

Отклик диатомовой флоры малого озера на воздействие тяжелых металлов в условиях урбанизированной среды Республики Карелии*

З. И. Слукровский¹, Т. С. Шелехова¹, Е. В. Сыроежко²

¹ Карельский научный центр Российской академии наук (КарНЦ РАН),
Российская Федерация, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11

² Петрозаводский государственный университет,
Российская Федерация, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Для цитирования: Слукровский З. И., Шелехова Т. С., Сыроежко Е. В. Отклик диатомовой флоры малого озера на воздействие тяжелых металлов в условиях урбанизированной среды Республики Карелии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 1. С. 103–123. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.106>

В статье приведены результаты исследования колонки современных донных отложений (ДО) малого водоема — оз. Ламба, расположенного в черте г. Петрозаводска. Химический анализ показал, что изученные ДО, относящиеся к железистым сапропелям, значительно обогащены тяжелыми металлами (ТМ), такими как Pb, Zn, Cd, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, V, W). Происхождение этих ТМ тесно связано с влиянием урбанизированной среды, а также процессами техногенного загрязнения в результате трансграничного переноса некоторых металлов. Исследование ископаемой диатомовой флоры оз. Ламба, насчитывающей 124 вида диатомей, позволило установить связь между антропогенным воздействием на водный объект и изменениями в структуре диатомового комплекса. Установлены виды-индикаторы Pb, Cd, Tl, W и других загрязнителей, повышенное содержание которых негативно влияет на экосистему, а также виды, проявляющие устойчивость к исследованным ТМ. Приводятся свидетельства накопления в створках диатомей тонкодисперсных частиц озерных отложений, в химическом составе которого установлено присутствие V, являющегося одним из приоритетных загрязнителей водоема.

Ключевые слова: диатомей, донные отложения, тяжелые металлы, малое озеро, Петрозаводск, Республика Карелия.

Введение

Загрязнение тяжелыми металлами (ТМ) — глобальная проблема современности. Начиная со второй половины XVIII века до настоящего времени, т. е. в эпоху индустриального развития общества, основные источники поступления этих химических элементов в окружающую среду — предприятия различных отраслей промышленности, транспорт, объекты сельского хозяйства, а также городские территории как совокупный фактор, объединяющий сразу несколько различных по природе и происхождению источников поступления метал-

* Исследование выполнено по государственному заданию ИГ КарНЦ РАН, а также частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05- 00897.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

лов (Сае́т и др., 1990). Мигрируя воздушным и водным путями вместе с другими веществами, ТМ могут накапливаться в поверхностных слоях донных отложений (ДО) водных объектов, в связи с чем ухудшается не только общее состояние последних, но и меняется структура сообщества живых организмов, населяющих водоем/водоток, вплоть до гибели определенных групп животных или растений (Даува́льтер, 2012).

Известно, что геохимические особенности ДО малых озер являются индикаторами состояния всей водосборной площади, отражая и природные, и антропогенные изменения, происходящие на обозначенной территории (Даува́льтер, 2006; Страховенко и др., 2014). Палеолимнологические реконструкции, проводимые на основе детального изучения колонок ДО озер, позволяют оценить климатические, экологические и антропогенные изменения, происходившие на водосборах водоемов в исследуемый исторический период (Субетто и др., 2017). Индикаторами определенных событий прошлого могут быть и динамика изменений концентраций микроэлементов, в том числе ТМ (Слуковский и др., 2017), и смена комплексов диатомовых водорослей (диатомей) (Денисов, 2012; Öberg et al., 2012; Chen et al., 2013; Шелехова и Субетто, 2016), состоящих из диоксида кремния (SiO_2), что позволяет этим водорослям сохраняться долгое время в толще ДО.

Наиболее информативными получаются исследования, совмещающие несколько различных по своей природе методов изучения колонок ДО, что сводит к минимуму возможные ошибки при интерпретации полученных результатов.

Цель данной работы — проанализировать взаимосвязь изменений в видовом составе диатомового комплекса ДО расположенного в черте г. Петрозаводска (Республика Карелия) малого водоема — оз. Ламба — с антропогенным загрязнением, вызванным комплексным воздействием ТМ на озерную экосистему.

Объект исследования

Ламба — малое озеро ($61^{\circ}48.428'$ с. ш. и $34^{\circ}14.967'$ в. д.), расположенное в северо-западной части г. Петрозаводска, в районе Сулажгора (рис. 1). Берега водоема низкие, заболоченные. Из северной части оз. Ламба вытекает руч. Студенец, впадающий в р. Томицу.

Площадь водоема — $0,014 \text{ км}^2$, длина береговой линии — $0,58 \text{ км}$ (Водные..., 2013), средняя и максимальная глубины — соответственно $3,4$ и $5,2 \text{ м}$ (Потахин, 2011).

Для воды оз. Ламба характерна высокая цветность и низкая прозрачность. Следствия этого — бедный видовой состав и низкая плотность фитоперифитона. В фитоперифитоне Ламбы на немногочисленных макрофитах выявлено 29 видов синезеленых, зеленых и диатомовых водорослей (Комулайнен, 2014).

ДО озера представлены сапропелевыми илами с высоким содержанием железа. Мощность толщи сапропеля, подстилаемого глинами, — около 7 м . Верхний слой ДО, отобранных дночерпателем Экмана — Берджа, загрязнен рядом ТМ, содержания которых значительно выше фонового уровня (Слуковский и Медведев, 2015).

Ихтиофауна озера представлена двумя видами рыб — окунем и плотвой, в мышцах, печени и костях которых установлено накопление ТМ, указывающее на миграцию поллютантов по трофическим цепям (Слуковский и др., 2016).

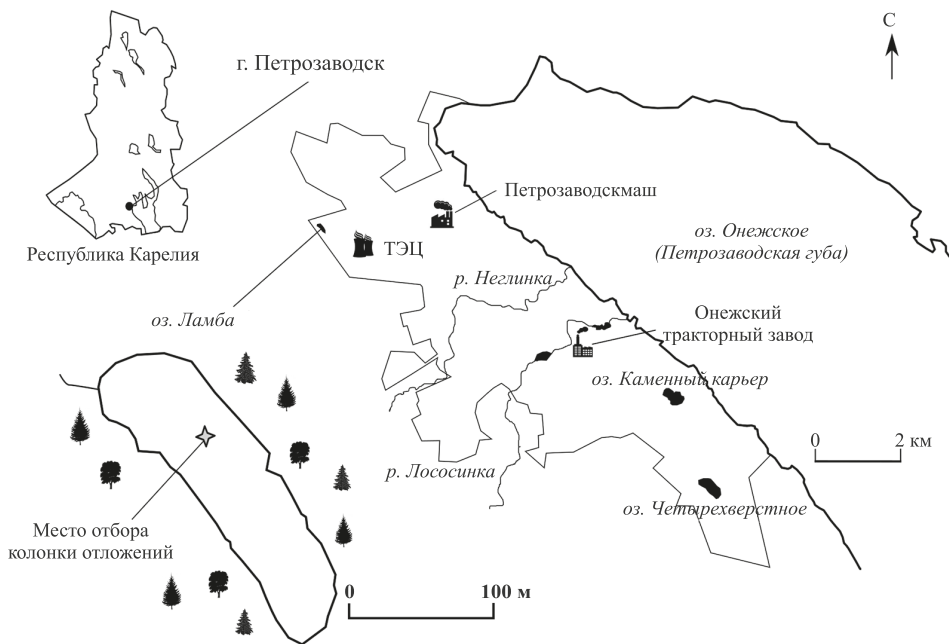


Рис. 1. Район исследования

По данным микробиологического анализа, воде оз. Ламба соответствует статус мезотрофных водоемов, установлен высокий уровень загрязнения воды органическим веществом (Макарова и др., 2017).

Анализ диатомового комплекса ДО оз. Ламба ранее не проводился.

Материалы и методы

В августе 2015 г. при помощи пробоотборника Limnos (производство Финляндия) была отобрана колонка ДО мощностью 55 см, из которой с интервалом 5 см были взяты образцы. Исследования ДО проводились на базе лаборатории «Аналитического центра» ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, где пробы ДО доводили до воздушно-сухого состояния.

Содержание микроэлементов (Pb, Zn, Cd, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, V, W, Li, Rb, Cs, Sr, Ba) в пробах 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 оз. Байкал БИЛ-1 — ГСО 7126—94). Подробная методика подготовки проб ДО описана в статье (Слуковский, 2015).

Содержание главных элементов (оксидов Si, Ti, Al, P, Mn, Mg, Fe, K, Na, Ca) было определено при помощи рентген-флуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT'X (Thermo Fisher scientific). Подготовка пробы к анализу включала в себя следующие этапы:

- плавление образца и флюса в золото-платиновых тиглях в электроплавильной печи для приготовления образцов Katanax K1 (SPEX SamplePrep),
- остывание стекловатого расплава,
- изготовление стеклянного диска для измерений из остывшего расплава.

Потери при прокаливании (ППП) определяли 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).

Техническая обработка проб выполнена по общепринятым методикам (Диатомовые..., 1974; Давыдова, 1985), включающим в себя процедуры выделения створок из донных осадков и приготовления постоянных препаратов. Для этого образцы дезинтегрировали и очищали от загрязнений при помощи пиррофосфорнокислого натрия с последующей отмывкой от него по методу декантации. Для подъема диатомей использовали калиево-кадмиевую тяжелую жидкость. В качестве среды для заключения створок диатомей применяли анилин-формальдегидную смолу (показатель преломления 1,68). Створки диатомей подсчитывали по горизонтальному ряду в средней части стекла до 250 экземпляров. По возможности диатомей идентифицировали до вида, разновидности и формы с использованием различных источников (Генкал и др., 2015; Куликовский и др., 2016) и др. Для выявления роли отдельных видов и состава доминирующих комплексов виды диатомей подразделяли на:

- а) единичные, доля которых в осадках была менее 1 %;
- б) обычные (1–5 %);
- в) массовые (более 5 %).

Среди массовых выделяли доминанты, доля створок которых превышала 10 %, и субдоминанты, доля которых была от 5 до 10 %.

Подсчет створок и таксономическая идентификация выполнены в световом микроскопе Jenaval (Carl Zeiss Jena) при увеличении в 1000 раз. Диатомовый анализ выполнен по 11 образцам, которые, как уже упомянуто, были отобраны послойно, без перерывов, каждые 5 см колонки ДО. По составу ископаемой диатомовой флоры выполнены реконструкции теоретических значений рН среды согласно (Reinberg and Hellberg, 1982). Расчет индекса разнообразия видов диатомей выполнялся по формуле Шеннона (индекс Шеннона — H) (Shannon, 1948).

Для получения микроскопических изображений створок диатомовых водорослей из изученных ДО оз. Ламба, а также анализа их химического состава был использован электронный микроскоп (СЭМ) VEGA II LSH с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350.

Результаты исследований

Геохимический анализ

По данным рентгенофазового анализа, основными породобразующими минералами исследованных озерных осадков являются кварц SiO_2 и альбит $\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$. Кроме того, по данным электронного сканирующего микроскопа в изучаемых ДО установлено присутствие минералов, связанных с железом (лимонита, гидротроилита, вивианита и др.), что характерно для современных ДО малых озер южной части Карелии (Синькевич, Экман, 1995).

Анализ содержания главных элементов и органического вещества (ППП) в колонке ДО оз. Ламба выявил в исследованных ДО преобладающее содержание следующих веществ (рис. 2):

- органики (31,0–62,2 масс. %; среднее: 53,8),
- кремнезема (14,3–32,0; среднее: 20,9),
- оксида алюминия (1,3–7,0; среднее: 3,4),
- суммарного железа (9,1–23,8; среднее: 14,3).

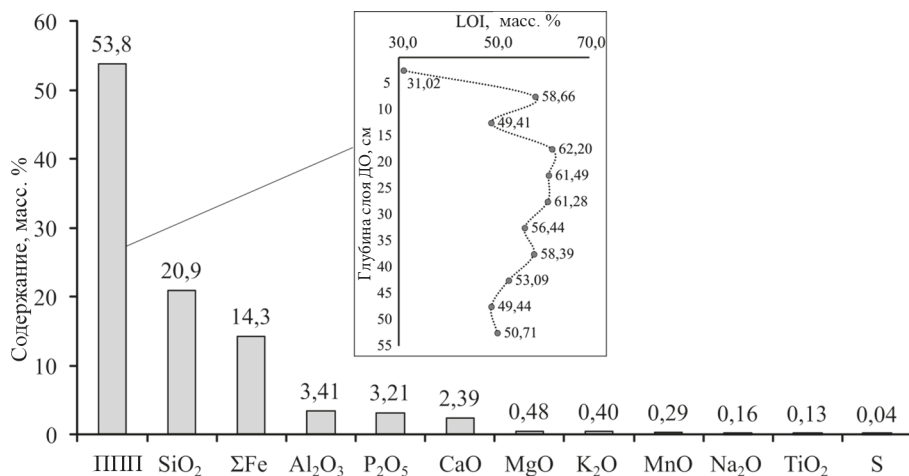


Рис. 2. Средние концентрации главных элементов и органического вещества в колонке ДО оз. Ламба (0–55 см) и вертикальное распределение концентраций органического вещества в разрезе ДО (Слуковский и др., 2017)

Содержание железа в изученных ДО позволяет отнести их к типу железистых сапропелей, так как одним из источников питания оз. Ламба являются подземные воды, обогащенные соединениями железа. Учитывая имеющуюся связь между накоплением железа и марганцем с кальцием, можно сделать вывод, что подземные источники повлияли на накопление и распределение в ДО городского озера и этих указанных элементов.

Характер распределения микроэлементов, в том числе ТМ, в толще исследуемых озерных осадков указывает на то, что они почти полностью сформировались в индустриальный период. Самым чистым (условно фоновым) слоем можно считать самый нижний слой колонки ДО — 51–55 см (рис. 3), учитывая, что содержание ТМ в этом слое равно или меньше их содержания в ДО условно чистых малых озер, расположенных на территории Карелии (Слуковский и Медведев, 2015; Слуковский и др., 2017). Далее по мере формирования осадочной толщи накапливаются загрязняющие вещества и сопутствующие им элементы, к которым можно отнести Li, Rb и Sr. Кроме того, в ряде публикаций отмечается и большая экологическая значимость исследования указанных щелочных и щелочноземельных металлов в ДО. Указывается также, что эти элементы допустимо использовать в качестве маркеров тех или иных природных и техногенных процессов, связанных с образованием осадочных отложений, в том числе в современных водных объектах.

Наибольшее накопление Li, V, Cr, Ni, Rb, Cu, Mo, W приходится на самый верхний слой ДО оз. Ламба — от 0 до 20 см (см. рис. 3). Установлено, что относительно условно фоновому уровню, за который принято в данной публикации содержание того или иного элемента в слое 51–55 см, в слое 0–20 см содержание ТМ возрастает в следующих пропорциях:

Li — в 112 раз,	Cr — в 16 раз,	Ni — в 55 раз,
V — в 262 раза,	Co — в 2,3 раза,	Rb — в 179 раз.

Причем максимальные содержания этих металлов приходятся на слой ДО 6–10 см.

Для Cu, Mo, W максимумы содержания отмечены в слое 0–5 см, в котором установлено превышение их содержания над условным фоном в 54, 3,4 и 26 раз соответственно. Кроме того, небольшие пики содержания Co, Cu и Mo отмечены в слое ДО 31–40 см. Единому закону подчинено накопление Zn и Sr в исследуемых осадках оз. Ламба. Максимальная аккумуляция этих металлов приходится на слой ДО 36–40 см. Здесь содержание Zn возрастает в 10 раз, а Sr — в 8. Далее до слоя 11–15 см в ходе седиментации содержания обоих металлов снижаются, а затем опять возрастают до уровня, превышающего фон в 7 и 4 раза соответственно.

Накопление Cd и Tl в ДО оз. Ламба плавно увеличивается от самой нижней части слоя 11–15 см, в которой содержание Cd несколько снижается, поэтому пик аккумуляции этого ТМ отмечен в слое ДО 16–20 см, где оно в 4 раза превышает фон. Наибольшее накопление Tl установлено в слое 6–10 см, в котором фон превышен в 13 раз. В самом верхнем слое ДО содержание этого металла снижается почти в 2 раза по сравнению с нижележащим слоем.

Максимальное содержание Pb в ДО оз. Ламба отмечается в слое 31–35 см, где оно в 40 раз превышает условно-фоновый уровень. Затем оно плавно снижается до 10-кратного превышения над фоном в слое 6–10 см (см. рис. 3). В самом верхнем слое ДО содержание Pb снова возрастает, в 12 раз превышая природный уровень.

Таким образом, распределение всех металлов в колонке ДО весьма различно, что свидетельствует о разных источниках поступления этих элементов в экосистему водоема. Накопление V, Cr и Ni в верхних слоях ДО связано с деятельностью Петрозаводской теплоцентрали (ТЭЦ), расположенной в 500 м от оз. Ламба (см. рис. 1). С момента ее запуска в 1976 г. и до начала 2000-х гг. на ТЭЦ использовали в качестве основного топлива мазут, сжигание которого способствует распространению ряда загрязнителей, в том числе V, Ni и Cr, через пылевые выбросы предприятия (Саэт и др., 1990; Teng et al., 2006). Переход предприятия на природный газ (мазут при этом использовался как резервное топливо) повлиял на снижение концентраций указанных ТМ в самом верхнем слое ДО, однако кратность превышения условно фоновому уровню для этих металлов все равно остается довольно высокой, чему, вероятно, способствует постоянный снос терригенного материала в озеро в результате эрозионных процессов и поверхностного стока.

Пики концентраций Li, Co, Rb и Tl в слое 6–10 см, вероятно, также являются следствием воздействия выбросов ТЭЦ, так как пыль, выбрасываемая при сжигании мазута, может содержать и эти элементы.

Анализ распределения V, Ni, Cr в изучаемой колонке отложений позволил установить ориентировочную скорость осадконакопления в озере в период актив-

ного техногенного воздействия, равную 0,5 см/год, а также возраст всей толщи ДО, который достигает приблизительно 105 лет (Слуковский и др., 2017). На основе этих данных дана эколого-геохимическая интерпретация полученных результатов.

Воздействие завода, принадлежащего ОАО «Петрозаводскмаш» (в том числе литейного завода с таким же названием) и начавшего свою деятельность в 1960-х гг., скорее всего, является причиной загрязнения Cu, Zn, Mo и W верхних слоев ДО оз. Ламба. Завод расположен всего в 3 км от водоема (см. рис. 1) и до сих пор активно функционирует, что способствует активному накоплению перечисленных элементов в текущий момент.

До начала 2000-х гг. на территории Петрозаводска действовало другое крупное предприятие машиностроительного комплекса, имевшее свое литейное производство, — «Онежский тракторный завод» (ОТЗ). Оно располагалось в центре города (см. рис. 1) и было градообразующим. Проведенный ранее анализ химического состава почвогрунтов, отобранных на бывшей промышленной площадке ОТЗ, выявил значительные превышения содержаний в них Zn, Cu, Co, Mo, W над ПДК и геохимическим фоном города (Климатические..., 2013). Кроме того, эти ТМ входят в единую техногенную ассоциацию элементов (вместе с Cd), связанных с выбросами промышленного предприятия. Это указывает на то, что пики концентраций Zn, Co, Sr, Cd и Mo в слое осадков ДО оз. Ламба на глубине от 31 до 45 см могут быть связаны с активными историческими выбросами тракторного завода.

Накопление Cd, Tl и Pb в изучаемой толще ДО может быть вызвано несколькими факторами. Указанные ТМ являются агентами глобального загрязнения окружающей среды Северного полушария Земли в связи с выбросами промышленных предприятий Северной Америки и Европы, датированных 1860–1940 гг. (McConnell, Edwards, 2008). Кроме того, все указанные элементы могли поступать в водную среду оз. Ламба из-за деятельности предприятий Петрозаводска, если учитывать бурное развитие этого сектора в послевоенные годы и вплоть до начала 1990-х гг. Экстремально высокие содержания Pb, несомненно, связаны с фактором активного использования в 1940–1980-е гг. по всему миру соединений Pb — главным образом тетраэтилсвинца $Pb(CH_3CH_2)_4$ — при изготовлении моторного топлива (Thomas, 1995; Komárek et al., 2008; Даувальтер, 2012). Пик общемировых выбросов свинца в атмосферу пришелся на 1960–1970-е гг. (Nriagu, 1990; Thomas, 1995). С 1976 г. началось постепенное вытеснение Pb-содержащего топлива, которое за рубежом было завершено к 1986 г., а в России — только к 2002 г. Таким образом, это отразилось на тенденции небольшого снижения концентраций Pb в самых верхних слоях ДО. Однако условно фоновый уровень Pb для изученных ДО (составляющий 2,0–3,3 мг/кг) пока недостижим ввиду высокого уровня накопления этого загрязнителя в почвенном покрове урбанизированных районов. Аналогичное утверждение относится и ко всем остальным ТМ, исследованным в современных отложениях оз. Ламба, что подтверждается результатами изучения загрязнения всей территории Петрозаводска (Крутских и Косинова, 2014) и акватории Петрозаводской губы Онежского оз. (Белкина и др., 2016). В частности, отмечаются повышенные содержания Ni, Cu, Cd и Zn в поверхностном слое ДО Петрозаводского залива, что свидетельствует о широком распространении загрязнителей, поступающих от основных источников на территории города.

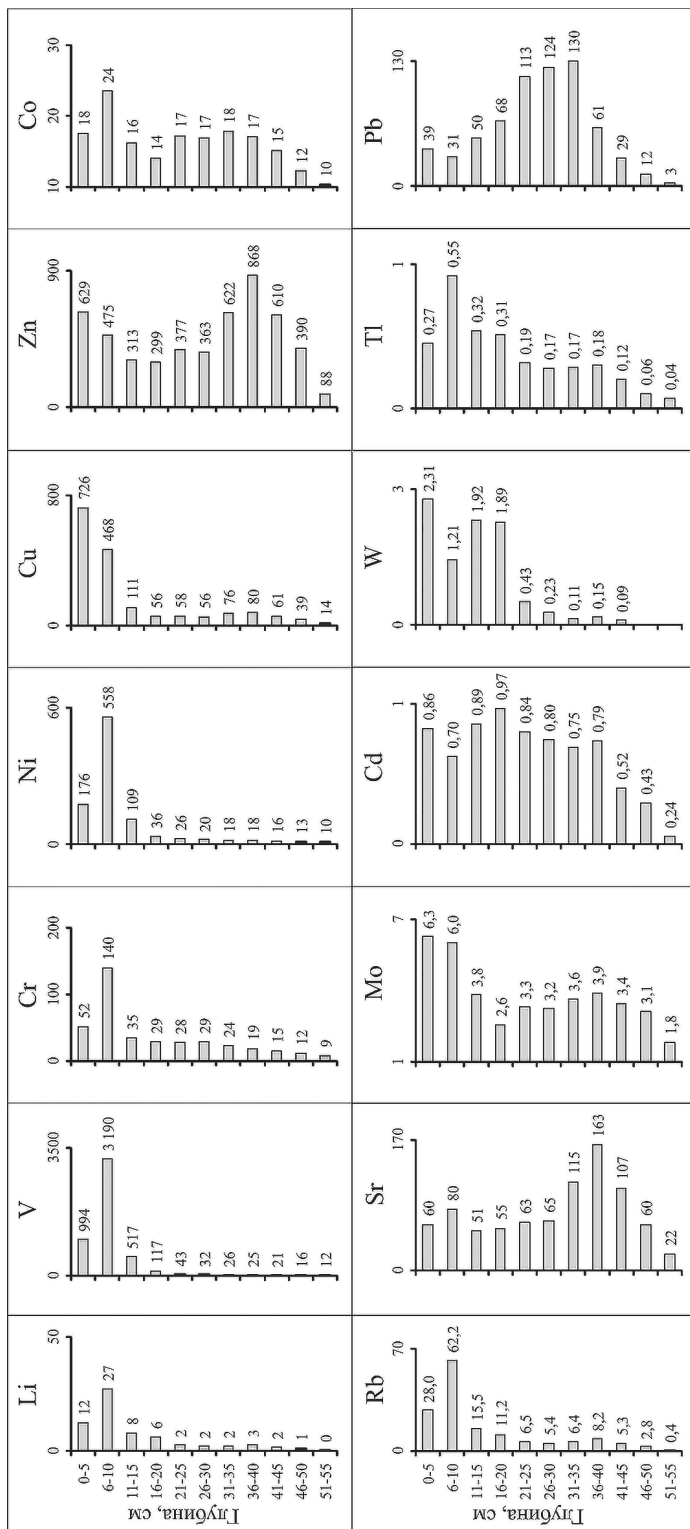


Рис. 3. Вертикальное распределение микроэлементов в колонке ДО оз. Ламба, мг/кг

В ДО выявлена относительно богатая по разнообразию диатомовая флора, насчитывающая 124 вида, и ее разновидности из 24 родов. Как уже было упомянуто, наиболее массовые виды приведены на рис. 4, анализ которого позволяет разделить всю колонку отложений на три части, или слоя, каждый из которых различается по составу диатомей, населяющих озерные ДО.

Нижняя часть разреза ДО (36–55 см) отличается значительным преобладанием видов *Aulacoseira italica* + *var. valida*, *Tabellaria fenestrata*, *T. flocculosa* — планктонно-литоральных форм, характерных для небольших водоемов. Кроме них в данном интервале глубин выделяются виды из обрастаний — *Eunotia pectinales var. ventralis*, *Eunotia veneris*, *Fragilaria intermedia*, *Gomphonema ssp.*, донные *Sellaphora pupula var. rectangularis*. Важно подчеркнуть, что с отметки 41 см в составе комплекса появляются *Asterionella formosa* (10–18 % общего числа видов), *Cocconeis placentula*, планктонный вид *Cyclotella (Discotella) stelligera*, возрастает доля реофильной формы *Meridion circulare* (до 2,5 %). По местообитанию (рис. 5) структура диатомового комплекса в слое 36–55 см нестабильна: содержание планктонных форм снижается вверх по разрезу, а число форм обрастаний и донных видов, наоборот, в этом направлении растет. Варьирует и доля донных видов, что явно указывает на серьезные изменения в экосистеме водоема.

По галобности структура видов на этапе развития диатомовой флоры, которому соответствует слой 36–55 см, существенно отличается от таковой в вышележащем слое ДО на последующих этапах. Несмотря на доминирование индифферентных по отношению к солености форм, в составе комплекса наблюдается значительное присутствие видов-галофобов, характерных для северных олиготрофных водоемов, а доля видов, предпочитающих повышенную минерализацию, не превышает 10 %. Эти факты могут свидетельствовать о естественных условиях развития водоема в субатлантическое время (Шелехова и др., 2015). Это подтверждается структурой комплекса по биогеографии видов, так как основное господство принадлежит арктоальпийским и бореальным формам, что характерно для северных водоемов (Комулайнен и др., 2006). Доля космополитов — видов широкого географического распространения — практически вдвое возрастает от нижней части разреза до отметки 36 см, также указывая на изменения в ходе естественных процессов развития водоема. Показатель pH среды соответствует кислым условиям и незначительно колеблется от 6,1 до 6,3 (рис. 6).

В центральной части колонки ДО (слой 16–35 см) отмечена резкая смена в группе планктонных доминантов (см. рис. 4): главное господствующее положение (до 80–90 % общего числа створок) занимает планктонная форма *Aulacoseira granulata var. angustissima* (рис. 7). Как правило, такой факт свидетельствует об антропогенном влиянии на водоем (Шелехова, Крутских, 2013). В этой части колонки ДО практически исчезают доминировавшие в нижней части разреза ДО виды *Aulacoseira italica* + *var. valida*, также резко сокращается число видов *Cyclotella (Discotella) stelligera* (см. рис. 4). Доля остальных форм диатомовых (и обрастателей, и донных) незначительна и не превышает в сумме 20 %. Среди последних можно отметить *Gomphonema ssp.* (доля которой снизилась в этом слое до 4 % по сравнению с 12 % в слое ДО от 36 до 55 см) и *Eunotia ssp.* (до 2,5 %). Практически

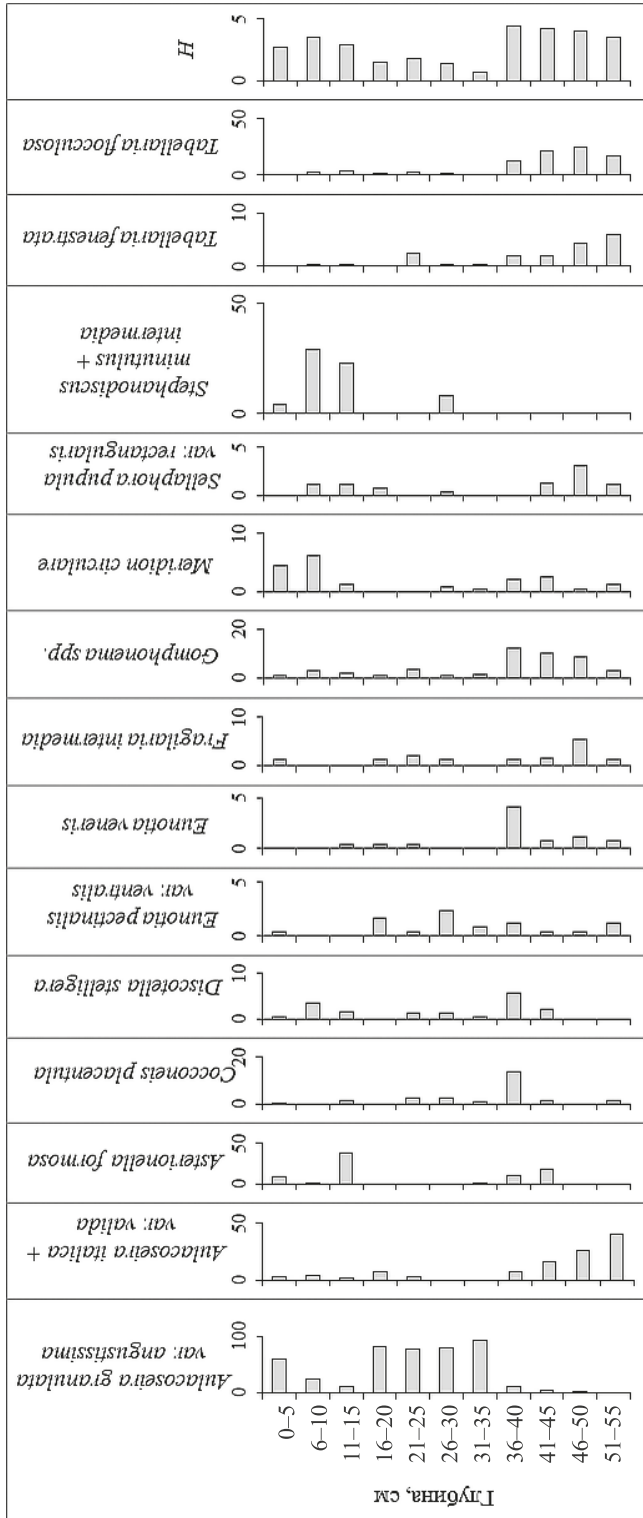


Рис. 4. Диатомовые комплексы ДЮ оз. Ламба: относительная численность (%) наиболее массовых видов и H — индекс видового разнообразия Шеннона

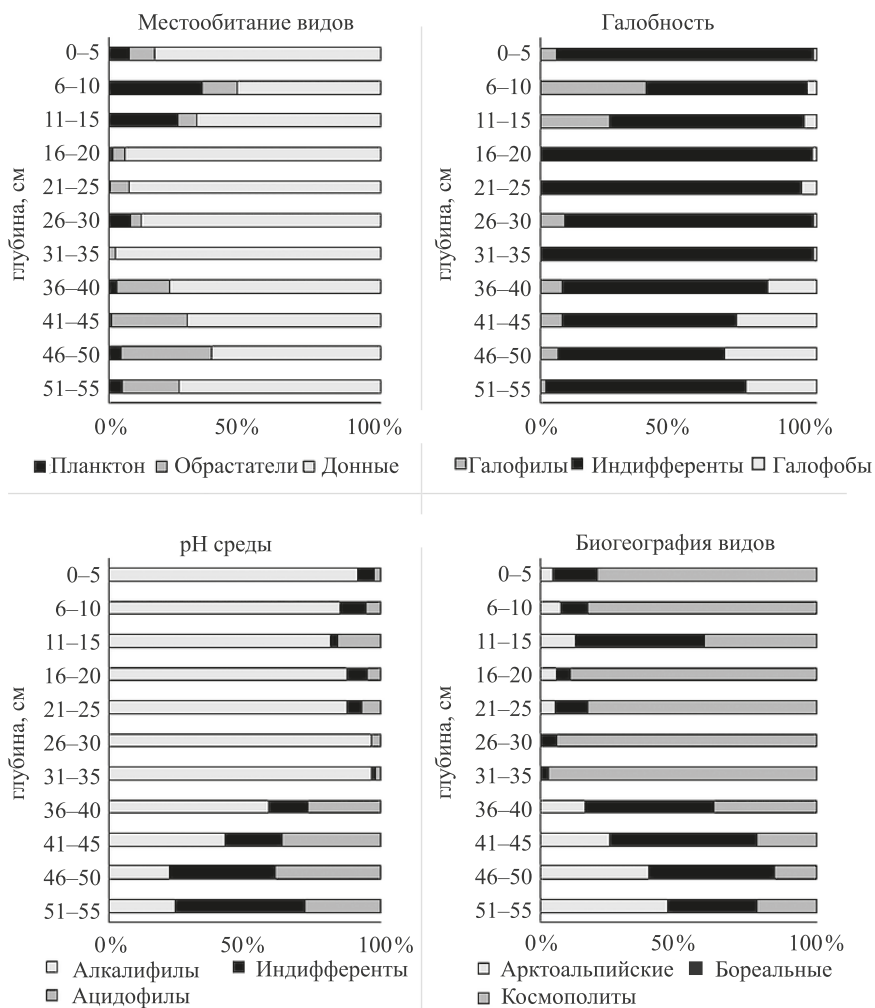


Рис. 5. Эколого-географические характеристики диатомовых комплексов в ДО оз. Ламба

исчезли здесь донные формы диатомей *Sellaphora pupula* var. *rectangularis*, а также *Tabellaria fenestrata*, *T. flocculosa*.

В слое ДО 26–30 см отмечены планктонные формы диатомей рода *Stephanodiscus*. На данном этапе формирования ДО оз. Ламба доля галофобов, не переносящих роста содержания солей, в воде резко сокращается с 20 до 1–2%, большинство диатомового комплекса составляют виды-индифференты, они полностью вытесняют даже незначительное число галофилов (см. рис. 5). Господство переходит к космополитам (их доля более 80%), в то время как доля арктоальпийских и бореальных видов сокращается до минимума (менее 5–10%).

Существенные изменения наблюдаются для реакции pH (см. рис. 6): кислые условия среды сменяются слабощелочными и щелочными (pH колеблется от 7,2 до 7,6). Объяснить такие изменения в составе диатомового комплекса можно только влиянием антропогенного фактора на экосистему водоема, индикаторами которо-

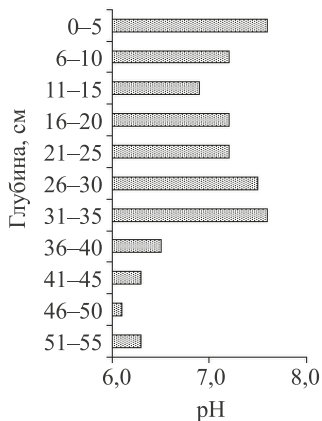


Рис. 6. Гистограмма вертикального распределения значений pH среды, рассчитанных по составу диатомовой флоры ДО оз. Ламба

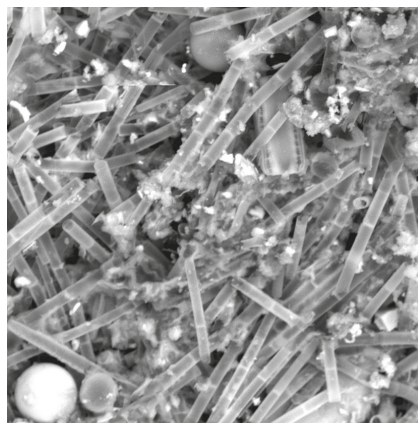


Рис. 7. Массовое скопление створок *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*

го служат содержания ТМ, в частности повышенное содержание Pb, Cd, Zn и Co (см. рис. 3).

Самый верхний слой ДО (от 0 до 15 см) выделен в связи со значительным увеличением в составе диатомового комплекса содержания видов *Meridion circulare* и *Asterionella formosa*, резким снижением планктонных форм *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* и возрастанием доли видов *Stephanodiscus minutulus* var. *minutulus*, *S. intermedia* (см. рис. 4). В начале этого этапа развития озера резко сокращается доля планктонных форм, которые вытесняются донными и видами из обрастаний (см. рис. 4). Полное господство в структуре видов по галобности принадлежит индифферентам, заметно увеличивается доля галофилов, отреагировавших, по-видимому, на поступление в водоем химических элементов в результате выбросов ТЭЦ, идентифицированных по накоплению в верхней части разреза V, Ni, Cr и Tl (см. рис. 3), а также выбросов литейного производства завода «Петрозаводскмаш» (Cu, Zn, W, Mo).

В слое ДО от 15 до 6 см в водоеме создаются условия для развития галофобов, арктоальпийских и бореальных видов, однако по анализу самого верхнего слоя ДО (0–5 см) можно судить о господстве индифферентов и космополитов (см. рис. 5), что указывает на усиление фактора загрязнения водоема. Реконструкция pH-условий среды показала, что в течение периода, соответствующего слою 6–15 см, pH колеблется от 6,9 до 7,5, возрастая в самых верхних слоях ДО (см. рис. 6).

Обсуждение результатов

Анализ биологического разнообразия видов диатомовых водорослей (которое выражено индексом Шеннона H') служит хорошим доказательством изменений в экосистеме городского озера, происходивших в индустриальный период (Luís et al., 2013). Максимум H' (от 4,02 до 4,40) отмечается в самой нижней части разреза, где минимальны содержания большинства ТМ (см. рис. 3 и 4).

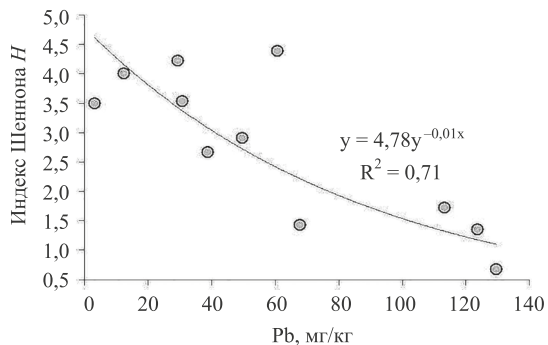


Рис. 8. Корреляция между концентрацией Pb и индексом Шеннона

В слое ДО 31–35 см H резко снижается до 0,69. Именно в этом слое отмечен максимум содержания Pb (129,6 мг/кг), которое по всему разрезу тесно коррелирует с этим показателем (рис. 8). Однако низкие значения H для диатомей, безусловно, связаны и с другими исследованными металлами, если учитывать токсичность каждого из них для диатомовых водорослей при высоких содержаниях ТМ в воде и ДО (Chen et al., 2013; Morin et al., 2014).

В верхней части разреза вновь наблюдается некоторое увлечение H , несмотря на повышенный фон V, Cr, Ni, Cu, Zn в слоях ДО от 0 до 20 см. Вероятно, наиболее опасным загрязнителем озера является Pb и, в некоторой степени, Cd и Tl, коррелирующие между собой.

Корреляционный анализ Пирсона позволил установить также значимые математические связи между содержаниями ТМ и относительной численностью того или иного конкретного вида диатомей изучаемого водного объекта (см. таблицу). Так, планктонный вид *Aulacoseira italica* + var. *Valida* чутко реагирует на увеличение содержаний Co, Cd и Pb — в слоях с их максимумом этот вид практически исчезает (см. рис. 3 и 4). Аналогична ситуация с другим планктонно-литоральным видом — *Tabellaria fenestrata*, число створок которого в ДО находится в тесной обратной связи с содержанием Co, Cd, W и Tl в ДО. Увеличение содержаний Cd, Tl и Pb приводит также к угнетению вида-образателя *Tabellaria flocculosa*. Кроме того, при высоких содержаниях Pb в ДО снижается число створок донного вида *Sellaphora ripula* var. *rectangularis*, чье исчезновение в экосистеме озера можно также связать с экстремальными содержаниями Zn, Mo, Cd, Mo и Tl (рис. 3 и 4).

В самой верхней части разреза (слой от 0 до 20 см) современных ДО оз. Ламба, где снижаются содержания Pb и, частично, Cd и Tl, а приоритетными загрязнителями становятся другие ТМ (в частности, V, Cr, Ni, Cu, Zn, W и др.), перечисленные выше виды диатомей угнетаются в тех же пропорциях, за исключением *Sellaphora ripula* var. *rectangularis*. Численность указанного вида несколько возрастает лишь на глубинах, где минимально содержание Pb, в то время как другие ТМ, вероятно, не оказывают на его развитие серьезного влияния (см. рис. 4).

Кроме того, отметим, что по сравнению с показателями для нижней части колонки ДО (36–55 см) снижение численности створок диатомей в связи с комплексным воздействием ТМ установлено на глубине более 35 см для видов

образстателей *Cocconeis placentula*, *Eunotia veneris*, *Fragilaria intermedia*, а также рода *Gomphonema spp.* (см. рис. 2). Таким образом, перечисленные выше виды диатомей можно считать индикаторами перестройки экосистемы озера в период интенсивной антропогенной нагрузки на исследованный водный объект.

Снижение численности одних видов диатомей в разные этапы развития оз. Ламба и увеличение доли других, более устойчивых (толерантных) к загрязнению водного объекта, видов, также является косвенным следствием антропогенного воздействия (Денисов, 2007; Hamilton et al., 2015). Значимая положительная корреляционная связь с содержанием в ДО Pb и Cd установлена для планктонного вида *Aulacoseira granulata var. angustissima*, который практически не встречается в нижней части колонки отложений, где содержания указанных ТМ находятся на условно фоновом уровне (см. таблицу). Вид *Meridion circulare* имеет положительную корреляцию с содержанием V, Cr, Ni, Co, Cu, Mo и Tl в озерных осадках. Аналогично поведение планктонного вида *Stephanodiscus minutulus + intermedia*, чья численность имеет максимум при повышенных содержаниях V, Cr, Ni, Co и Tl (см. рис. 2 и 4). Кроме того, следует отметить, что два экстремума Zn в разрезе изученных отложений коррелируют с пиками численности планктонного вида диатомей *Discotella stelligera*. Вероятно, механизмы адаптации к негативным воздействиям окружающей среды позволяют перечисленным видами диатомей активно развиваться, заполняя экологическую нишу, оставленную менее устойчивыми видами, учитывая мезотрофный статус изученного водоема (Макарова и др., 2017) и факт наличия значительного содержания органического вещества в ДО озера (см. рис. 4).

Таблица. Коэффициенты корреляции Пирсона между концентрациями ТМ и относительной численностью некоторых видов диатомей ДО оз. Ламба (приведены только значимые коэффициенты, превышающие $R_{крит.} = 0,60$ при $p < 0,05$)

Вид	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	W	Tl	Pb
<i>Aulacoseira granulata var. angustissima</i>								0,64			0,84
<i>Aulacoseira italica + var. Valida</i>			-0,76					-0,89			-0,70
<i>Cyclotella stelligera</i>						0,64					
<i>Meridion circulare</i>	0,87	0,81	0,65	0,86	0,81		0,84			0,65	
<i>Navicula pupula var. rectangularis</i>											-0,65
<i>Stephanodiscus minutulus + intermedia var. minutulus</i>	0,81	0,80	0,64	0,82						0,81	
<i>Tabellaria fenestrata</i>			-0,69					-0,87	-0,63	-0,68	
<i>Tetracyclus focculosa</i>								-0,80		-0,61	-0,65

Неодинаковая реакция пресноводных диатомей на воздействие одних и тех же ТМ отмечается в работах (Рыбаков и Шелехова, 2014; Lavoie et al., 2012; Шелехова и Крутских, 2013; Luís et al., 2013), что указывает на наличие, как уже было сказано, индикаторных и маталл-толерантных таксонов диатомовых водорослей. Таким образом, комплексное воздействие загрязнителей, поступающих в водные

объекты, оказывает ключевое влияние на перестройку всей структуры диатомовой флоры в исторический период, связанный с антропогенной деятельностью. Кроме того, у некоторых видов диатомей наблюдается уродливость створок, которая проявляется в несимметричности по отношению к продольной оси, отклонениях в морфологии створки, деформации панциря, что также может быть следствием антропогенного воздействия на водный объект (Lavoie et al., 2012; Ким, 2013).

Створки диатомовых водорослей также могут служить хорошими сорбентами тонкодисперсного (с размером частиц менее 0,1 мкм) материала ДО, в состав которого могут входить загрязнители, в том числе ТМ (Skorbiłowicz and Skorbiłowicz, 2011). Анализ состава частиц, заполнивших поры и створки диатомей ДО оз. Ламба на глубине 6–10 см (рис. 9), позволил выявить содержание V в концентрациях от 0,5 до 3,2 масс. % (медиана — 0,7 масс. %). Именно в этом слое изученных отложений петрозаводского озера установлено максимальное накопление этого металла — 3190 мг/кг. Таким образом, кремнистые створки диатомей выступают хорошими аккумуляторами V — одного из главных загрязнителей, поступающего в экосистему водоема в результате выбросов ТЭЦ. Наибольшее содержание V в створках диатомей отмечено у вида *Aulacoseira sp.* Кроме указанного металла в химическом составе микрочастиц, заполнивших створки, выявлены K, Ca, Fe, Mg, S и Al (рис. 9), входящие в состав породообразующих минералов.

Заключение

Разнообразие техногенных факторов, действовавших и продолжающих действовать на экосистему оз. Ламба, сказалось на динамике поведения ТМ в исторический период формирования современных отложений, что нашло отклик в экологии диатомовых водорослей городского водоема. Установлено, что индекс разнообразия видов диатомовых водорослей городского озера резко снижается в период интенсивной антропогенной нагрузки. Наиболее тесной является корреляция рассчитанного индекса *H* и содержания Pb, являющегося агентом глобального загрязнения Северного полушария Земли, а также выбросов автомобильного транспорта. С повышенным содержанием Pb в отложениях оз. Ламба также связано угнетение таких видов диатомей, как *Aulacoseira italica + var. Valida*, *Tabellaria flocculosa*, *Sellaphora pupula var. rectangularis*. Кроме того, исчезновение перечисленных видов диатомей, а также вида *Tabellaria fenestrata* в средней части исследованной толщи осадков является следствием негативного воздействия на флору озера Cd, Co, Tl, Zn и W.

Смена приоритетных загрязнителей водоема в верхней части колонки ДО привела лишь к небольшому увеличению разнообразия видов, однако перечисленные выше виды, а также таксоны *Cocconeis placentula*, *Eunotia veneris*, *Fragilaria intermedia*, *Gomphonema spp.* остались в угнетенном состоянии и при повышенных концентрациях в ДО V, Cr, Ni, Cu, Zn, W, поступление которых в озерную экосистему связано с деятельностью машиностроительных заводов Петрозаводска и городской ТЭЦ. При столь явной техногенной нагрузке на водный объект диатомовые водоросли видов *Aulacoseira granulata var. angustissima*, *Meridion circulare*, *Stephanodiscus minutulus + intermedia*, *Discotella stelligera* оказались толерантными к воздействию ТМ. Численность этих таксонов максимальна в слоях ДО с наибольшими

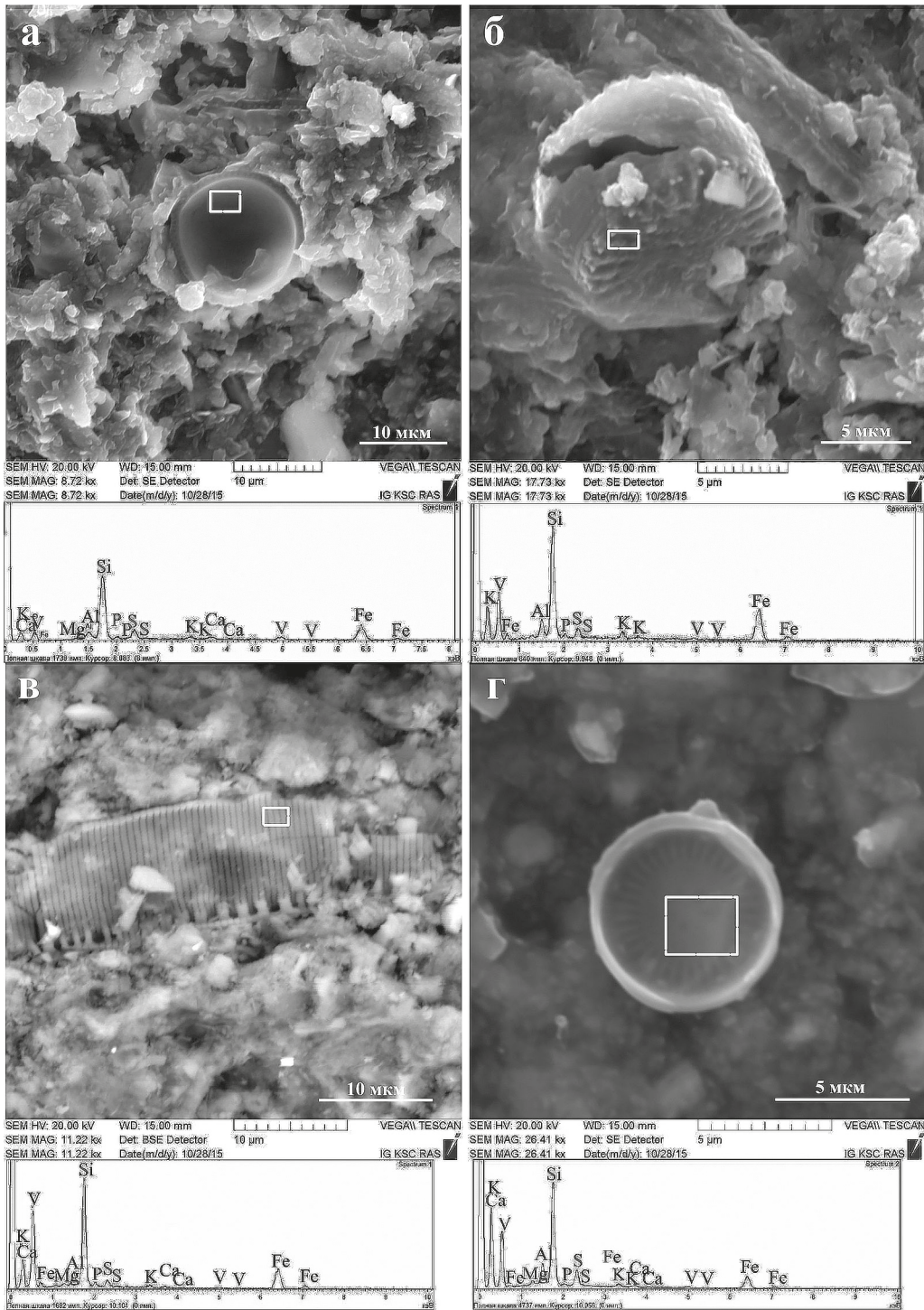


Рис. 9. Электронные изображения створок диатомей в ДО оз. Ламба и их химический состав в выделенных областях: а — *Aulacoseira* sp. (разрушена), б — *Cyclotella* sp. (фоссилизирована), в — *Hantzschia* sp. (обломок), г — *Stephanodiscus* sp.

концентрациями изученных загрязнителей. Проведенные исследования доказывают применимость метода диатомового анализа при изучении современных озерных ДО для реконструкций техногенного воздействия на водные экосистемы. Комплексный подход, применяемый авторами настоящей статьи, продемонстрировал успешное совмещение разных по сути методов изучения современных озерных ДО для получения важного с точки зрения экологии результата.

Авторы благодарят сотрудников Аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН А. С. Парамонова, В. Л. Утищину и М. В. Эхову за качественное выполнение аналитических работ, а также рецензентов за ценные замечания и предложения по представленной публикации.

Исследование выполнено по государственному заказу ИГ КарНЦ РАН, а также частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00897.

Литература

- Белкина, Н. А., 2016. Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера. Наука и образование 3(83), 135–139.
- Водные объекты города Петрозаводска: учебное пособие, 2013 / Литвиненко, А. В., Регеранд, Т. И. (под ред.). Карельский научный центр РАН, Петрозаводск.
- Генкал, С. И., Чекрыжева, Т. А., Комулайнен, С. Ф., 2015. Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии / Девяткин, В. Г. (под ред.). Научный мир, Москва.
- Давыдова, Н. Н., 1985. Диатомовые водоросли — индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Наука, Ленинград.
- Даувальтер, В. А., 2006. Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в донных отложениях водных объектов водосбора Белого моря в пределах Кольского полуострова. Геохимия 2, 237–240. <https://doi.org/10.1134/S0097807810040093>.
- Даувальтер, В. А., 2012. Геоэкология донных отложений озер. Изд-во МГТУ, Мурманск.
- Денисов, Д. Б., 2007. Изменения гидрохимического состава и диатомовой флоры донных отложений в зоне воздействия горнорудного производства (Кольский полуостров). Водные ресурсы 34(6), 719–730.
- Денисов, Д. Б., 2012. Реконструкция развития экосистемы малого горного субарктического водоема за последние 900 лет (на примере озера Академическое, Хибин, Кольский полуостров). Труды Кольского научного центра РАН 10, 127–148.
- Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии, 2015 / Девяткин, В. Г. (под ред.). Научный мир, Москва.
- Ким, Г. В., 2013. Морфологические аномалии диатомовых водорослей фитоэпилитона как индикаторы качества воды водотоков и водоемов горного Алтая. Мир науки, культуры, образования 5(42), 444–449.
- Комулайнен, С. Ф., 2014. Фитоперифитон в водоемах г. Петрозаводска (Республика Карелия). Труды Карельского научного центра РАН 2, 43–50.
- Комулайнен, С. Ф., Чекрыжева, Т. А., Вилянская, И. Г., 2006. Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология. КНЦ РАН, Петрозаводск.
- Крутских Н. В., Косинова И. И., 2014. Методика трансформации природной среды по результатам эколого-геохимических исследований (на примере г. Петрозаводск). Вестник Воронежск. ун-та. Серия: Геология. 3, 95–97.
- Макарова, Е. М., Слукровский, З. И., Медведев, А. С., Новицкий Д. Г., 2017. Оценка качества воды малых озер г. Петрозаводска по показателям бактериопланктона в подледный период. Ученые записки Петрозаводского государственного университета 6, 72–77.
- Потахин, М. С., 2011. Морфологические особенности водоемов г. Петрозаводска в: Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: материалы IV школы-конференции молодых ученых с международным участием (Петрозаводск, 26–28 августа 2011 г.). Петрозаводск, с. 180–183.

- Рыбаков, Д. С., Крутских, Н. В., Шелехова, Т. С., Лаврова, Н. Б., Слукровский, З. И., Кричевцова, М. В., Лазарева, О. В., 2013. Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия. ЭлекСис, Санкт-Петербург.
- Рыбаков, Д. С., Шелехова, Т. С., 2014. Диатомеи в донных осадках — индикаторы загрязнения водных экосистем в условиях урбанизации. Экология 45(1), 38–45.
- Саег, Ю. Е., Ревич, Б. А., Янин, Е. П., 1990. Геохимия окружающей среды. Недра, Москва.
- Синькевич Е. И., Экман И. М., 1995. Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Карельский научный центр РАН, Петрозаводск.
- Слукровский, З. И., 2015. Нормирование по литию концентраций тяжелых металлов в донных отложениях озер Ладожское и Четырехверстное (Республика Карелия). Химия в интересах устойчивого развития 23(4), 397–408.
- Слукровский, З. И., Ильмаст, Н. В., Суховская, И. В., Борвинская, Е. В., 2016. Анализ содержания тяжелых металлов в органах рыб озера Ламба (Петрозаводск, Республика Карелия), в: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения Г. М. Крепса и 110-летию со дня рождения О. И. Семенова-Тянь-Шанского. Изд-во Кольского науч. центра РАН, Апатиты.
- Слукровский, З. И., Ильмаст, Н. В., Суховская, И. В., Борвинская, Е. В., Гоголев, М. А., 2017. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия). Труды Карельского научного центра РАН 10, 45–63.
- Слукровский, З. И., Медведев, А. С., 2015. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях озер Четырехверстного и Ламбы (г. Петрозаводск, Республика Карелия). Экологическая химия 1, 56–62.
- Слукровский, З. И., Медведев, А. С., Бубнова, Т. П., Сыроежко, Е. В., 2017. Накопление и вертикальное распределение тяжелых металлов в сапропеле озера Грязное (Медвежьегорский район, Республика Карелия). Вестник МГТУ 20(1/2), 177–188. [https://doi.org/ 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-177-188](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-177-188).
- Страховенко В. Д., Кабанник В. Г., Маликова И. Н., 2014. Геохимические особенности экосистемы озера Кольванское (Алтайский край) и влияние на нее антропогенного воздействия. Литология и полезные ископаемые 3, 220–234.
- Субетто Д. А., Назарова Л. Б., Пестрякова Л. А., Сырых Л. С., Андроников А. В., Бискаборн Б., Дикманн Б., Кузнецов Д. Д., Сапелко Т. В., Греков И. М., 2017. Палеолимнологические исследования в российской части северной Евразии: обзор. Сибирский экологический журнал 24(4), 369–380.
- Шелехова, Т. С., Крутских Н. В., 2013. Геохимические особенности и состав диатомовых комплексов донных осадков р. Шуи (Республика Карелия). Труды Карельского научного центра РАН 6, 76–90.
- Шелехова, Т. С., Субетто, Д. А., 2016. Диатомовые водоросли донных отложений озер Заонежья: оценка современного состояния озер, реконструкция изменения уровня Онежского озера. Труды Карельского научного центра РАН 5, 88–105.
- Шелехова, Т. С., Субетто, Д. А., Тихонова, Ю. С., Потахин, М. С., 2015. Диатомовые водоросли современных отложений озер Заонежья: палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции. Общество. Среда. Развитие 2, 151–160.
- Chen, X., Mao, X., Cao, Y., Yang, X., 2013. Use of siliceous algae as biological monitors of heavy metal pollution in tree lakes in a mining city, southeast China. Oceanological and Hydrobiological Studies 42(3), 233–242.
- Hamilton, P. B., Lavoie, I., Alpay, S., Ponader, K., 2015. Using diatom assemblages and sulfur in sediments to uncover the effects of historical mining on Lake Arnoux (Quebec, Canada): a retrospective of economic benefits vs. environmental debt. Frontiers in Ecology and Evolution 3, 1–16.
- Komárek, M., Ettler, V., Chrastný, V., Mihaljevi, M. 2008. Lead isotopes in environmental sciences: A review. Environment International 34(4), 562–577. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.10.005>.
- Lavoie, I., Lavoie, M., Fortin, C. 2012. A mine of information: Benthic algal communities as biomonitors of metal contamination from abandoned tailings. Science of the Total Environment 425, 231–241.
- Luís, A. T., Alexander, A. C., Almeida, S. F. P., da Silva, E. F., Culp, J. M., 2013. Benthic diatom communities in streams from zinc mining areas in continental (Canada) and Mediterranean climates (Portugal). Water Quality Research Journal of Canada 48(2), 180–191.
- McConnell, J. R., Edwards, R., 2008. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. Proceedings of the National Academy of Sciences 34, 12140–12144.

- Morin, S., Corcoll, N., Bonet, B., Tlili, A., Guasch, H., 2014. Diatom responses to zinc contamination along a Mediterranean river. *Plant Ecology and Evolution*. 147(3), 325–332.
- Öberg, E., Andersen, T. J., Westerberg, L.-O., Risberg J., Holmgren, K., 2012. A diatom record of recent environmental change in Lake Duluti, northern Tanzania. *Journal of Paleolimnology* 48, 401–416.
- Nriagu, J. O., 1990. The rise and fall of leaded gasoline. *Science of The Total Environment* 92, 13–28. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90318-O](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90318-O).
- Renberg, I., Hellberg, T., 1982. The pH history of Lakes in Southwestern Sweden, as calculated from subfossil diatom flora of the sediments. *Ambio* 11(1), 30–33.
- Shannon, C. E., 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27, 379–423, 623–656.
- Skorbiłowicz, E., Skorbiłowicz, M., 2011. Metals in grain fractions of bottom sediments from selected rivers in north-eastern Poland. *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 567–578.
- Teng, Y., Ni, S., Zhang, C., Wang, J., Lin, X., Huang, Y., 2006. Environmental geochemistry and ecological risk of vanadium pollution in Panzhihua mining and smelting area, Sichuan, China. *Chinese Journal of Geochemistry* 25 (4), 379–385.
- Thomas, V. M., 1995. The elimination of lead in gasoline. *Annual Review of Energy and the Environment* 20, 301–324.

Статья поступила в редакцию 23 октября 2017 г.
Статья рекомендована в печать 14 февраля 2018 г.

Контактная информация:

Слуковский Захар Иванович — канд. биол. наук, snс, slukovskii_z@igkrc.ru
Шелехова Татьяна Станиславовна — канд. геогр. наук, snс; shelekh@krc.karelia.ru
Сыроежко Евгений Владимирович — siroezhko.evgeny@yandex.ru

A response of diatoms from the small lake on heavy metals effect in an urban environment, Republic of Karelia

Slukovskii Zakhari I.¹, Shelekhova Tatiana S.¹, Siroezhko Evgeny V.²

¹ Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (KarRC RA),
11, Pushkinskaya ul., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation

² Petrozavodsk State University,
33, Lenin ul., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation

For citation: Slukovskii Z. I., Shelekhova T. S., Siroezhko E. V. A response of diatoms from the small lake on heavy metals effect in an urban environment, Republic of Karelia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 1, pp. 103–123. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.106>

A study of modern surface bottom sediments of the small lake Lamba located in the city of Petrozavodsk is presented. Chemical analysis shows that the content of heavy metals (Pb, Zn, Cd, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, V, W) is significantly enriched in the sediments related to ferruginous sapropels. This is caused by the influence of the urban environment and the processes of the technogenic pollution as a result of the transboundary transport of metals. Based on the study of the fossil diatomaceous flora of Lake Lamba numbering 124 diatom species, a connection is established between the anthropogenic impact on the water body and the changes in the structure of the diatom complex. Indicator species of the negative influence of the increased concentrations of Pb, Cd, Tl, W and other pollutants on the ecosystem, as well as species showing resistance to the investigated heavy metals, are determined. Finely dispersed particles of lake deposits containing vanadium, which is one of the priority pollutants of the reservoir, are found to accumulate in the valves of the diatoms.

Keywords: diatoms, bottom sediments, heavy metals, small lake, Petrozavodsk, Republic of Karelia.

References

- Chen, X., Mao, X., Cao, Y., Yang, X., 2013. Use of siliceous algae as biological monitors of heavy metal pollution in tree lakes in a mining city, southeast China. *Oceanological and Hydrobiological Studies* 42(3), 233–242.
- Dauval'ter, V. A., 2006. Khal'kofil'nye elementy (Hg, Cd, Pb, As) v donnykh otlozheniakh vodnykh ob'ektov vodosbora Belogo moria v predelakh Kol'skogo poluostrova [Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, and As) in bottom sediments of water bodies of the White sea catchment area on the Kola Peninsula]. *Geokhimiia [Geochemistry International]* 2, 237–240. <https://doi.org/10.1134/S0097807810040093>.
- Dauval'ter, V. A., 2012. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geoecology of bottom sediments of lakes]. Izd-vo MGTU, Murmansk. (In Russian)
- Davydova, N. N., 1985. Diatomovye vodorosli — indikatory prirodnykh uslovii vodoemov v golotsene [Diatom algae — indicators of the natural conditions of reservoirs in the Holocene]. Nauka, Leningrad. (In Russian)
- Denisov, D. B., 2007. Izmeneniia gidrokhimicheskogo sostava i diatomovoi flory donnykh otlozhenii v zone vozdeistviia gornorudnogo proizvodstva (Kol'skii poluostrov) [Changes in the hydrochemical composition and diatomic flora of bottom sediments in the zone of influence of metal mining production (Kola peninsula)]. *Vodnye resursy [Water Resources]* 34(6), 719–730. (In Russian)
- Denisov, D. B., 2012. Rekonstruktsiia razvitiia ekosistemy malogo gornogo subarkticheskogo vodoema za poslednie 900 let (na primere ozera Akademicheskoe, Khibiny, Kol'skii poluostrov) [The diatom-infer small subarctic waterbody ecosystem development reconstruction during the last 900 years (Akademicheskoye Lake, the Khibiny, the Kola peninsula)]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* 10, 127–148. (In Russian)
- Deviatkin, V. G. (eds.), 2015. Diatomovye vodorosli vodoemov i vodotokov Karelii [Diatoms of water bodies and streams of Karelia] Nauchnyi mir, Moscow. (In Russian)
- Hamilton, P. B., Lavoie, I., Alpay, S., Ponader, K., 2015. Using diatom assemblages and sulfur in sediments to uncover the effects of historical mining on Lake Arnoux (Quebec, Canada): a retrospective of economic benefits vs. environmental debt. *Frontiers in Ecology and Evolution* 3, 1–16.
- Kim, G. V., 2013. Morfologicheskie anomalii diatomovykh vodoroslei fitoepilitona kak indikatory kachestva vody vodotokov i vodoemov gornogo Altaia [Morphological abnormalities of phytoplankton diatoms as indicators of water quality in streams and lakes of Gorny Altai]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniia* 5(42), 444–449. (In Russian)
- Komárek, M., Ettler, V., Chrástný, V., Mihaljevi, M., 2008. Lead isotopes in environmental sciences: A review. *Environment International* 34(4), 562–577. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.10.005>.
- Komulainen, S. F., Chekryzheva, T. A., Vislianskaia, I. G., 2006. Al'goflora ozer i rek Karelii, Taksonomicheskii sostav i ekologiya [Algoflora of lakes and rivers of Karelia. Taxonomic composition and ecology]. KNTs RAN, Petrozavodsk. (In Russian)
- Komulainen, S. F., 2014. Fitoperifiton v vodoemakh g. Petrozavodska (Respublika Kareliia) [Phytoplankton in the reservoirs of Petrozavodsk (Republic of Karelia)]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* 2, 43–50. (In Russian)
- Krutskiikh N. V., Kosinova I. I., 2014. Metodika transformatsii prirodnoi sredy po rezul'tatam ekologo-geokhimicheskikh issledovaniia (na primere g. Petrozavodsk) [The method of transformation of the natural environment based on the results of ecological and geochemical research (based on the example of Petrozavodsk)]. *Vestnik Voronezhsk. un-ta. Seriya: Geologiya [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology]* 3, 95–97. (In Russian)
- Lavoie, I., Lavoie, M., Fortin, C., 2012. A mine of information: Benthic algal communities as biomonitors of metal contamination from abandoned tailings. *Science of the Total Environment* 425, 231–241.
- Litvinenko, A. V., Regerand, T. I. (eds.), 2013. Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodska: Uchebnoe posobie [Water objects of Petrozavodsk: tutorial]. Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, Petrozavodsk.
- Luis, A. T., Alexander, A. C., Almeida, S. F. P., da Silva, E. F., Culp, J. M., 2013. Benthic diatom communities in streams from zinc mining areas in continental (Canada) and Mediterranean climates (Portugal). *Water Quality Research Journal of Canada* 48(2), 180–191.
- Makarova, E. M., Slukovskii, Z. I., Medvedev, A. S., Novitskii D. G., 2017. Otsenka kachestva vody malyykh ozer g. Petrozavodska po pokazateliam bakterioplanktona v podlednyi period [Assessment of water quality in small lakes of Petrozavodsk according to indicators of bacterial plankton in the subglacial

- period]. Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of Petrozavodsk State University] 6, 72–77. (In Russian)
- McConnell, J. R., Edwards, R., 2008. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 34, 12140–12144.
- Morin, S., Corcoll, N., Bonet, B., Tlili, A., Guasch, H., 2014. Diatom responses to zinc contamination along a Mediterranean river. *Plant Ecology and Evolution*. 147(3), 325–332.
- Nriagu, J. O., 1990. The rise and fall of leaded gasoline. *Science of The Total Environment* 92, 13–28. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90318-O](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90318-O).
- Öberg, E., Andersen, T. J., Westerberg, L.-O., Risberg J., Holmgren, K., 2012. A diatom record of recent environmental change in Lake Duluti, northern Tanzania. *Journal of Paleolimnology* 48, 401–416.
- Potakhin, M. S., 2011. Morfologicheskie osobennosti vodoemov g. Petrozavodsk [Morphological features of reservoirs in Petrozavodsk], in: Vodnaia sreda i prirodno-territorial'nye kompleksy: issledovanie, ispol'zovanie, okhrana: mater. IV shkoly-konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem (Petrozavodsk, 26–28 avgusta 2011 g.) [Water environment and natural and territorial complexes: research, use, protection: materials of the IV school-conference of young scientists with international participation (Petrozavodsk, August 26–28, 2011)]. Petrozavodsk, 180–183. (In Russian)
- Renberg, I., Hellberg, T., 1982. The pH history of Lakes in Southwestern Sweden, as calculated from subfossil diatom flora of the sediments. *Ambio* 11(1), 30–33.
- Rybakov, D. S., Krutskikh, N. V., Shelekhova, T. S., Lavrova, N. B., Slukovskii, Z. I., Krichevskaya, M. V., Lazareva, O. V., 2013. Klimaticheskie i geokhimicheskie aspekty formirovaniia ekologicheskikh riskov v Respublike Kareliia [Climatic and geochemical aspects of formation of environmental risks in the Republic of Karelia]. *ElekSis*, St. Petersburg. (In Russian)
- Rybakov, D. S., Shelekhova, T. S., 2014. Diatomei v donnykh osadkakh — indikatory zagriazneniia vodnykh ekosistem v usloviakh urbanizatsii [Diatoms in bottom sediments as indicators of pollution of urban aquatic ecosystems]. *Ekologiya* [Russian journal of ecology], 45(1), 38–45. (In Russian)
- Saet, Iu. E., Revich, B. A., Janin, E. P., 1990. Geokhimiia okruzhaiushchei sredy [Geochemistry of the environment]. Nedra, Moscow. (In Russian)
- Shannon, C. E., 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27, 379–423, 623–656.
- Shelekhova, T. S., Krutskikh N. V., 2013. Geokhimicheskie osobennosti i sostav diatomovykh kompleksov donnykh osadkov r. Shui (Respublika Kareliia) [Geochemical characteristics and composition of the diatom complexes of bottom sediments in the Shuya river (Russian Karelia)]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences] 6, 76–90. (In Russian)
- Shelekhova, T. S., Subetto, D. A., 2016. Diatomovye vodorosli donnykh otlozhenii ozer Zaonezh'ia: otsenka sovremennogo sostoiianiia ozer, rekonstruktsiia izmeneniia urovnia Onezhskogo ozera [Diatoms in the bottom sediments of Zaonezhye lakes: assessment of the present state of the lakes and reconstruction of lake Onego level variations]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences] 5, 88–105. (In Russian)
- Shelekhova, T. S., Subetto, D. A., Tikhonova, Iu. S., Potakhin, M. S., 2015. Diatomovye vodorosli sovremennykh otlozhenii ozer Zaonezh'ia: paleoekologicheskie i paleoklimaticheskie rekonstruktsii [Diatoms in Trans-Onega modern lake sediments: paleoecological and paleoclimatic reconstructions]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environment. Development] 2, 151–160. (In Russian)
- Sin'kevich E. I., Ekman I. M., 1995. Donnye otlozheniia ozer Vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo kristallicheskogo shchita [Bottom sediments of the lakes of the Eastern part of the Fennoscandian crystal shield]. *Karelskii nauchnyi tsentr RAN, Petrozavodsk*. (In Russian)
- Skorbiłowicz, E., Skorbiłowicz, M., 2011. Metals in grain fractions of bottom sediments from selected rivers in north-eastern Poland. *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 567–578.
- Slukovskii, Z. I., 2015. Normirovanie po litiiu kontsentratsii tiazhelykh metallov v donnykh otlozheniiaakh ozer Ladozhskoe i Chetyrekhverstnoe (Respublika Kareliia) [Normalization of lithium concentrations of heavy metals in bottom sediments of the Ladoga and Four-verstnoye lakes (Republic of Karelia)]. *Khimiia v interesakh ustoichivogo razvitiia* [Chemistry for Sustainable Development] 23(4), 397–408. <https://doi.org/10.15372/KhUR20150409>. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I., Il'mast, N. V., Sukhovskaia, I. V., Borvinskaia, E. V., 2016. Analiz sodержaniia tiazhelykh metallov v organakh ryb ozera Lamba (Petrozavodsk, Respublika Kareliia) [Analysis of the heavy

- metals content in the organs of fish of Lamba Lake (Petrozavodsk, Republic of Karelia)], in: *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ikh resheniia: materialy VI Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posviashchennoi 120-letiiu so dnia rozhdeniia G. M. Krepsa i 110-letiiu so dnia rozhdeniia O. I. Semenova-Tian'-Shanskogo* [Ecological problems of the northern regions and ways to solve them: Proceedings of the VI All-Russian Scientific Conference with international participation, dedicated to the 120th anniversary of the birth of G. M. Crepes and the 110th anniversary of the birth of O. I. Semenov-Tien-Shansky]. *Izd-vo Kol'skogo nauch. tsentra RAN, Apatity*. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I., Il'mast, N. V., Sukhovskaia, I. V., Borvinskaia, E. V., Gogolev, M. A., 2017. *Geokhimicheskaia spetsifika protsessa sovremennoho osadkonakopleniia v usloviakh tekhnogeneza (na primere oz. Lamba, Petrozavodsk, Kareliia)* [The geochemical specifics of processes of modern sedimentation on the bottom of Lamba Lake in conditions of technogenic impact]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences] 10, 45–63. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I., Medvedev, A. S., Bubnova, T. P., Syroezhko, E. V., 2017. *Nakoplenie i vertikal'noe raspredelenie tiazhelykh metallov v sapropele ozera Griaznoe (Medvezhëgorskii raion, Respublika Kareliia)* [перевод]. *Vestnik MGTU* 20(1/2), 177–188. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-177-188>. (In Russian)
- Slukovskii, Z. I., Medvedev, A. S., 2015. *Soderzhanie tiazhelykh metallov i mysh'iaka v donnykh otlozheniakh ozer Chetyrekhverstnogo i Lamby (g. Petrozavodsk, Respublika Kareliia)* [The Content of Heavy Metals and Arsenic into Sediment of Chetyrekhverstnoe and Lamba Lakes (Petrozavodsk, Karelia)]. *Ekologicheskaiia khimiia* [Environmental Chemistry] 1, 56–62. (In Russian)
- Strakhovenko V. D., Kabannik V. G., Malikova I. N., 2014. *Geokhimicheskie osobennosti ekosistemy ozera Kolyvanskoe (Altaiskii krai) i vliianie na nee antropogennogo vozdeistviia* [Geochemical features of the ecosystem of Kolyvan Lake (Altai territory) and related technogenic impact]. *Litologiiia i poleznye iskopaemye* [Lithology and Mineral Resources] 3, 220–234. (In Russian)
- Subetto D. A., Nazarova L. B., Pestriakova L. A., Syrykh L. S., Andronikov A. V., Biskaborn B., Dikmann B., Kuznetsov D. D., Sapelko T. V., Grekov I. M., 2017. *Paleolimnologicheskie issledovaniia v rossiiskoi chasti severnoi Evrazii: obzor* [Paleolimnological studies in Russian Northern Eurasia: a review]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 24(4), 369–380. (In Russian)
- Teng, Y., Ni, S., Zhang, C., Wang, J., Lin, X., Huang, Y., 2006. *Environmental geochemistry and ecological risk of vanadium pollution in Panzhihua mining and smelting area, Sichuan, China*. *Chinese Journal of Geochemistry* 25(4), 379–385.
- Thomas, V. M., 1995. *The elimination of lead in gasoline*. *Annual Review of Energy and the Environment* 20, 301–324.
- Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie, 2013 [Water objects of Petrozavodsk: tutorial]. Litvinenko, A. V., Regerand, T. I. (pod red.). *Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, Petrozavodsk*.

Author's information:

Zakhar I. Slukovskii — PhD, Senior researcher; slukovskii_z@igkrc.ru
Tatiana S. Shelekhova — PhD, Senior researcher; shelekh@krc.karelia.ru
Evgeny V. Siroezhko — student; siroezhko.evgeny@yandex.ru