисленных макрофитах встречено 29 видов синезеленых, зеленых и диатомовых водорослей [Комулайнен, 2014].

В августе 2015 года с помощью пробоотборника Limnos (Финляндия) была отобрана колонка осадков высотой 55 см в самой глубокой части озера (около 5 м), где происходит максимальное накопление ДО [Потахин, 2011]. Отобранная колонка в полевых условиях разбиралась по пакетам на образцы с интервалом 5 см. Кроме того, в настоящих исследованиях были использованы три пробы ДО, отобранные также из центральной части изучаемого водного объекта в июне 2013 года с помощью дночерпателя Экмана – Берджа и представляющие собой нестратифицированные осадки до глубины 20 см [Слуковский, Медведев, 2015].

Просушивание образцов проб ДО до воздушно-сухого состояния проводилось в лабораторных условиях. Лабораторные исследования выполнялись на базе Аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск. Содержание микроэлементов (Pb, Zn, Cd, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, V, W, Li, Rb, Cs, Sr, Ba)

в пробах ДО определяли масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific).

Разложение образцов ДО для ICP-MS-анализа проводили путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа использовали аналитические навески образцов массой 0,1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводили разложение холостых проб и одного стандартного (контрольного) образца (химический состав донного ила озера Байкал БИЛ-1 – ГСО 7126–94). Подробная методика подготовки проб ДО описана в [Слуковский, 2015].

Содержание главных элементов (оксидов Si, Ti, Al, P, Mn, Mg, Fe, K, Na, Ca) было определено с помощью рентген-флуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT'X (Thermo Fisher Scientific). Подготовка пробы к анализу включала в себя плавление образца и флюса в золото-платиновых тиглях в электроплавильной печи для приготовления образцов Katanax K1 (SPEX SamplePrep), остывание стекловатого расплава и изготовление из него стекляннного диска для измерений. Определение потерь при прокаливании (ППП) проводилось весовым способом после нагревания исследуемых проб до температуры 1100 °С. При исследовании ДО водных объектов данный показатель может служить хорошей количественной характеристикой содержания органики в водных осадках [Даувальтер, 2012]. Концентрации микроэлементов представлены в мг/кг (миллиграммы на килограмм) и в вес. % (весовые проценты).

Для получения микроскопических изображений минералов вивианита и лимонита из изученных донных отложений озера Ламба, а также анализа их химического состава был

Таблица 1. Содержание микроэлементов в различных природных объектах Республики Карелия, мг/кг

	Li	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	W	Pb
1	13,1	49,5	32,0	6,3	20,5	15	49	н/д	128	1,3	н/д	181	н/д	10,4
2	н/д	62,6	30,4	7,1	19,4	32	82	н/д	н/д	0,9	1,4	н/д	0,8	20,6
3	15,1	120,7	53,9	16,1	27,9	57	134	52,5	319	0,9	4,6	615	2,3	25,8
4	39,6	137	141	20,5	60,5	111	241	70,8	83	2,3	2,7	373	1,6	47,6

Примечание. 1 – ДО Карелии [Геохимическое..., 2004], 2 – почвы г. Петрозаводска [Рыбаков и др., 2013], 3 – речные отложения г. Петрозаводска [Слуковский, Светов, 2016], 4 – ДО оз. Четырехверстное (г. Петрозаводск) [Слуковский, Медведев, 2015]), н/д – нет данных.

Таблица 2. Содержание различных веществ и химических элементов в ДО озера Ламба

Вещества и элементы	Образцы проб ДО 2015 года, послойный отбор (глубина в см)											Пробы дночерпателя 2013 года		
	0–5	6–10	11–15	16–20	21–25	26–30	31–35	36–40	41–45	46–50	51–55	01 (б/с)	02 (б/с)	03 (б/с)
SiO <sub>2</sub>	32,0	19,6	27,0	19,9	21,1	20,7	21,0	16,2	14,3	19,8	18,5	24,4	23,9	31,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,0	6,2	4,2	3,5	3,0	2,6	2,8	3,1	2,1	1,7	1,3	5,7	5,1	8,4
Σ(FeO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	20,1	10,2	13,1	9,2	9,1	9,5	10,9	11,9	19,3	19,9	23,8	15,1	13,7	10,5
Na <sub>2</sub> O	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	н/о	н/о	н/о	0,2	0,3	0,8
CaO	1,6	0,7	2,3	2,0	2,2	2,2	3,6	4,3	3,6	2,3	1,6	1,1	1,2	1,6
K <sub>2</sub> O	1,1	1,1	0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,8	0,7	1,4
MgO	1,0	1,1	0,6	0,4	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,2	н/о	0,7	0,7	1,4
MnO	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,2	0,1	0,2
TiO <sub>2</sub>	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	н/о	0,3	0,2	0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,0	0,9	1,5	1,7	1,9	2,4	3,6	4,2	6,0	5,7	3,4	2,6	2,5	1,2
ППП	31,0	58,7	49,4	62,2	61,5	61,3	56,4	58,4	53,1	49,4	50,7	48,3	50,9	42,0
Li	12,1	27,2	7,8	6,1	2,5	1,9	2,0	2,5	1,6	1,0	0,2	15,3	12,4	19,1
V	994	3190	517	117	43	32	26	25	21	16	12	1850	1510	854
Cr	51,5	139,7	34,8	29,1	28,0	29,2	23,6	19,0	15,2	11,6	8,7	90,6	73,1	73,7
Co	17,5	23,6	16,3	14,0	17,2	16,9	17,9	17,0	15,1	12,2	10,3	20,1	18,8	18,1
Ni	176	558	109	36	26	20	19	18	16	13	10	331	225	209
Cu	726	468	111	56	58	56	76	80	61	39	14	383	263	499
Zn	629	475	313	299	377	363	622	868	610	390	88	530	427	452
Rb	28,0	62,2	15,5	11,2	6,5	5,4	6,4	8,2	5,3	2,8	0,3	39,7	31,9	53,3
Sr	59,9	79,6	51,1	55,1	62,8	64,5	115	163,2	107,4	60,0	21,7	68,4	65,3	114
Mo	6,3	6,0	3,8	2,6	3,3	3,2	3,6	3,9	3,4	3,1	1,8	5,9	5,0	2,4
Cd	0,9	0,7	0,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,4	0,2	0,9	0,8	0,6
Ba	571	606	372	667	872	796	989	1190	1520	806	513	526	428	523
W	2,3	1,2	1,9	1,9	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	н/о	н/о	1,9	1,8	1,3
Pb	39	31	50	68	113	124	130	61	29	12	3	52	57	28

Примечание. Содержание главных элементов от SiO<sub>2</sub> до P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и ППП указаны в вес. %, концентрации микроэлементов – в мг/кг; б/с – без стратификации; н/о – ниже предела обнаружения прибора.

использован электронный микроскоп (СЭМ) VEGA II LSH с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350. Важным методическим моментом при изучении образцов проб стало увеличение времени набора спектра в точках анализа до 600 секунд.

Статистическая обработка выполнена с помощью программы Microsoft Excel 2007. При анализе полученных данных рассчитаны следующие коэффициенты, модули и другие математические параметры:

- коэффициент вариации, который рассчитывается как отношение величины стандартного отклонения выборки к среднеарифметическому (невзвешенному) значению, умноженному на 100 и представленному в процентах;
- коэффициент корреляции, рассчитанный по формуле Пирсона (при этом все значения в выборке по каждому химическому элементу или веществу были предварительно нормированы по значению максимума соответствующей выборки);

- алюмокремниевый модуль, который рассчитан по формуле  $Al_2O_3/SiO_2$  [Интерпретация..., 2001];
- модуль степени дифференциации осадочного материала, рассчитываемый по формуле  $SiO_2/Na_2O+K_2O$  [Ефремова, Стафеев, 1985].

Треугольная диаграмма соотношения K-Al-(Na+Ca) построена на основе содержания окислов указанных элементов, при этом значения величины каждого из компонентов представлены на графике в процентах от суммы всех главных элементов, используемых для построения данной диаграммы.

Для графической иллюстрации результатов использованы программы EasyCapture 1.2.0, Inkscape 0.48.4 и TriQuick 1.0.0.

Сравнительный анализ содержания различных химических элементов в ДО озера Ламба проводился с использованием опубликованных в печати и фондовых научных источников, данные из которых для удобства дальнейшего описания результатов сведены в единую таблицу 1.

## Результаты исследований

### Органическое вещество и главные элементы

Изученные ДО озера Ламба представляют собой сапропелевый ил черного цвета. Содержание органики колеблется от 31 до 62 вес. %, максимальное значение отмечено для глубины

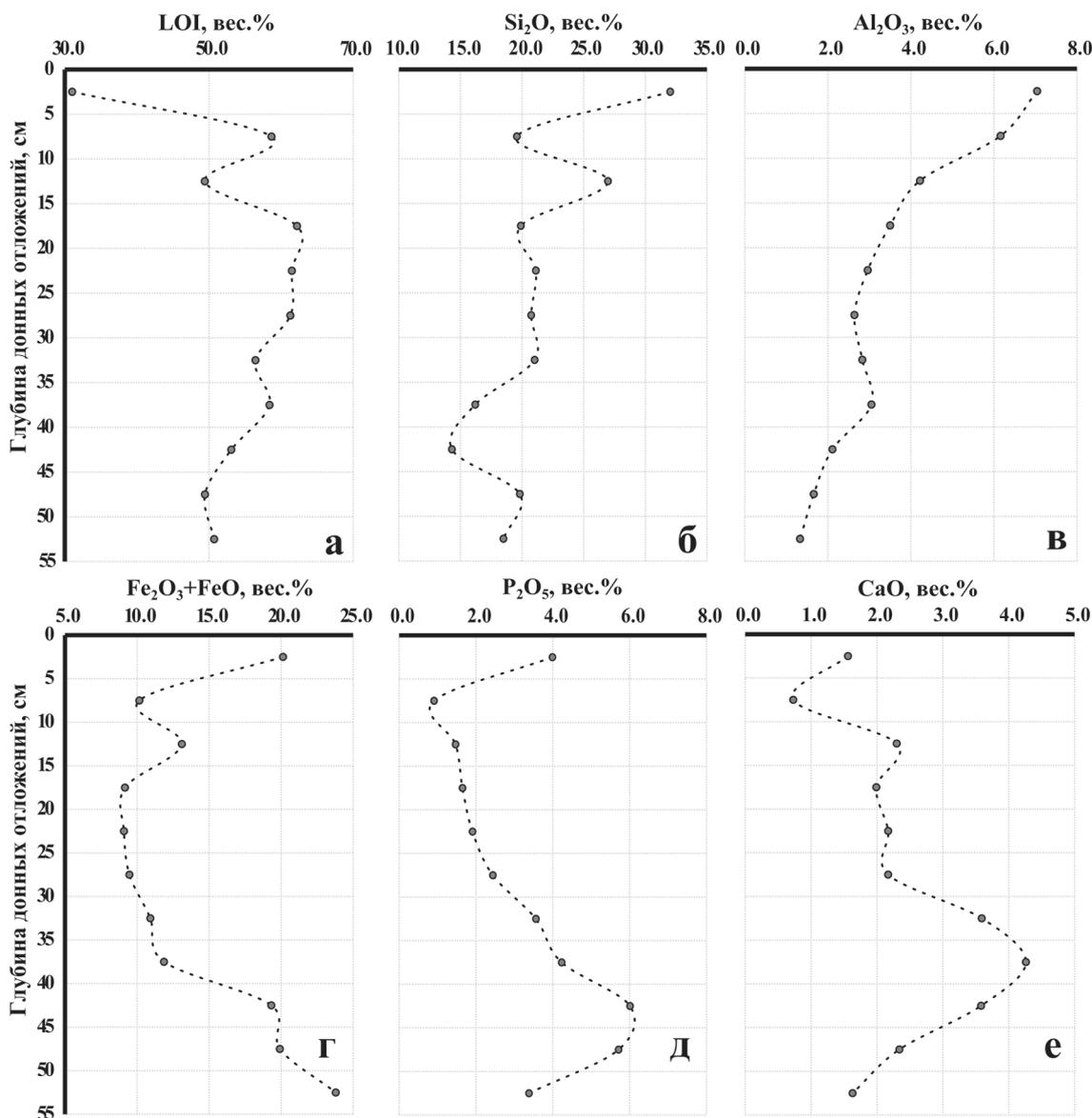


Рис. 2. Вертикальное распределение органического вещества, кремнезема и оксида Al, суммарного Fe, оксидов P и Ca в колонке ДО озера Ламба

Таблица 3. Корреляционная матрица главных элементов и органического вещества ДО озера Ламба

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Σ (FeO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0,79</b>	1,00								
Σ (FeO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-0,05	-0,25	1,00							
Na <sub>2</sub> O	<b>0,76</b>	<b>0,95</b>	-0,26	1,00						
CaO	-0,50	-0,55	-0,03	-0,49	1,00					
K <sub>2</sub> O	<b>0,74</b>	<b>0,99</b>	-0,17	<b>0,96</b>	-0,55	1,00				
MgO	<b>0,68</b>	<b>0,97</b>	-0,27	<b>0,94</b>	-0,41	<b>0,98</b>	1,00			
MnO	-0,41	-0,53	0,63	-0,47	<b>0,68</b>	-0,46	-0,42	1,00		
TiO <sub>2</sub>	<b>0,78</b>	<b>0,99</b>	-0,15	<b>0,95</b>	-0,59	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>	-0,48	1,00	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,42	-0,53	<b>0,67</b>	-0,52	0,58	-0,46	-0,44	<b>0,95</b>	-0,48	1,00
ППП	<b>-0,74</b>	-0,56	-0,57	-0,54	0,29	-0,59	-0,52	-0,18	-0,61	-0,19

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции >0,7 (R<sub>кр.</sub> = 0,66 для p < 0,01, R<sub>кр.</sub> = 0,53 для p < 0,05).

ДО 16–20 см, минимальное – в самом верхнем слое озерных осадков (табл. 2). Следует отметить, что содержание органического вещества имеет довольно низкий коэффициент вариации по всему разрезу осадков – 17 %, что позволяет говорить о среднем значении 53,8 вес. %. Максимальное содержание SiO<sub>2</sub>, напротив, отмечается на глубине ДО 0–5 см (32,0 вес. %), минимальное – 14,3 вес. % – в слое 41–45 см (рис. 2, б). Таким образом, общий разброс значений концентраций кремнезема также небольшой – 23,2 %.

Самый большой коэффициент вариации рассчитан для оксида Na – 109 %, это связано с тем, что в нижних слоях толщи изученных отложений Na<sub>2</sub>O не обнаружен. Максимальное накопление этого элемента отмечено для глубины ДО 0–5 см (табл. 2). Аналогичным распределением характеризуются также Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (вариация 52,3 %), K<sub>2</sub>O (87,5 %), MgO (68,8 %) и TiO<sub>2</sub> (89,7 %), то есть по всему изученному разрезу сверху вниз концентрации этих веществ постепенно снижаются. Уровень корреляционной связи между всеми обозначенными оксидами колеблется от 0,94 до 1,00 (при p < 0,01) (табл. 3). При этом теснота связи концентраций Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O и TiO<sub>2</sub> с кремнеземом несколько ниже указанных цифр.

Отдельно следует рассматривать распределение в изученных ДО озера Ламба Fe, Mn, P и Ca (рис. 2, г–е). Максимальное содержание этих главных элементов в озерных осадках приходится на нижние слои толщи – глубины от 36 до 55 см. Кроме того, в вертикальном распределении оксидов Fe, Mn, P и Ca имеются одинаковые пики концентраций на глубине 0–5 см. Наибольший уровень вариации значений содержания отмечен для P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 53,1 %, остальные вещества по убыванию коэффициентов вариации выстраиваются в следующем порядке: MnO (47,5) > CaO (43,1) > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO

(38,0). Из таблицы 3 видно, что указанные элементы тесно коррелируют между собой, за исключением пары Fe-Ca (R = -0,03 при p > 0,05). Наибольший коэффициент корреляции среди компонентов этой ассоциации, R = 0,95 (при p < 0,01), отмечен для взаимоотношения MnO и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Кроме того, отмечается явный антагонизм P и Al в изученных ДО петрозаводского озера, коэффициент корреляции R = -0,53 (при p < 0,01). Значимая корреляционная связь со знаком минус установлена также для пар Fe-ППП (R = -0,57) и Si-ППП (R = -0,74) при p < 0,01.

#### Тяжелые металлы и другие микроэлементы

Из элементов **первого и второго класса опасности** (Pb, Cd, Zn, Cr, Co, Ni, Cu, Mo) наибольший уровень накопления в изученной колонке ДО озера Ламба отмечен для Zn, концентрации которого в осадках варьируют от 88 до 868 мг/кг (табл. 2). Максимальное содержание этого тяжелого металла установлено на глубине ДО 36–40 см, что в 1,4–2,9 раза выше, чем в верхних слоях изученной толщи, от 0 до 20 см. Содержание Zn в отложениях озера в 6–13 раз превышает фоновый уровень накопления этого элемента в озерных и речных осадках Карелии и в 4–11 раз – среднее содержание в почвах Петрозаводска. Исключением являются осадки на глубине 51–55 см, где концентрация этого элемента находится на уровне фона (табл. 1 и 2). Свинец также неравномерно распределен по изученному разрезу ДО. На глубинах 46–55 см отмечаются фоновые и ниже фоновых концентрации этого тяжелого металла, максимальные значения (113–130 мг/кг) установлены в слоях 21–35 см, что в 11–12 раз выше фона. В слоях 0–20 см установлены концентрации Pb, превышающие фоновые значения региона в 3–7 раз, а геохимический фон

города – в 2–3 раза (табл. 1). Содержание Cd в ДО озера Ламба оказалось ниже общегородского уровня этого элемента во всех изученных образцах проб. Максимальная концентрация указанного тяжелого металла установлена на глубине 16–20 см отобранных осадков – 0,97 мг/кг (табл. 2). При этом общий разброс значений (коэффициент вариации) по Cd – наименьший из всех трех элементов первого класса опасности – составляет 31,2%. Аномально высоких пиков концентраций этого металла в отличие от Zn и Pb по всему разрезу не выявлено.

Минимальные концентрации Cr, Co, Ni, Cu, Mo установлены в самом глубоком слое изученной толщи озерных осадков – 51–55 см, здесь уровень содержания этих элементов близок к фоновому для территории Карельского региона (табл. 1 и 2). Для Cr этот уровень поддерживается до слоя отложений от 6 до 10 см, где происходит увеличение содержания этого металла с 34,8 до 140 мг/кг, что в 4,4 раза выше фонового уровня. Максимальные содержания Co (23,6 мг/кг) и Ni (558) также приурочены к слою 6–10 см, для Ni это 27-кратное увеличение фона республики и 28-кратное – фона территории города (табл. 1 и 2). Данный экстремум способствует установлению коэффициента вариации содержания Ni в ДО Ламба, равного 179%. Остальные элементы второго класса опасности выстраиваются в следующий ряд по убыванию величины разброса значений их концентрации в исследованных озерных осадках: Cu (142) > Cr (103) > Mo (36) > Co (21). Наибольшие концентрации Cu (726 мг/кг) и Mo (6,3) установлены на глубине 0–5 см ДО изученного водоема, что составляет 49- и 5-кратное превышение фонового уровня ДО Карелии соответственно (табл. 1 и 2). По Cu также отмечен самый высокий уровень превышения геохимического фона почв города среди элементов второго класса опасности – от 4 до 23 раз в слоях осадков от 0 до 15 см.

Наибольшие концентрации элементов **третьего класса опасности V** (до 3190 мг/кг) и **W** (до 2,31) приурочены к глубине ДО озера Ламба от 0 до 20 см (табл. 2). Экстремум V в слое отложений 6–10 см по отношению к фоновому уровню – самый большой среди всех исследованных тяжелых металлов, отмечается 64-кратное превышение фона Карелии и 51-кратное – фона Петрозаводска (табл. 2). В смежных слоях изученных осадков этот уровень значительно ниже – 16–20-кратное увеличение природного уровня по региону. На глубине ДО оз. Ламба ниже 21 см указанный тяжелый металл накапливается в незначительных

количествах (от 12 до 43 мг/кг). Поэтому показатель общего разброса значений концентраций V (коэффициент вариации) по изученному разрезу составляет 211%. Для W данный показатель почти в два раза ниже – 98%. Превышение фонового уровня городских почв по этому микроэлементу достигает 3-кратного значения. В слоях 46–55 см ДО городского озера накопления W не установлено (табл. 2).

**Щелочные металлы Li и Rb** имеют максимумы концентраций на глубине ДО 6–10 см: 27 и 62 мг/кг соответственно (табл. 2). Содержание этих элементов в слоях осадков с 21 до 55 см близко к фоновому уровню для территории Карелии и даже ниже его (табл. 2). На глубине озерных отложений 51–55 см концентрации Li (0,2 мг/кг) и Rb (0,3 мг/кг) имеют почти нулевые значения, поэтому коэффициенты вариации для обоих элементов составляют 134 и 128% соответственно. Наибольшее накопление в отложениях озера Ламба **щелочноземельных металлов Ba и Sr** приходится на среднюю часть изученного разреза ДО, глубину от 31 до 45 см (табл. 2). Аномально высокие концентрации Ba (989–1520 мг/кг) в этих слоях в 6–8 раз превышают содержание указанного металла в фоновых районах Карелии. В остальных изученных пробах ДО установлено 2–5-кратное превышение концентраций Ba над фоновым уровнем региона. Содержание Sr, напротив, по всему исследованному разрезу исследованных отложений ниже или повторяет уровень геохимического фона ДО Карелии (табл. 1 и 2).

Содержание Li в изученных ДО значимо коррелирует с концентрациями Cr, Ni, V, Cu, Co, W и Mo (рис. 3). Аналогичная ситуация наблюдается по Rb, который имеет почти полную функциональную зависимость с содержанием Li в озерных осадках Петрозаводска ( $R = 0,99$  при  $p < 0,01$ ). Хотя аномально высокие концентрации обоих элементов приходятся на глубину ДО от 0 до 20 см (табл. 2), небольшие пики их содержания в изученной толще сапропеля отмечены на глубине 36–40 см, где встречаются аномалии Co, Zn, Cu, Cd, Mo и Pb. Интересно, что распределение в ДО озера Ламба щелочноземельных элементов Ba и Sr, которые, так же как и щелочные металлы, очень активны в геологической среде [Интерпретация..., 2001], коррелирует с поведением в осадках Zn ( $R_{Ba-Zn} = 0,56$  и  $R_{Sr-Zn} = 0,82$  при  $p < 0,05$ ). А наибольшие пики Ba и Sr отмечены в осадках глубины 6–10 см, где зафиксированы аномально высокие концентрации V, Ni, Cr и C.

ДО озера Ламба по сравнению с речными осадками города Петрозаводска [Слуковский,

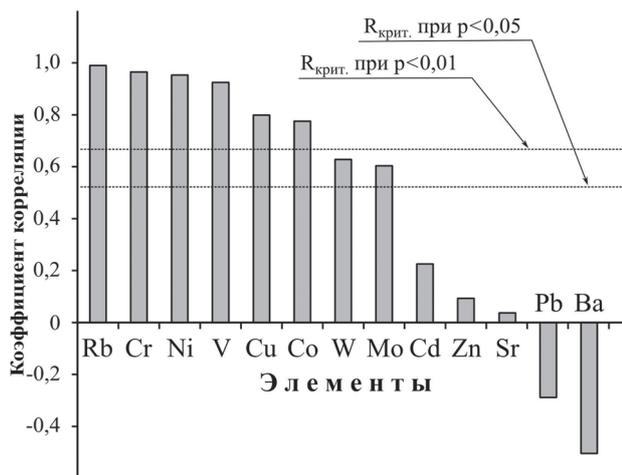


Рис. 3. Корреляция содержания Li с концентрациями различных микроэлементов в ДО озера Ламба

Светов, 2016] более обогащены Mo (по всему разрезу), Zn (глубина осадков 0–50 см), Pb (11–40 см), Ba (31–45 см), V, Ni, Cu (все 0–15 см), а также Cr, Li, Co (все 6–10 см). В случае остальных глубин указанных микроэлементов отмечается одинаковый уровень или уровень ниже содержания этих металлов в речных ДО. Концентрации Rb, Sr, Cd и W имеют значения ниже или на уровне содержания их в речных осадках по всему изученному разрезу. Кроме того, отмечается, что в ДО озера Ламба на глубине от 0 до 20 см по сравнению с другим малым водоемом города Петрозаводска, озером Четырехверстным, более интенсивно накапливались V (4–23-кратное превышение), Ni (2–9), Cu (4–7), Zn (2–3), Mo (2–3) [Синькевич, Экман, 1995].

### Обсуждение

Согласно данным [Синькевич, Экман, 1995], изученные отложения озера Ламба относятся к типу черных и темно-серых сапропелей, которые имеют значительное распространение на территории южной Карелии: в районе локализации крупной протерозойской структуры – Онежской мульды. Особенностью этих озерных образований является обогащение железом (как двух-, так и трехвалентным), представленным лимонитом, гидротроилитом, вивианитом и др. На рисунке 4 показаны эти минералы из ДО озера Ламба, содержащие в своем составе также Ca, P и Mn, что видно по спектрам указанных элементов. При этом фосфор – основной элемент в структуре вивианита, который образуется при восстановлении железа, что указывает на аналогичный характер среды, в которой происходило формирование изученных ДО.

Сильный разброс значений суммарного Fe в сапропелевых илах петрозаводского озера от

9 до 24 % (рис. 2, г) не позволяет однозначно классифицировать данные осадки, однако они близки к железистым сапропелям с повышенным содержанием органического вещества, образованным в условиях восстановительной среды [Синькевич, Экман, 1995]. В свою очередь, приведенная в литературе классификация [Минерально-сырьевая..., 2006] допускает отнесение изученных ДО озера Ламба к железистым (лимонитовым) сапропелям с зольностью до 85 % и содержанием лимонита более 10 %, однако для подтверждения этого факта необходимо провести детальный минералогический анализ исследованных отложений.

Содержание Si, Al, Ca, P и Mg позволяет считать осадки озера Ламба железистыми илами с высоким содержанием силикатно-коллоидного комплекса, которые также образуются в восстановительных условиях [Синькевич, Экман, 1995]. Судя по характеру распределения различных компонентов в озерных осадках, вероятно, что накопление в толще ДО Si, Al, Mg, Na, Ti и органического вещества происходило иным путем, чем накопление Fe и сопутствующих ему главных элементов (Ca, P, Mn). Резкое увеличение концентраций Al, Na, K, Ti и Mg от глубины 50–55 см до самого верхнего слоя изученных ДО осадков озера Ламба является следствием процессов химического и механического выветривания, которым мог быть подвергнут первоначальный материал отложений. Этот тезис подтверждается значимым положительным уровнем корреляции MgO ( $R = 0,91$  при  $p < 0,01$ ),  $K_2O$  (0,89),  $Al_2O_3$  (0,88),  $TiO_2$  (0,87) и  $Na_2O$  (0,81) с алюмокремниевым модулем, отражающим процесс выветривания осадочных образований. На рисунке 5 показана треугольная диаграмма, используемая в «классической» геологии для характеристики направления выветривания пород, являющихся источником материала для терригенных образований [Интерпретация..., 2001]. Учитывая, что выветривание, в том числе выветривание в водной среде (гальмиролиз), – процесс динамичный, показанная тройная диаграмма может быть применима при изучении самих осадочных образований, в том числе ДО водных объектов. Таким образом, показанный график, на котором тренд выветривания минералов, иллюстрирующий, что первичный (свежий) материал верхних слоев исследованных ДО озера Ламба обладает большей степенью выветренности по сравнению с материалом нижележащих слоев осадков, позволяет разделить всю изученную колонку на три самостоятельные группы осадочного материала (обозначения представлены в подписи к рис. 5). Накопление

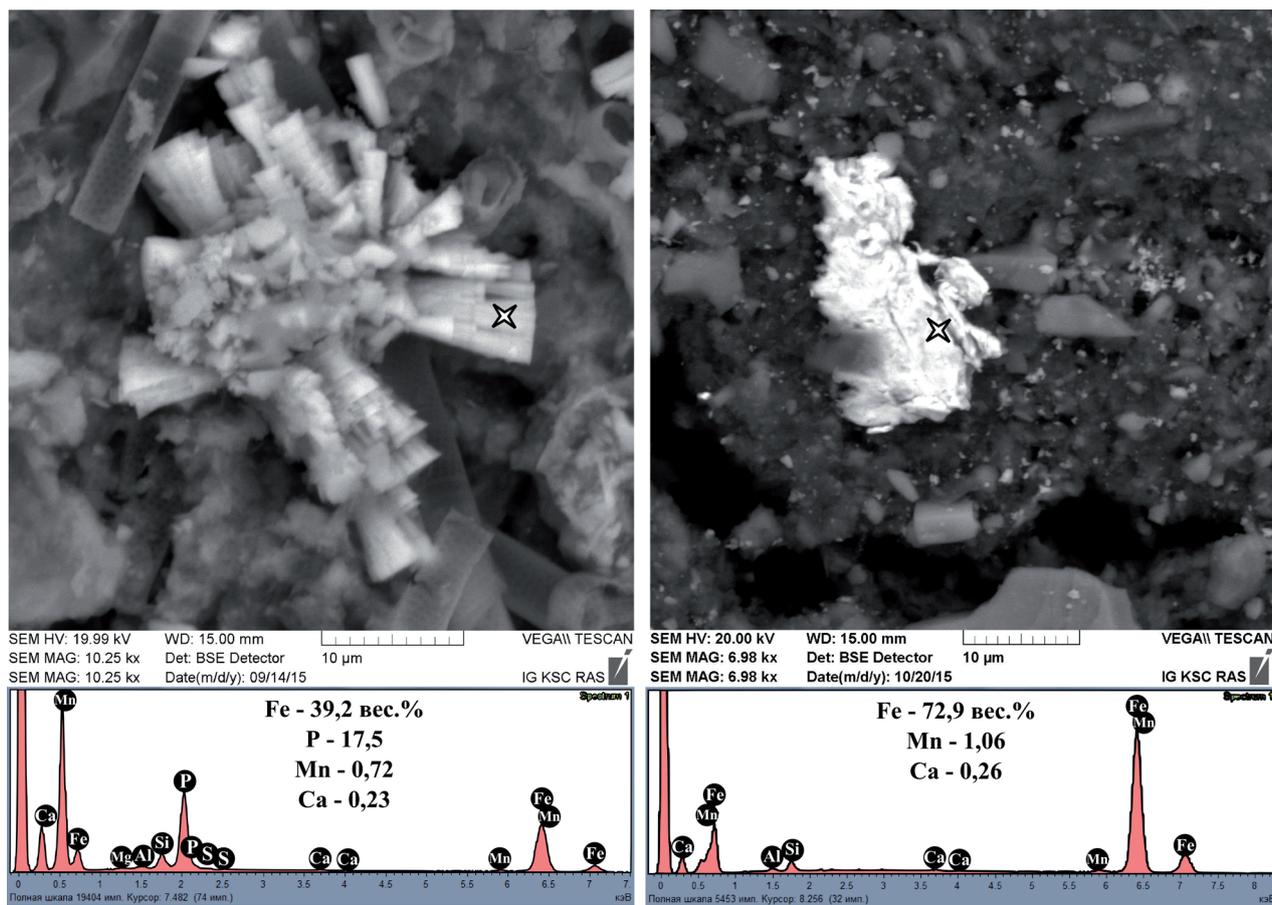


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения минералов вивианита (слева) и лимонита (справа) и их спектры в отмеченных звездочками участках

в ДО озера Ламба Fe, P, Mn и Ca слабо связано с этим процессом, подтверждением этому является антагонизм пары Al-P, о чем сообщалось выше. Кроме того, на характер распределения главных элементов в толще изученных озерных отложений могут оказывать влияние внутриводные биогеохимические процессы, связанные с вертикальной миграцией элементов по разрезу, переносом вещества гидробионтами, воздействием pH и Eh среды и др.

Аккумуляция кремнезема в толще осадков озера Ламба подчинена, скорее всего, двум различным факторам: накоплению минерального кремния в виде кварца, опала и других Si-минералов и накоплению биогенного кремния в виде створок диатомовых водорослей, в большом количестве присутствующих в ДО городского водоема. Однако влияние первого фактора имеет больший вес, что отражено в значимой корреляционной связи  $\text{SiO}_2$  с  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  (табл. 3). При этом органическое вещество (ППП) отрицательно коррелирует как с кремнеземом, так и с некоторыми другими главными элементами (табл. 3), которые приносились в ДО извне во время процесса

осадконакопления. Вероятно, это говорит о превалировании в толще озерных отложений автохтонной органики над аллохтонной. В то же время отсутствие какой-либо связи ППП с концентрацией фосфора ( $R = -0,38$  при  $p > 0,05$ ), а также значимая корреляция фосфора и суммарного Fe (табл. 3) всецело объясняются вовлечением P в процессы образования железистых минералов. Дополнительным доказательством этого факта служит присутствие в изученных отложениях кристаллов вивианита (водного фосфата железа  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), в составе которого фосфор достигает 17,5 вес. % (рис. 4). Учитывая, что визуальный анализ распределения вивианита в изученных отложениях озера Ламба показал неравномерное образование этого минерала в озерных осадках во время их накопления, в частности максимальное скопление синей охры приходится на глубину 36–40 см, где наблюдается резкое изменение концентраций Fe, P, Mn и отчасти Ca (рис. 2; табл. 2), стоит предположить связь этого явления со сменой редокс-потенциала исследованных отложений, так как образование вивианита происходит

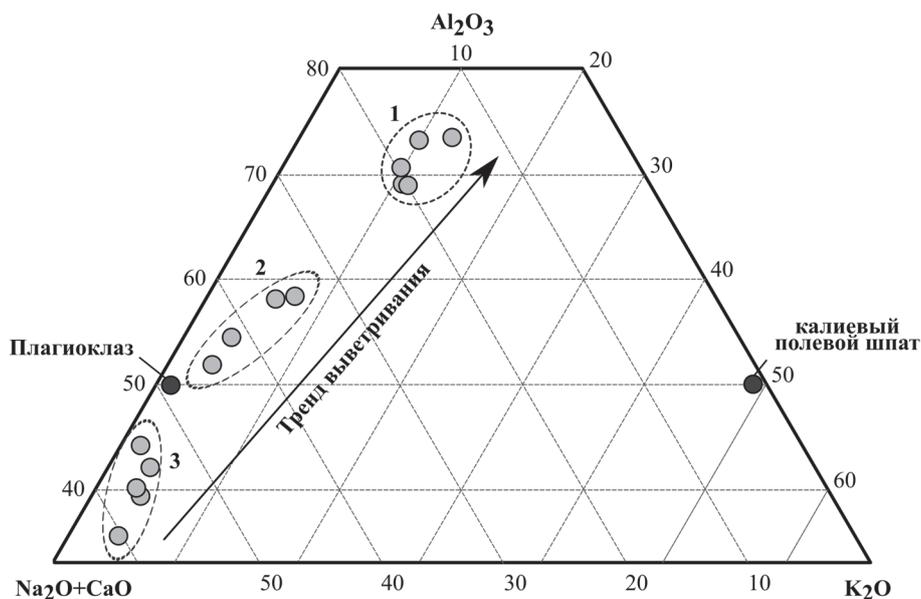


Рис. 5. Треугольная диаграмма соотношения К-Al- (Na+Ca) в ДО озера Ламба (1 – верхние слои (0–10 см), 2 – средние слои (11–30 см), 3 – нижние слои озерных осадков (31–55 см)). Значения К, Al и суммы Na и Ca даны в процентах от суммы всех главных элементов, указанных на диаграмме

в восстановительной среде при восстановлении железа с трех- до двухвалентного [Синькевич, Экман, 1995; Субетто, 2009]. Известно [Даувальтер, Ильяшук, 2007], что растворимость соединений Fe со степенью окисления 2+ на четыре порядка выше, чем со степенью окисления 3+. Это и привело к уменьшению содержания суммарного Fe, а также Mn и P, которые обладают разной степенью окисления в зависимости от изменения окислительно-восстановительных условий, в средней части разреза ДО оз. Ламба в диапазоне глубины осадков от 5 до 40 см. Присутствие вивианита, в котором Fe имеет степень окисления 2+, в указанной толще озерных отложений городского озера может служить своеобразным минеральным индикатором описанного выше процесса растворения соединений Fe, Mn, P и других макрокомпонентов. Дальнейшие исследования Eh и форм нахождения химических элементов петрозаводских городских осадков позволят внести уточняющие сведения в прояснение природы описываемых явлений.

Анализ взаимоотношения гранулометрического состава, индикатором которого может служить Li [Loring, 1990; Слуковский, 2015], и модуля степени дифференциации осадочного материала, показывает, что с увеличением глубины изучаемого осадочного разреза увеличивается степень дифференциации озерных отложений и, как следствие, разнообразие материала (рис. 6). Это свидетельствует

о большей переработке первичного материала, имеющего больший возраст и смешанный гранулометрический состав, в ходе выветривания и гальмиролиза (подводного выветривания). В свою очередь, распределение тонкодисперсной фракции ДО, с которой, по данным канадских исследователей, коррелирует содержание Li [Loring, 1990], контролируется степенью химического выветривания, с которым связано разрушение первичных плагиоклазов (значения  $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ ), и увеличением доли глинистой составляющей материала –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 5). В глинистых минералах и глинистых частицах, образованных вследствие выветривания, аккумулируется основная масса щелочных элементов, в том числе Li, Rb, Cs, имеющих между собой высокий уровень корреляции – от 0,87 до 0,97 (при  $p < 0,01$ ) [Поляков, Зарубина, 2014]. Также следует учитывать, что тонкодисперсная фракция могла существенно обогащать самые верхние слои ДО озера Ламба вследствие существенной роли зольных пылевых выбросов промышленных предприятий города, способствующих формированию в урбанизированной среде так называемых техногенных илов [Янин, 2009, 2013].

Техногенность изученных ДО петрозаводского озера Ламба иллюстрируется уровнем накопления в них тяжелых металлов как наиболее опасных токсикантов природной среды. Помимо того, что город Петрозаводск – крупный транспортный узел с населением 270 тыс.

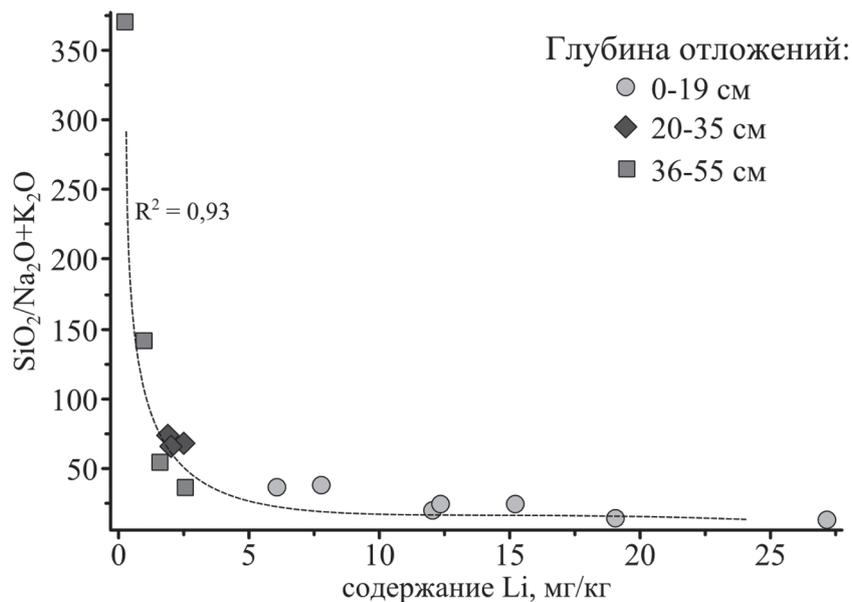


Рис. 6. График взаимосвязи концентрации Li в изучаемых ДО и значений модуля степени дифференциации осадочного материала (СДМ)

человек, здесь функционировали и функционируют многочисленные промышленные предприятия, такие как Онежский тракторный завод, «Петрозаводскмаш» (в том числе литейный завод с аналогичным названием), станкостроительный завод «Металлист», электроремонтный завод «Коммунальник», «Стройтехника», судостроительный завод «Авангард», Онежский судостроительно-судоремонтный завод, молочный комбинат «Славмо», рыбокомбинат, фабрика валяной обуви (артель «Пимокатка»), теплоцентраль, несколько электростанций, многочисленные предприятия лесной промышленности и камнеобработки и др. [Промышленность...].

Одним из источников поступления V, Ni и Cr в экосистему городского водоема, вероятно, являются выбросы Петрозаводской теплоэлектростанции (ТЭЦ), расположенной в 500 м от водного объекта (рис. 1), поскольку из литературы [Teng et al., 2006; Гоголашвили, Гарифзянов, 2007] известно, что повышенным содержанием этих элементов характеризуются выбросы любых теплоэнергетических предприятий, использующих в качестве топлива мазут. И хотя ветра юго-восточного и восточно-юго-восточного направления составляют в г. Петрозаводске 7–8 % от ветров всех направлений [Слуковский, Медведев, 2015], крайне высокий уровень обогащения ДО озера Ламба этими поллютантами легко маркирует негативное влияние выбросов ТЭЦ на химический состав верхних горизонтов изученных осадков [Саев и др., 1990]. Учитывая, что Петрозаводская

ТЭЦ была введена в эксплуатацию в 1976 году (уже более 40 лет назад) и вплоть до конца 1997 года работала исключительно на мазуте [Рыбаков, 1999], налицо эффект длительного воздействия этого предприятия на экосистему водного объекта, выразившийся в аккумуляции V и сопутствующих ему Ni и Cr в ДО озера на глубине 0–20 см. Заметное снижение концентраций этих тяжелых металлов от слоя 5–10 см к слою 0–5 см – в 2,6 раза для Ni и 3,2 раза по V и Cr – следует связать с переходом ТЭЦ в начале 2000-х годов на использование природного газа в качестве основного топлива, хотя мазут, согласно сведениям на официальном сайте предприятия [Петрозаводская...], остается в резервном использовании. Необходимо также отметить, что рост концентраций V отмечается в диапазоне глубин ДО оз. Ламба от 55 до 20 см, что может быть связано как с вхождением этого металла в состав пылевых выбросов и выбросов других промышленных предприятий Петрозаводска [Рыбаков и др., 2013], так и с усиленными эрозионными процессами во время активного освоения района Сулажгоры в последние 100 лет, учитывая, что V может быть связан с природными минеральными образованиями. При этом фактор влияния ТЭЦ на экосистему озера в последние несколько десятков лет кардинально изменил уровень накопления этого металла в изученных осадках, что отражено в результатах, описанных выше.

Таким образом, зная время начала функционирования ТЭЦ и, соответственно, время

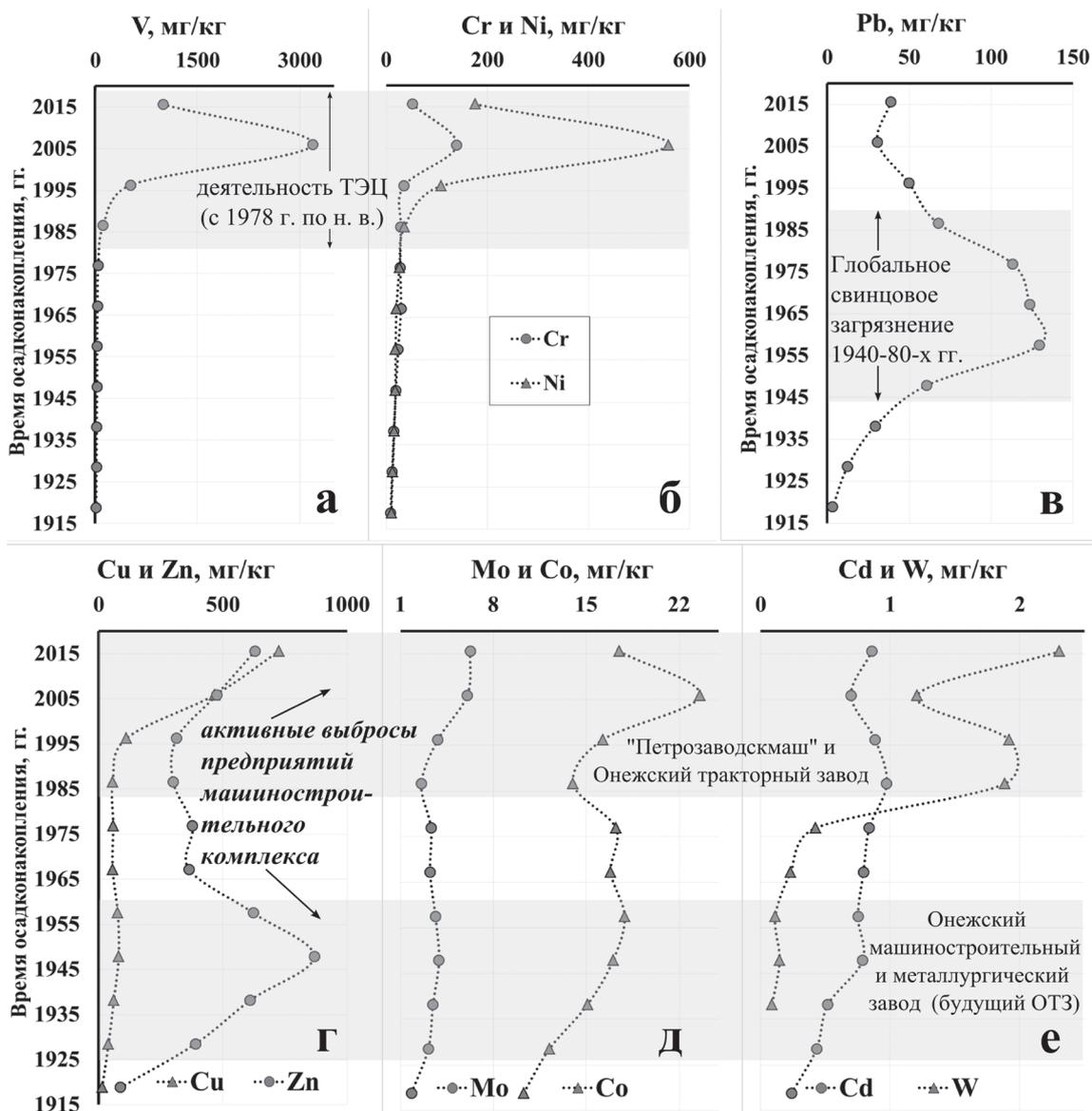


Рис. 7. Распределение концентраций V, Cr, Ni, Pb, Cu, Zn, Mo, Co, Cd и W по времени их накопления в ДО озера Ламба

начала выбросов этого предприятия в окружающую среду до момента отбора проб ДО оз. Ламба, можно предположить, что толща озерных осадков от 0 до 20 см, где зафиксированы anomalно высокие концентрации V, Ni и Cr, накопилась приблизительно за 40 лет (рис. 7, а, б). Следовательно, скорость осадконакопления в озере Ламба составляет ориентировочно около 5 мм/год, что более чем в 5 раз превышает среднюю скорость седиментации осадочного материала на дне малых озер территории Фенноскандии [Субетто, 2009; Даувальтер, 2012]. Данный факт может объясняться значительным влиянием городской среды на процесс переноса и аккумуляции осадочного материала в водной среде,

а также интенсивной эвтрофикацией водного объекта, учитывая близость сельхозугодий бывшего плодово-ягодного питомника, действовавшего в 500 метрах от озера в советское время. С подобным явлением высокой скорости осадконакопления в пределах локальной урбанизированной территории по сравнению с «фоновой» скоростью – средней для региона исследований – столкнулись седиментологи из Татарстана, которые выяснили, что накопление ДО в городских водных объектах Казани происходит в 2–6 раз быстрее, чем в озерах республики в целом [Иванов и др., 2011а, б].

Допуская, что скорость осадконакопления в петрозаводском озере Ламба была относительно постоянной, получим ориентировочный

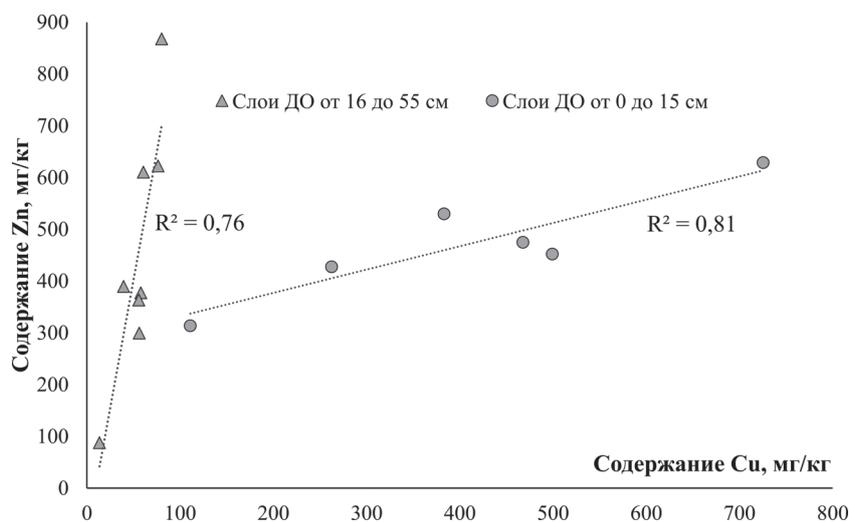


Рис. 8. Соотношение концентраций Cu и Zn в ДО оз. Ламба

возраст самого нижнего слоя (50–55 см) равным около 105 лет, а вся исследованная толща ДО, соответственно, образовалась с 1909 по 2015 гг. Данное обстоятельство объясняет факт экстремально высоких концентраций Pb в ДО Ламба на глубине от 21 до 35 см (рис. 7, в), так как эти аномалии, скорее всего, приурочены к периоду с 1940-х до 1980-х годов, когда во многих странах мира (в СССР/России до начала 2000-х годов) в моторное топливо добавлялся тетраэтилсвинец  $Pb(CH_3CH_2)_4$ , служивший как антидетонирующая присадка для бензина [Thomas, 1995; Komárek et al., 2008]. Таким образом, с начала XX века уровень обогащения Pb петрозаводских осадков к середине прошлого столетия увеличился в 40 раз, что находит отражение в исследованиях ДО озер соседних с нами Мурманской области и Финляндии, а также Северной Америки [Norton et al., 1990; Keinonen, 1992; Даувальтер, 2006; Даувальтер, Кашулин, 2014]. Пик общемировых выбросов свинца в атмосферу пришелся на 1960–70-е годы [Nriagu, 1990; Thomas, 1995]. С 1976 года началось постепенное вытеснение Pb-содержащего топлива, которое было завершено к 1986 году. В России этилированный бензин был запрещен с 15 ноября 2002 года [Постановление...]. Описанные тенденции прослеживаются в распределении концентраций Pb в ДО города Петрозаводска на глубинах от 0 до 25 см. Содержание этого металла в самых современных отложениях (0–10 см) достигает уровня 1930-х годов – момента, когда только началось активное использование свинцовых добавок по всему миру. Однако фоновый уровень Pb для изученных ДО (3,3 мг/кг) пока недостижим ввиду высокого уровня накопления этого загрязнителя в почвенном покрове

водосборной площади озера Ламба, тесно связанной с территорией города Петрозаводска [Крутских, Косинова, 2014; Новиков, 2014].

Работа двух крупных машиностроительных предприятий (Онежского тракторного завода и «Петрозаводскмаша»), специализирующихся на производстве машин и оборудования для нужд лесоперерабатывающей, атомной, нефтехимической и целлюлозно-бумажной промышленности и имеющих собственное литейное производство, заметно отражена в геохимии изученных ДО озера Ламба. Экстремально высокие концентрации Zn (389,5–867,9 мг/кг), Cu (39,4–80,3), Co (12,2–17,9), Mo (3,1–3,9), W (0,09–0,15) и Cd (0,43–0,79) в озерных осадках на глубинах от 31 до 50 см соответствуют рассчитанному периоду времени с начала 1920-х до середины 1950-х годов (рис. 7, г–е). Тогда будущий Онежский тракторный завод, перейдя в руки советской власти, перепрофилировался в предприятие по ремонту паровозов и вагонов, изготовлению запасных частей для них, а в дальнейшем – производству дорожных машин и продукции лесного машиностроения [Онежский...]. Анализ химического состава почвогрунтов бывшей промышленной площадки Онежского тракторного завода, расположенной в центральной части г. Петрозаводска, показал, что все указанные элементы, кроме Cd, имеют значительные превышения над ПДК и местным геохимическим фоном [Рыбаков и др., 2013]. Кроме того, эти тяжелые металлы входят в единую техногенную ассоциацию элементов (вместе с Cd), связанных с выбросами промышленного предприятия [Рыбаков, Веселкова, 2015]. Сохраняющиеся высокие концентрации Zn, Mo, Cd в толще ДО на глубинах от 0 до 30 см – следствие активной деятельности

Онежского тракторного завода вплоть до конца 2000-х годов, когда предприятие было признано банкротом. Кроме того, на повышенный фон этих тяжелых металлов также повлияли выбросы функционирующего с середины 1960-х годов прошлого столетия по настоящее время ОАО «Петрозаводскмаш», расположенного менее чем в трех километрах от озера Ламба [Петрозаводскмаш...]. Экстремальные значения содержания Cu (до 727 мг/кг) в самых верхних слоях изученной толщи ДО оз. Ламба, скорее всего, связаны с деятельностью литейного производства «Петрозаводскмаша». Взаимоотношение Cu и Zn как основных компонентов многих важнейших литейных сплавов [Расчет..., 2000] иллюстрирует тесную связь этих тяжелых металлов, поступивших в экосистему петрозаводского озера в различное время от двух разных техногенных источников, но имеющих общую природу загрязняющих выбросов (рис. 8). При этом авторы публикации весьма четко понимают, что увязка выбросов определенных тяжелых металлов и их накопления в толще современных озерных отложений г. Петрозаводска носит условный характер, учитывая тот факт, что предприятия машиностроительного и энергетического комплекса имеют приблизительно один набор загрязняющих веществ [Саэт и др., 1990]. Кроме того, часть металлов, например халькофильные элементы Cd и Pb, могут поступать в водную среду в результате трансграничного переноса поллютантов через атмосферу планеты [Даувальтер, 2006].

Следует также отметить, что разработанная ранее концепция определения техногенного статуса поллютантов с использованием концентраций щелочных металлов (Li и Rb) как индикаторов антропогенного влияния на городские речные системы [Слуковский, Светов, 2016] работает и в случае с урбанизированным водоемом. К указанным элементам добавляются щелочноземельные металлы Ba и Sr. При этом щелочные металлы могут выступать индикаторами техногенного накопления в изученных ДО Cr, Ni, V, Cu, Co, W и Mo, а щелочноземельные – преимущественно Zn. Остается невыясненным только момент отсутствия связи Pb и Cd с обозначенными щелочными и щелочноземельными металлами, при этом между собой они имеют коэффициент корреляции  $R_{Cd-Pb} = 0,58$  (при  $p < 0,05$ ), что может свидетельствовать об их едином пути поступления в водный объект, связанном как с выбросами автомобильного транспорта [Саэт и др., 1990], так и с обозначенным выше дальним переносом загрязняющих веществ [Даувальтер, 2006]. При этом

не стоит исключать значительное природное влияние в накоплении Cd в озерных отложениях г. Петрозаводска, что ранее отмечалось при изучении речных осадков города [Слуковский, 2014], а также ДО литоральной зоны северной части Ладожского озера [Ивантер и др., 2016].

## Выводы

Таким образом, результаты геохимического исследования 55-сантиметровой колонки ДО малого озера Ламба выявили следующие особенности накопления данной осадочной формации:

- Изученные озерные отложения по содержанию главных элементов (Fe, ППП, Mn) относятся к железистым (лимонитовым) сапропелям с повышенным содержанием органики.
- Распределение в толще осадков озера Ламба Al, Na, K, Mg и Ti, концентрации которых существенно увеличиваются от нижних слоев к верхним, связано с процессом дифференциации осадочного материала, зависящего от гранулометрического состава осадков и химического выветривания первичных минералов. Это подтверждается значимым положительным уровнем корреляции указанных элементов с алюмокремниевым модулем.
- Концентрации Fe, а также связанных с этим элементом P, Mn и Ca, зависят от окислительно-восстановительных условий на дне озера, поскольку растворимость соединений Fe, а также Mn и P сильно зависит от их степени окисления, меняющейся в результате смены Eh-условий. Образование кристаллов вивианита, в котором Fe имеет степень окисления 2+, можно считать индикатором описанного процесса.
- Содержание большинства тяжелых металлов в толще осадков озера Ламба превышает фоновый уровень накопления этих элементов в водных объектах Республики Карелия, а также их концентрации в почвенном покрове и речных ДО города Петрозаводска.
- Экстремально высокий уровень накопления V, Cr, Ni в верхних слоях ДО оз. Ламба (0–20 см) указывает на значительное влияние Петрозаводской ТЭЦ.
- Аномально высокие концентрации Pb в слоях осадков на глубине от 0 до 50 см связаны с повсеместным загрязнением окружающей среды этим тяжелым металлом вследствие его поступления от выбросов автомобильного транспорта, а также трансграничного переноса через атмосферу планеты.

- Распределение концентраций Co, Cu, Zn, Sr, Mo, Sn отражает воздействие на экосистему озера Ламба выбросов предприятий – Онежского тракторного завода и «Петрозаводскмаша».
- Примерная скорость осадконакопления в озере составляет 0,5 см в год, что в 5 и более раз превышает среднюю скорость осадконакопления на территории Республики Карелия и Мурманской области. Общий ориентировочный возраст исследованной 55-сантиметровой толщи ДО озера Ламба составляет приблизительно 105 лет.
- Геохимические особенности накопления в исследованных осадках Li и Rb свидетельствуют об их активности в геосреде в периоды максимального накопления тяжелых металлов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, W) в озерных отложениях города, что подтверждает концепцию об использовании щелочных металлов в качестве индикаторов техногенного статуса загрязнителей водной среды.

Авторы выражают признательность сотрудникам Аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН А. И. Михайловой, В. Л. Утицыной, М. В. Эховой, А. С. Парамонову и С. В. Бурдюху за помощь в проведении аналитических исследований. Также авторы благодарят анонимных рецензентов, чьи ценные замечания и рекомендации, несомненно, улучшили качество публикуемого материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00026 мол\_а, а также частично за счет средств федерального бюджета на выполнение государственных заданий по темам ГР № АААА-А16–116020410116 и № 0221-2014-0033.

## Литература

Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 109 с.

Геохимическое картирование севера европейской территории России в рамках международной программы «Экогеохимия Баренцева региона» и проведение опережающего этапа составления геохимических основ Госгеолкарты-1000 третьего поколения на листы Р-35,36. Том 2: Отчет о научно-исследовательской работе / Исполн. О. В. Томилина, С. Ф. Паламчук, Э. Я. Яхнин, А. И. Егоров. СПб., 2004. 146 с.

Гоголашвили Э. Л., Гарифзянов А. Р. Проблемы анализа ванадия в сточных водах тепловых электростанций // Энергетика Татарстана. 2007. № 3. С. 60–63.

Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.

Даувальтер В. А. Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в донных отложениях водных объектов водосбора Белого моря в пределах Кольского полуострова // Геохимия. 2006. № 2. 237–240. doi: 10.1134/S0097807810040093

Даувальтер В. А., Ильяшук Б. П. Условия образования железомарганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита // Геохимия. 2007. № 6. С. 680–684.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Химический состав донных отложений системы реки Пасвик в условиях глобального и локального загрязнения // Вестник КНЦ РАН. 2014. № 2 (17). С. 106–120.

Ефремова С. В., Стафеев К. Г. Петрохимические методы исследования горных пород. М.: Недра, 1985. 511 с.

Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В. Методика оценки природной и техногенной составляющих тяжелых металлов в водоемах урбанизированных территорий // Георесурсы. 2011а. № 5 (41). С. 27–31.

Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В. Оценка скорости осадконакопления в озерах Казани и Приказанья // Георесурсы. 2011б. № 2 (38). С. 46–48.

Ивантер Э. В., Слуковский З. И., Дудакова Д. С., Медведев А. С., Светов С. А. Свидетельства цирконовой природы кадмиевых аномалий в донных отложениях литорали северной части Ладожского озера // ДАН. 2016. Т. 468, № 5. С. 562–565.

Интерпретация геохимических данных / Ред. Е. В. Склярова. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.

Комулайнен С. Ф. Фитоперифитон в водоемах г. Петрозаводска (Республика Карелия) // Труды КарНЦ РАН. 2014. № 2. С. 43–50.

Крутских Н. В., Косинова И. И. Методика трансформации природной среды по результатам эколого-геохимических исследований (на примере г. Петрозаводск) // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер. Геология. 2014. № 3. С. 95–97.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.

Новиков С. Г. Радиальное распределение валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов в почвах г. Петрозаводска на землях общего пользования // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science-education.ru/115-12088> (дата обращения: 14.02.2014).

Онежский тракторный завод / Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Онежский\\_тракторный\\_завод](https://ru.wikipedia.org/wiki/Онежский_тракторный_завод) (дата обращения: 13.02.2016).

Петрозаводская ТЭЦ // ТГК-1. Энергия Северо-Запада [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tgc1.ru/?id=164> (дата обращения: 13.02.2016).

Петрозаводскмаш // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <https://>

ru.wikipedia.org/wiki/Петрозаводскмаш (дата обращения: 13.02.2016).

Поляков Д. М., Зарубина Н. В. Накопление щелочных и щелочноземельных элементов в субколлоидной фракции донных осадков на геохимическом барьере река-море // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 6. С. 573–578. doi: 10.7868/S0321059614060169

Постановление ГД ФС РФ от 15.11.2002 № 3302-III ГД о проекте федерального закона № 209067-3 «Об ограничении оборота этилированного бензина в Российской Федерации» // Законы России [Электронный ресурс]. URL: [http://www.lawrussia.ru/texts/legal\\_149/doc149a777x242.htm](http://www.lawrussia.ru/texts/legal_149/doc149a777x242.htm) (дата обращения: 13.02.2016).

Потахин М. С. Морфологические особенности водоемов г. Петрозаводска // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Матер. IV школы-конф. мол. ученых с междунар. участием (Петрозаводск, 26–28 августа 2011 г.). Петрозаводск, 2011. С. 180–183.

Промышленность Петрозаводска // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленность\\_Петрозаводска](https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленность_Петрозаводска) (дата обращения 10.09.2017).

Расчет выбросов загрязняющих веществ от литейных цехов: Методическое пособие по выполнению практической работы по курсу «Промышленная экология» для студентов специальности 320700 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» / Сост. Л. И. Бондалетова, В. Т. Новиков, Н. А. Алексеев. Томск: Изд. ТПУ, 2000. 34 с.

Рыбаков Д. С. Первые данные дендрогеохимического определения многолетней динамики загрязнения Петрозаводска // Вопросы геологии и экологии Карелии: По матер. конф. молодых ученых. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 51–57.

Рыбаков Д. С., Веселкова С. А. Ассоциации химических элементов в загрязненных почвогрунтах бывшей промышленной площадки // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: Матер. 4-й науч.-практ. конф. (Петрозаводск, 30 сентября – 2 октября 2015 г.). Воронеж: Научная книга, 2015. С. 191–194.

Рыбаков Д. С., Крутских Н. В., Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б., Слукровский З. И., Кричевцова М. В., Лазарева О. В. Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия. СПб.: ЭлекСис, 2013. 130 с.

Саэт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

Синькевич Е. И., Экман И. М. Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 177 с.

Слукровский З. И. Нормирование по литию концентраций тяжелых металлов в донных отложениях озер Ладожское и Четырехверстное (Республика Карелия) // Химия в интересах устойчивого развития. 2015. Т. 23, № 4. С. 397–408. doi: 10.15372/KhUR20150409

Слукровский З. И. Эколого-геохимический анализ состояния донных отложений малых рек урбанизированных территорий (на примере г. Петрозаводска): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2014. 24 с.

Слукровский З. И., Медведев А. С. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях озер Четырехверстного и Ламба (г. Петрозаводск, Республика Карелия) // Экологическая химия. 2015. № 1. С. 56–62.

Слукровский З. И., Светов С. А. Геохимические индикаторы техногенного загрязнения донных отложений малых рек в урбанизированной среде // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 38–45.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции: Науч. моногр. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 339 с.

Янин Е. П. Особенности гранулометрического состава русловых отложений малой реки в зоне влияния промышленного города // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 3. С. 69–74.

Янин Е. П. Техногенные речные илы (вещественный состав, геохимические особенности, экологическая оценка) // Экологическая экспертиза. 2013. № 1. С. 2–195.

Keinonen M. The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source // The Science of the Total Environment. 1992. Vol. 113, no. 3. P. 251–268. doi: 10.1016/0048-9697(92)90004-C

Komárek M., Ettler V., Chrastný V., Mihaljevi M. Lead isotopes in environmental sciences: A review // Environment International. 2008. Vol. 34, no. 4. P. 562–577. doi: 10.1016/j.envint.2007.10.005

Loring D. H. Lithium – a new approach for the granulometric normalization of trace metal data // Marine Chemistry. 1990. Vol. 29. P. 155–168. doi: 10.1016/0304-4203(90)90011-Z

McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008. Vol. 34. P. 12140–12144.

Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D. The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments // Sources, Deposition and Capony Interactions. V. III, Acidic Precipitation. N. Y.: Springer-Verlag. 1990. P. 73–101. doi: 10.1007/978-1-4612-4454-7\_4

Nriagu J. O. The rise and fall of leaded gasoline // Science of The Total Environment. 1990. Vol. 92. P. 13–28. doi: 10.1016/0048-9697(90)90318-O

Teng Y., Ni S., Zhang C., Wang J., Lin X., Huang Y. Environmental geochemistry and ecological risk of vanadium pollution in Panzhihua mining and smelting area, Sichuan, China // Chinese Journal of Geochemistry. 2006. Vol. 25, no. 4. P. 379–385.

Thomas V. M. The elimination of lead in gasoline // Annual Review of Energy and the Environment. 1995. Vol. 20. P. 301–324.

Поступила в редакцию 05.04.2017

## References

- Dauval'ter V. A. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geoecology of bottom sediments of lakes]. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2012. 242 p.
- Dauval'ter V. A. Khal'kofil'nye elementy (Hg, Cd, Pb, As) v donnykh otlozheniyakh vodnykh ob'ektov vodosbora Belogo morya v predelakh Kol'skogo poluostrova [Chalcophylic elements (Hg, Cd, Pb, As) in bottom sediments of water bodies of the White Sea catchment within the Kola Peninsula]. *Geokhimiya [Geochemistry]*. 2006. No. 2. P. 237–240. doi: 10.1134/S0097807810040093
- Dauval'ter V. A., Il'yashuk B. P. Usloviya obrazovaniya zhelezomargantsevykh konkretnykh v donnykh otlozheniyakh ozer v predelakh Baltiiskogo kristallicheskogo shchita [Conditions of ferromanganese nodules formation in the bottom sediments of lakes in the Baltic Shield]. *Geokhimiya [Geochemistry]*. 2007. No. 6. P. 680–684.
- Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Khimicheskii sostav donnykh otlozhenii sistemy reki Pasvik v usloviyakh global'nogo i lokal'nogo zagryazneniya [Chemical composition of the bottom sediments of the Pasvik river system under global and local pollution]. *Vestnik KNTs RAN [Herald of KarSC of RAS]*. 2014. No. 2 (17). P. 106–120.
- Efremova S. V., Stafeev K. G. Petrokhimicheskie metody issledovaniya gornyykh porod [Petrochemical methods for rocks research]. Moscow: Nedra, 1985. 511 p.
- Geokhimicheskoe kartirovanie severa evropeiskoi territorii Rossii v ramkakh mezhdunarodnoi programmy "Ekogeokhimiya Barentseva regiona" i provedenie ope-rezhayushchego etapa sostavleniya geokhimicheskikh osnov Gosgeol'karty-1000 tret'ego pokoleniya na listy R-35,36 [Geochemical mapping of the north of the European territory of Russia within the framework of the international program Ecogeochemistry of the Barents Region and conducting an advanced stage of compiling the geochemical basis of the State Geolokarta-1000 of the third generation into the sheets R-35, 36]. Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote [Research Report]. Eds. O. V. Tomilina, S. F. Palamchuk, E. Ya. Yakhnin, A. I. Egorov. St. Petersburg, 2004. Vol. 2. 146 p.*
- Gogolashvili E. L., Garifzyanov A. R. Problemy anali-za vanadiya v stochnykh vodakh teplovykh elektrostantsii [Problems of vanadium analysis in wastewater from thermal power plants]. *Energetika Tatarstana [Power Engineering in the Republic of Tatarstan]*. 2007. No. 3. P. 60–63.
- Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Metodi-ka otsenki prirodnoi i tekhnogennoi sostavlyayushchikh tyazhelykh metallov v vodoemakh urbanizirovannykh ter-ritorii [A method for assessing natural and man-made components of heavy metals in water bodies of urban areas]. *Georesursy [Georesources]*. 2011a. No. 5 (41). P. 27–31.
- Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Otsen-ka skorosti osadkonakopleniya v ozerakh Kazani i Prikazan'ya [Assessment of the sedimentation rate in the lakes of Kazan and adjacent territories]. *Georesursy [Georesources]*. 2011b. No. 2 (38). P. 46–48.
- Ivanter E. V., Slukovskii Z. I., Dudakova D. S., Med-vedev A. S., Svetov S. A. Svidetel'stva tsirkonovoi prirody kadmievyykh anomalii v donnykh otlozheniyakh litorali severnoi chasti Ladozhskogo ozera [Evidence for the zircon origin of cadmium anomalies in the bot-tom sediments from the littoral zone of the northern part of Lake Ladoga]. *DAN [Doklady Earth Sciences]*. 2016. Vol. 468, no. 5. P. 562–565.
- Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh [Interpre-tation of geochemical data]. Ed. E. V. Sklyarova. Mos-cow: Intermet Inzhiniring, 2001. 288 p.*
- Komulainen S. F. Fitoperifiton v vodoemakh g. Petro-zavodsk (Respublika Kareliya) [Phytoperiphyton in the reservoirs of Petrozavodsk (Republic of Karelia)]. *Tru-dy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2014. No. 2. P. 43–50.
- Krutsikh N. V., Kosinova I. I. Metodika transfor-matsii prirodnoi sredy po rezul'tatam ekologo-geokhi-micheskikh issledovaniy (na primere g. Petrozavodsk) [A method of natural environment transformation based on the results of ecological and geochemical research (the case of Petrozavodsk)]. *Vestnik Voronezhskogo gos. univ. Ser. Geologiya [Proceed. of Voronezh St. Univ. Geology Ser.]*. 2014. No. 3. P. 95–97.
- Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya [Mi-neral and raw material base of the Republic of Kare-lia]. Kniga 2: Nemetallicheskie poleznye iskopaemye. Podzemnye vody i lechebnye gryazi [Vol. 2. Nonmetallic Minerals. Underground Waters and Therapeutic Mud]. Petrozavodsk: Karelia, 2006. 356 p.*
- Novikov S. G. Radial'noe raspredelenie valovogo soderzhaniya i podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvakh g. Petrozavodsk na zemlyakh obshchego pol'zovaniya [Radial distribution of gross content and mobile forms of heavy metals in the public lands soils of Petrozavodsk]. *Sovremennye problemy nauki i obra-zovaniya [Modern Problems of Science and Ed.]*. 2014. No. 1. URL: <http://www.science-education.ru/115-12088> (accessed: 14.02.2014).
- Onezhskii traktorny zavod [The Onezhsky trac-tor plant]. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [Wikipedia, the Free Encyclopedia]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Onezhskii\\_traktorny\\_zavod](https://ru.wikipedia.org/wiki/Onezhskii_traktorny_zavod) (ac-cessed: 13.02.2016).*
- Petrozavodskaya TETs [The Petrozavodsk heating plant]. TGK-1. Energiya Severo-Zapada [TGK-1. Energy of the North-West]. URL: <http://www.tgc1.ru/?id=164> (accessed: 13.02.2016).*
- Petrozavodskmash [The Petrozavodskmash plant]. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [Wikipedia, the Free Encyclopedia]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Petrozavodskmash> (accessed: 13.02.2016).*
- Polyakov D. M., Zarubina N. V. Nakoplenie shche-lochnyykh i shchelochnozemel'nykh elementov v subkol-loidnoi fraktsii donnykh osadkov na geokhimicheskome bar'ere reka-more [Accumulation of alkaline and alka-line-earth elements in the subcolloid fraction of bottom sediments at the geochemical river-sea barrier]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 573–578. doi: 10.7868/S0321059614060169*
- Postanovlenie GD FS RF ot 15.11.2002 № 3302-III GD o proekte federal'nogo zakona № 209067-3 "Ob ogranichenii oborota etilirovan-nogo benzina v Rossiiskoi Federatsii" [The decree of the State Duma of the Russian Federation No. 3302-III*

GD dated 15.11.2002 on the draft federal law No. 209067-3 "On limiting the turnover of leaded gasoline in the Russian Federation". Zakony Rossii [Laws of Russia]. URL: [http://www.lawrussia.ru/texts/legal\\_149/doc149a777x242.htm](http://www.lawrussia.ru/texts/legal_149/doc149a777x242.htm) (accessed: 13.02.2016).

*Potakhin M. S.* Morfologicheskie osobennosti vo-dnoemov g. Petrozavodsk [Morphological features of reservoirs in Petrozavodsk]. Vodnaya sreda i prirodno-territorial'nye komplekсы: issledovanie, ispol'zovanie, okhrana: Mater. IV shkoly-konf. mol. uchenykh s mezhdunar. uchastiem (Petrozavodsk, 26–28 avgusta 2011 g.) [Water Environment and Natural Territorial Complexes: Study, Use, and Protection: Proceed. of IV School-Conf. of Young Scientists with. Int. Part.]. Petrozavodsk, 2011. P. 180–183.

*Promyshlennost'* Petrozavodsk [The industry of Petrozavodsk]. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [Wikipedia, the Free Encyclopedia]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Promyshlennost'\\_Petrozavodsk](https://ru.wikipedia.org/wiki/Promyshlennost'_Petrozavodsk) (accessed: 10.09.2017).

*Raschet vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot liteinykh tsekhov: Metodicheskoe posobie po vypolneniyu prakticheskoi raboty po kursu "Promyshlennaya ekologiya" dlya studentov spetsial'nosti 320700 "Okhrana okruzhayushchei sredy i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnykh resursov"* [Calculation of pollutant emissions from foundries: a methodological manual for practical work on the Industrial ecology course for the students of the specialty 320700 "Environmental protection and rational use of natural resources"]. Coll. by L. I. Bondaletova, V. T. Novikov, N. A. Alekseev. Tomsk: Izd. TPU, 2000. 34 p.

*Rybakov D. S.* Pervye dannye dendrogeokhimi-cheskogo opredeleniya mnogoletnei dinamiki zagryazneniya Petrozavodsk [First data on dendrogeochemical assessment of the long-term contamination dynamics in Petrozavodsk]. Voprosy geologii i ekologii Karelii: Po mater. konf. molodykh uchenykh [Problems of Geol. and Ecol. of Karelia: Proceed. of the Conf. of Young Scientists]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1999. P. 51–57.

*Rybakov D. S., Krutskikh N. V., Shelekhova T. S., Lavrova N. B., Slukovskii Z. I., Krichevtsova M. V., Lazareva O. V.* Klimaticheskie i geokhimiicheskie aspekty formirovaniya ekologicheskikh riskov v Respublike Kareliya [Climatic and geochemical aspects of environmental risks formation in the Republic of Karelia]. St. Petersburg: ElekSis, 2013. 130 p.

*Rybakov D. S., Veselkova S. A.* Assotsiatsii khimicheskikh elementov v zagryaznennykh pochvogruntakh byvshei promyshlennoi ploschadki [Associations of chemical elements in contaminated soils of the former industrial site]. Ekologicheskaya geologiya: teoriya, praktika i regional'nye problemy: Mater. 4-i nauch.-prakt. konf. (Petrozavodsk, 30 sentyabrya – 2 oktyabrya 2015 g.) [Ecological Geology: Theory, Practice, and Regional Problems: Proceed. of the 4<sup>th</sup> Scientific and Practical Conf. (Petrozavodsk, September 30 – October 2, 2015)]. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2015. P. 191–194.

*Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P.* Geokhimiya okruzhayushchei sredy [Geochemistry of the environment]. Moscow: Nedra, 1990. 335 p.

*Sin'kevich E. I., Ekman I. M.* Donnye otlozheniya ozer Vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo kristallicheskogo shchita [Bottom sediments of the lakes of the Eastern part of the Fennoscandian Crystal Shield]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1995. 177 p.

*Slukovskii Z. I.* Normirovanie po litiyu kontsentratsii tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Ladozhskoe i Chetyrekhverstnoe (Respublika Kareliya) [Normalization of lithium concentrations of heavy metals in the bottom sediments of Lakes Ladoga and Chetyrekhverstnoe (Republic of Karelia)]. *Khimiya v interesakh us-toichivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development]. 2015. Vol. 23, no. 4. P. 397–408. doi: 10.15372/KhUR20150409

*Slukovskii Z. I.* Ekologo-geokhimiicheskiy analiz sostoyaniya donnykh otlozhenii malykh rek urbanizirovannykh territorii (na primere g. Petrozavodsk) [Ecological and geochemical analysis of bottom sediments of small rivers of urbanized territories (the case of the city of Petrozavodsk)]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Petrozavodsk, 2014. 24 p.

*Slukovskii Z. I., Medvedev A. S.* Soderzhanie tyazhelykh metallov i mysh'yaka v donnykh otlozheniyakh ozer Chetyrekhverstnogo i Lamba (g. Petrozavodsk, Respublika Kareliya) [The content of heavy metals and arsenic into the bottom sediments of Lakes Chetyrekhverstnoe and Lamba (Petrozavodsk, Karelia)]. *Ekologicheskaya khimiya* [Ecological Chemistry]. 2015. No. 1. P. 56–62.

*Slukovskii Z. I., Svetov S. A.* Geokhimiicheskie indikatory tekhnogennoy zagryazneniya donnykh otlozhenii malykh rek v urbanizirovannoi srede [Geochemical indicators of technogenic pollution of bottom sediments in small rivers in an urbanized environment]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources]. 2016. No. 1. P. 38–45.

*Subetto D. A.* Donnye otlozheniya ozer: Paleolimnologicheskie rekonstruktsii [Bottom sediments of lakes: paleolimnological reconstructions]. Nauch. monogr. [Scientific Monograph]. St. Petersburg: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2009. 339 p.

*Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie* [Water bodies of the city of Petrozavodsk: a tutorial]. Eds. A. V. Litvinenko, T. I. Regerand. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. 109 p.

*Yanin E. P.* Osobennosti granulometricheskogo sostava ruslovykh otlozhenii maloi reki v zone vliyaniya promyshlennogo goroda [Features of granulometric composition of channel sediments of a small river exposed to the impact of an industrial city]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka* [Proceed. of Higher Ed. Institutions. Geol. and Exploration]. 2009. No. 3. P. 69–74.

*Yanin E. P.* Tekhnogennyye rechnye ily (veshchestvennyi sostav, geokhimiicheskie osobennosti, ekologicheskaya otsenka) [Technogenic river muds (material composition, geochemical features, ecological assessment)]. *Ekologicheskaya ekspertiza* [Environmental Expertise]. 2013. No. 1. P. 2–195.

*Keinonen M.* The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966–1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source. *The*

*Science of the Total Environment*. 1992. Vol. 113, no. 3. P. 251–268. doi: 10.1016/0048-9697(92)90004-C

Komárek M., Ettler V., Chrastný V., Mihaljevi M. Lead isotopes in environmental sciences: A review. *Environment International*. 2008. Vol. 34, no. 4. P. 562–577. doi: 10.1016/j.envint.2007.10.005

Loring D. H. Lithium – a new approach for the granu-  
lometric normalization of trace metal data. *Marine Chemistry*. 1990. Vol. 29. P. 155–168. doi: 10.1016/0304-4203(90)90011-Z

McConnell J. R., Edwards R. Coal burning leaves  
toxic heavy metal legacy in the Arctic. *Proceedings  
of the National Academy of Sciences*. 2008. Vol. 34.  
P. 12140–12144.

Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D. The history  
of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North  
America: Evidence from lake and peat bog sediments.

*Sources, Deposition and Capony Interactions*. Vol. III,  
Acidic Precipitation. N. Y.: Springer-Verlag. 1990. P. 73–  
101. doi: 10.1007/978-1-4612-4454-7\_4

Nriagu J. O. The rise and fall of leaded gasoline. *Sci-  
ence of The Total Environment*. 1990. Vol. 92. P. 13–28.  
doi: 10.1016/0048-9697(90)90318-O

Thomas V. M. The elimination of lead in gasoline.  
*Annual Review of Energy and the Environment*. 1995.  
Vol. 20. P. 301–324.

Teng Y., Ni S., Zhang C., Wang J., Lin X., Huang Y.  
Environmental geochemistry and ecological risk of va-  
nadium pollution in Panzhuhua mining and smelting  
area, Sichuan, China. *Chinese Journal of Geochemistry*.  
2006. Vol. 25, no. 4. P. 379–385.

Received April 05, 2017

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Слуковский Захар Иванович

старший научный сотрудник лаб. геохимии,  
четвертичной геологии и геоэкологии  
Институт геологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: slukovskii\_z@igkrc.ru

### Ильмаст Николай Викторович

заведующий лаб. экологии рыб  
и водных беспозвоночных  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика  
Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: ilmast@karelia.ru

### Суховская Ирина Викторовна

научный сотрудник лаб. экологической биохимии  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика  
Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: sukhovskaya@inbox.ru

### Борвинская Екатерина Витальевна

научный сотрудник лаб. экологической биохимии  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика  
Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: katsu@inbox.ru

### Гоголев Максим Александрович

младший научный сотрудник лаб. геохимии,  
четвертичной геологии и геоэкологии  
Институт геологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: mag-333@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Slukovskii, Zakhar

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: slukovskii\_z@igkrc.ru

### Ilmast, Nikolay

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: ilmast@karelia.ru

### Sukhovskaya, Irina

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: sukhovskaya@inbox.ru

### Borvinskaya, Ekaterina

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: katsu@inbox.ru

### Gogolev, Maksim

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: mag-333@mail.ru