

УДК 504.054:574.24+574.5+582.26+574.21(470.22-25)

ДИАТОМЕИ В ДОННЫХ ОСАДКАХ – ИНДИКАТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗАЦИИ

© 2014 г. Д. С. Рыбаков, Т. С. Шелехова

*Институт геологии Карельского научного центра РАН
185910 Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
e-mail: rybakovd@krc.karelia.ru*

Поступила в редакцию 01.06.2012 г.

Изучение концентрации химических элементов в приповерхностных донных осадках и сопряженный с ним диатомовый анализ позволили оценить уровни загрязнения и воздействия токсикантов на диатомовые сообщества приустьевое запруженное участка речной экосистемы. Данные о взаимоотношениях химических элементов между собой, а также связи неорганического загрязнения с накоплением диатомовых водорослей в донных осадках и соответственно развитием диатомового комплекса исследованного небольшого водохранилища получены с помощью линейного корреляционного анализа и графических построений.

Ключевые слова: донные осадки, токсичные элементы, загрязнение, диатомовый анализ, индексы разнообразия.

DOI: 10.7868/S0367059714010119

Вопросы изменения сообществ водных микроорганизмов в результате колебаний химического состава среды обитания привлекают внимание многих исследователей (Кучерова, 1969; Саут, Уиттик, 1990; Галицкая и др., 2002; Комулайнен, Чекрыжева, 2009). При этом в качестве важнейших биоиндикаторов загрязнения водных экосистем используются диатомовые комплексы.

С.С. Баринаова с соавт. (2006), основываясь на данных отечественной и зарубежной литературы, составили большой перечень видов водорослей-индикаторов органического загрязнения, закисления и засоления водоемов и водотоков. Всего в представленной авторами базе данных собрано около 7 тыс. видов водорослей, в том числе диатомовых, характеризующих различные показатели среды обитания. Однако, как замечают сами авторы, проанализированные и обобщенные литературные данные нередко противоречивы в части отнесения видов диатомовых водорослей к той или иной группе по отношению к галобности или кислотности среды обитания. Существуют разночтения и при определении степени загрязнения органическими веществами с выявлением диатомей-индикаторов сапробности водной среды.

Неорганическое химическое загрязнение водных объектов может быть важным дополнительным фактором, воздействующим на диатомовые комплексы. В связи с этим в настоящей работе ставится задача определения групп и таксонов со-

временных диатомовых водорослей, створки которых участвуют в процессе текущего осадконакопления совместно с другим осадочным материалом, несущим информацию о загрязнении водной экосистемы некоторыми химическими элементами.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в зоне аккумуляции алеврито-глинистых иловых наносов (далее – зона аккумуляции) небольшого водохранилища на приустьевом участке р. Лососинки, протекающей в пределах г. Петрозаводска. В средней части водохранилища находится действующий в летний период фонтан. Вода по системе гидротехнических сооружений бывшей малой ГЭС через открывающиеся затворы плотины периодически сбрасывается в Петрозаводскую губу Онежского озера (рис. 1).

По данным Н.Г. Федорец и М.В. Медведевой (2005), распределение концентраций Co, Ni, Cu, Zn, Mn, Pb в почвах г. Петрозаводска, из которых данные загрязнители могут попадать в городскую реку, неравномерно вследствие техногенного загрязнения; приоритетными загрязнителями почв в районе выведенной в настоящее время из эксплуатации первой площадки Онежского тракторного завода, расположенной на берегу реки в 250 м выше обследованного водохранилища, являются

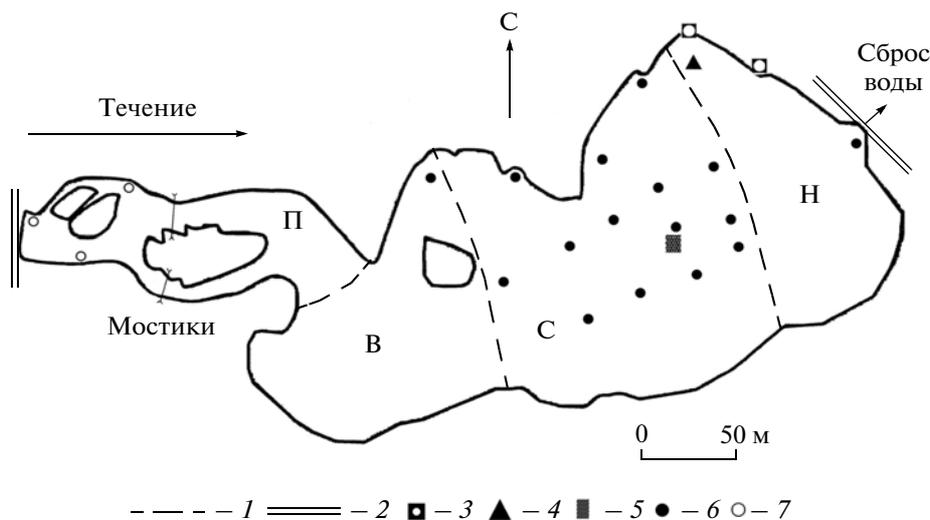


Рис. 1. Схема отбора изученных проб донных осадков.

1 – условные границы частей водохранилища: В – верховая, С – средняя, Н – нижняя части; 2 – автомобильные мосты; 3 – выпуски ливневой канализации; 4 – место забора воды для фонтана; 5 – фундамент фонтана; 6 – точки отбора проб в зоне накопления наносов (водохранилище); 7 – точки отбора проб на участке с русловым гидрологическим режимом; П – переходная зона от речного гидрологического режима к режиму водохранилища.

Pb (до 100 ПДК и более), Zn (3 ПДК), Ni (значительно превышает региональный фон) и Mn (1.5 ПДК).

Ежегодно в воде реки фиксируются (Государственный доклад..., 2009) концентрации тяжелых металлов (Fe, Cu), превышающие предельно допустимые, установленные санитарными нормами и правилами. А.В. Горохов и Л.П. Марченко (2004) в ходе многолетних наблюдений отмечали концентрации Mn до 20 ПДК и Zn до 15 ПДК, установленных для водных объектов рыбохозяйственного назначения, а также некоторый рост содержания Cu и Pb в воде в устьевой части изучаемого водотока. Полученные данные они связывали с антропогенным воздействием в результате локального переноса загрязняющих компонентов внутри техногенного купола урбанизированной территории. Прежде чем попасть в водохранилище, загрязняющие вещества поступают с водосбора в реку в пределах интенсивно застроенной территории на протяжении 3 км. Наибольшую нагрузку оказывают стоки необорудованной очистными сооружениями ливневой канализации, в том числе 15 контролируемых выпусков и несколько неконтролируемых. Два выпуска ливневой канализации имеются в нижней части водохранилища (Рыбаков, Слуковский, 2012).

Исследованы пробы илистых донных осадков, являющихся в отличие от водной среды относительно инертной системой, несущей важную информацию как о продолжающемся загрязнении экосистемы потенциально опасными химическими элементами, так и о развитии в водохранилище диатомовом комплексе. Пробы взяты из поверхностного слоя донных осадков в сентябре

2007 г. при открытых затворах плотины, что обеспечило возможность передвижения пешком по дну водохранилища (см. рис. 1). Для исследования выбраны свободные от воды (открытые) участки илистого дна водохранилища, за исключением участков, примыкающих к пляжу по правому берегу и характеризующихся перемешиванием иловых осадков с аллювиальными осадками пляжной зоны, влияющим на однородность отобранного материала. Отсутствие воды на отобранных участках обеспечило исключение потерь осадка при пробоотборе. Отбор и предварительную обработку осуществляли согласно опубликованным рекомендациям (Методические..., 1982).

Для изучения использовали выделенную с помощью стандартного сита с размером ячеек 0.1 мм глинисто-алевритовую фракцию донных осадков, характеризующуюся высокой сорбцией токсичных элементов. Размеры створок диатомей (до 0.1 мм) также предполагают их практически полное сосредоточение в выделенной гранулометрической фракции.

Всего изучено 16 проб, в которых методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) определены валовые концентрации большого ряда микроэлементов. Анализ выполнен в лаборатории химического анализа Института геологии Карельского научного центра РАН. Эти же образцы использовали для проведения диатомового анализа с помощью электронного сканирующего микроскопа (микронд TESCAN). Для трех проб получены концентрации подвижных (доступных биоте) форм тяжелых металлов (Zn, Cu, Ni, Cd, Pb). Еще три пробы

Значения средних (x_{cp}), пределов ($x_{min}-x_{max}$) и стандартных отклонений (стандартных множителей) концентраций химических элементов в донных осадках зоны аккумуляции р. Лососинки

Элемент	x_{cp} , г/т	$x_{min}-x_{max}$, г/т	$S(\epsilon)$	$x_{ф}$, г/т	Кларк, г/т	ПДК, ОДК*, г/т
Li	20.5	18–23	1.43	11.7	32	–
P	2240	1785–2600	246	1370	930	–
V	115	102–123	6.78	155	90	150
Cr	71	56–89	8.82	56	83	–
Mn	4070	2430–6530	1200	3630	1000	1500
Co	23	18–26	2.12	22	18	–
Ni	42	34–61	(1.17)	34	58	20–80*
Ni _{подв}	1.36	1.22–1.54	0.164	–	–	4.0
Cu	87	67–107	11.6	80	47	33–132*
Cu _{подв}	6.52	6.47–6.58	0.055	–	–	3.0
Zn	231	198–278	24.7	156	83	55–220*
Zn _{подв}	44.8	42.2–46.5	2.27	–	–	23.0
As	12.2	8.5–15.4	2.22	8.3	1.7	2.0
Sr	232	172–269	25.3	278	340	–
Zr	172	109–295	(1.25)	188	170	–
Mo	2.42	1.22–5.76	(1.52)	2.95	1.1	–
Cd	2.45	1.84–3.6	(1.15)	2.29	0.13	0.5–2.0*
Cd _{подв}	0.35	0.33–0.39	0.032	–	–	0.2
Sn	5.68	3.88–9.46	(1.24)	3.76	2.5	–
Sb	2.96	3.37–4.45	(1.18)	3.47	0.5	4.5
Cs	1.44	1.22–1.82	0.155	0.84	3.7	–
Hf	4.64	3.22–7.09	(1.18)	5.06	1.0	–
Pb	52	45–58	4.01	28.6	16	32
Pb _{подв}	3.27	1.86–4.72	1.43	–	–	6.0

Примечание. S – стандартное отклонение, ϵ – стандартный множитель (при логнормальном распределении); количество проб в выборке $n_{вал} = 16$ (валовые концентрации), $n_{подв} = 3$ (концентрации подвижных форм), $x_{ф}$ – средние концентрации элементов на примыкающем участке с русловым гидрологическим режимом (по 3 точкам).

донных осадков, отобранные на примыкающем к водохранилищу участке с русловым гидрологическим режимом (см. рис. 1), проанализированы для получения условных фоновых концентраций элементов.

В качестве параметров, проверяемых на изменение под воздействием загрязненной тяжелыми металлами и As среды обитания, использовали: численность створок групп и отдельных видов и разновидностей диатомовых водорослей (в %), относительное количество таксонов в пробах, индексы разнообразия Симпсона и Маргалефа. Для получения корректных значений статистических параметров с помощью показателей асимметрии (K_A) и эксцесса (K_E) осуществляли проверку гипотез о нормальности распределения концентраций химических элементов и численности диатомей. Получаемые выборки проверяли на однород-

ность с помощью F - и t -критериев. Взаимоотношения между концентрациями элементов и количественными показателями состава диатомового комплекса устанавливали с помощью линейного корреляционного анализа. Значимость парных коэффициентов корреляции определяли на уровне надежности (P) 95% при соответствующем числе степеней свободы (f). Для расчетов и графических построений применяли пакет “Анализ данных” программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение химических элементов. В донных осадках водохранилища происходит относительное по сравнению с примыкающим участком с русловым гидрологическим режимом накопление Pb, P, Zn, As, Sn, Cr, Ni (см. таблицу). При

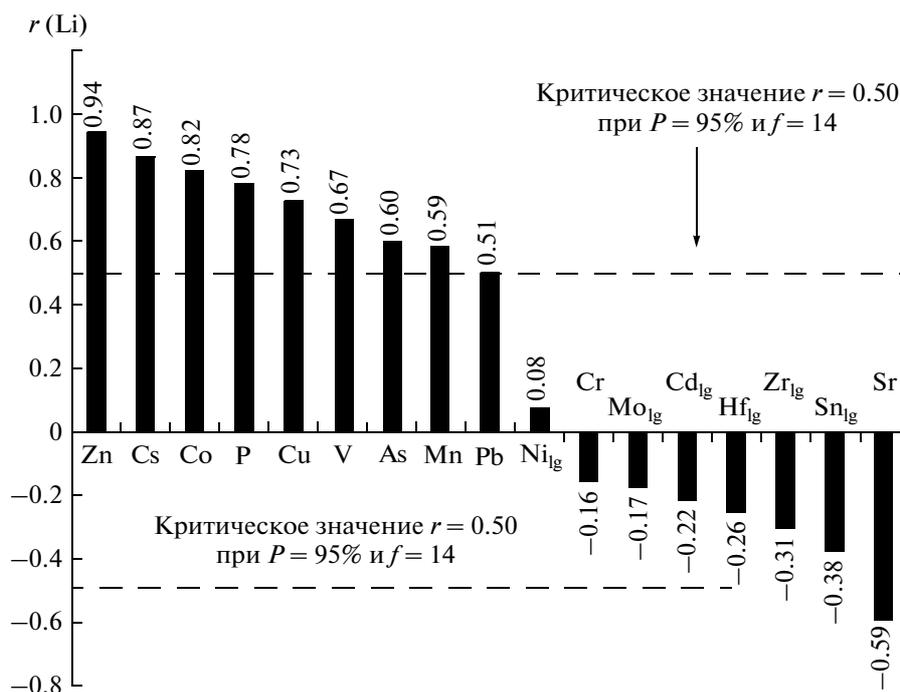


Рис. 2. Гистограмма величин коэффициентов корреляции между значениями концентраций (логарифмов концентраций) Li и других элементов в донных осадках – $r(\text{Li})$.

этом различия средних концентраций Pb, P, Zn, Sn_{lg}, Cr и Ni_{lg} (а также Li и Cs) статистически значимы ($p < 0.05$) при незначимых различиях дисперсий ($p > 0.05$); для As также значимо различие дисперсий ($p < 0.05$). Для Mn, Zr_{lg}, Cd_{lg}, Hf_{lg} и Cu все различия статистически незначимы ($p > 0.05$).

Для донных осадков предельно допустимые или ориентировочно-допустимые концентрации (ПДК/ОДК) не разработаны, поэтому в таблице для оценки их загрязнения приведены значения ПДК/ОДК для почв (Предельно..., 2006; Ориентировочно..., 2009) и кларков по А.П. Виноградову (Справочник..., 1990). Почти во всех случаях изученные донные осадки загрязнены Zn, Pb, Cu, Ni, Mn, As и Cd сверх норматива. Содержание V и Sb ниже ПДК/ОДК. Содержание Cd, As, Sb, Hf, Mn, Pb, Zn, P, Sn, Mo, Cu, Co и V превышает кларки во всех исследованных пробах. Концентрации Zr выше кларка в 50% случаев, Cr – в 12% и Ni – в 6%. Не превышают кларковых значений концентрации Li, Cs и Sr.

Линейный корреляционный анализ выявил значимые положительные корреляционные связи между концентрациями большинства элементов-токсикантов и концентрациями Li (рис. 2). По уровню тесноты связи с Li, являющимся индикатором глинистой фракции изучаемых донных осадков (Рыбаков, Слукровский, 2012), элементы (первая выделенная ассоциация) распределились в следующем порядке: Zn > Cs > Co > P > Cu > V > As > Mn > Pb. При этом в донных осад-

ках для Zn и Cu получены концентрации подвижных (доступных биоте) форм выше ПДК, для Pb – ниже нормативных значений (см. таблицу).

Вторая ассоциация включает Cd_{lg}, Hf_{lg}, Zr_{lg} и Sr. Корреляционная связь между значениями логарифмов концентраций первых трех элементов сильнее ($r = 0.96–0.93$; здесь и далее $r_{\text{крит}} = 0.50$; $P = 95\%$, $f = 14$), чем между этими же величинами и значениями концентраций Sr ($r = 0.67–0.65$). В этой ассоциации наиболее потенциально опасным токсикантом, судя по очень высокому валовому содержанию (до 3.6 г/т при кларке 0.13 г/т) и количеству подвижных форм (см. таблицу), является Cd. Для изученных донных осадков характерно отсутствие положительной корреляционной связи между Cd_{lg} и Zn ($r = -0.32$). Статистически значимо связаны между собой Mo_{lg}, Ni_{lg} и Cr ($r = 0.93–0.82$). К этой “тройке” также тяготеет Sn_{lg} ($r = 0.72–0.56$). Содержание подвижных форм Ni ниже нормативных значений.

Из сказанного выше следует, что наибольшую потенциальную опасность для биоты изученной водной экосистемы ввиду повышенных валовых концентраций, а также концентраций подвижных форм некоторых элементов могут представлять Zn, Cu, Mn, As, P, а также Cd, не входящий в ассоциацию с этими элементами. Кроме того, потенциальную опасность представляют суммарные концентрации Mn и V, для которых ПДК (1000 + 100 г/т) превышены во всех случаях. Такие

элементы, как Pb и Ni, также следует отнести к потенциально опасным в связи с превышением условных фоновых концентраций (см. таблицу) и возможностью действовать совместно с другими токсикантами.

Диатомовый анализ. В пробах выявлено 211 видов, разновидностей и форм диатомовой флоры: 22 – планктонных, 1 – планктонно-литоральный, 106 – донных и 82 – обрастателей. В отдельных образцах одновременно отмечено от 41 до 61 таксона, в том числе: донных – от 15 до 34, обрастателей – от 12 до 30, планктонных – от 5 до 11 и один планктонно-литоральный вид *Melosira varians* Ag., определенный во всех пробах.

Наибольшим разнообразием в диатомовом комплексе отличается род *Navicula* Borg, представленный 31 таксоном рангом ниже рода. В его составе преобладают донные виды *N. rhynchocephala* Kütz., *N. cryptocephala* Kütz. и *N. vulpina* Kütz., во многих случаях к ним добавляется вид *N. viridula* (Kütz.) Ehr. Далее следуют род *Nitzschia* Hass, а также малочисленный по количеству обнаруженных створок ($x_{cp} = 1.8\%$, $S = 0.72$) род *Pinularia* Ehr. – по 19 видовых и внутривидовых таксонов.

Среди донных диатомей в составе комплекса постоянно присутствуют (обнаружены в каждой пробе) виды родов *Navicula* ($x_{cp} = 10.3\%$, $S = 5.34$) и *Nitzschia* ($x_{cp} = 5.86\%$, $S = 3.34$), среди обрастаний – виды *Cocconeis placentula* Ehr. ($x_{cp} = 13.5\%$, $S = 5.93$), *Cymbella ventricosa* Kütz. ($x_{cp} = 2.17\%$, $\varepsilon = 2.08$), *Tabellaria flocculosa* (Roth.) Kütz. ($x_{cp} = 2.13\%$, $S = 1.51$), виды родов *Diatoma* Borg ($x_{cp} = 3.79\%$, $S = 2.04$), *Gomphonema* Agardh. ($x_{cp} = 3.54\%$, $S = 2.31$), *Meridion* Agardh. ($x_{cp} = 2.36\%$, $S = 1.53$).

По всей обследованной зоне обнаружены планктонные виды рода *Aulacoseira* Thw. ($x_{cp} = 25.9\%$, $S = 17.91$), представленного преимущественно *A. italica* (Ehr.) Kütz., *A. distans* (Ehr.) Kütz., реже *A. granulata* (Ehr.) Sim., в некоторых случаях *A. ambigua* (Grun.) Sim. и *Aulacoseira islandica* (O. Mull.) Sim. Их бурное развитие отмечено в локальной зоне вблизи фонтана, а также на участках с вогнутой береговой линией. В сумме количество индивидов рода *Aulacoseira* в указанных частях водоема насчитывает 30.3–68.3% от общей численности диатомей, в то время как на других участках – 6.4–22.8%. Остальные виды планктонных диатомей, среди которых прежде всего выделяется *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz., по сумме створок не превышают 3.6% ($x_{cp} = 1.94\%$, $S = 1.02$).

Вид *Melosira varians* ($x_{cp} = 13.0\%$, $S = 6.82$) максимально развит (до 25.9%) в условиях снижения активности представителей рода *Aulacoseira*, о чем свидетельствует отрицательная корреляци-

онная связь между значениями их численности ($r = -0.63$).

Большую долю выявленной в донных осадках диатомовой флоры с известной характеристикой по отношению к галобности (184 таксона) составляют индифференты (30–80% по числу створок), среди которых определяющими являются виды рода *Aulacoseira*. Довольно велико содержание галофилов (*Melosira varians*, *Cocconeis placentula*, *Navicula rhynchocephala*, *N. cryptocephala* и др.) – в сумме с мезогалобами до 50% (мезогалобов – до 4.4%), что несвойственно рекам Карелии. Незначительно участие галофобов (до 12%), не переносимых минерализованных вод. Из них наиболее развиты виды *Tabellaria flocculosa* (до 6%), *Meridion circulare* (Grev.) Ag. (до 5.2%), в меньшей степени – *Meridion circulare* var. *constricta* (Ralfs) V. H. (до 1.6%) и *Tabellaria fenestrata* (до 2%). Всего определено 20 известных таксонов галофобов рангом ниже рода (от 3 до 7 в отдельных пробах), 26 – галофилов (от 5 до 12), 9 – мезогалобов (от 0 до 3) и 129 – индифферентов (от 22 до 39). Неизвестные формы составили 1.6–11% численности комплекса (1–7 таксонов в отдельных пробах).

По отношению к рН выявлено 180 таксонов с известной характеристикой рангом ниже рода. Количество алкалибионтов (9 таксонов) варьирует в пределах 1.6–9.2% численности створок, алкалифилов (86) – 56–68%, индифферентов (54) – 6.4–18%, ацидофилов (31) – 5.6–23%. В отдельных пробах найдено алкалибионтов – от 1 до 5 таксонов с известной характеристикой, алкалифилов – от 17 до 28, индифферентов – от 7 до 16, ацидофилов – от 4 до 10. Суммарная численность представителей с неизвестной характеристикой составила 2–11% общей численности диатомей (1–8 таксонов в отдельных пробах).

В целом анализ отношения к галобности и рН показал, что диатомовая флора изученной водной экосистемы развивается преимущественно в условиях щелочной среды и повышенного содержания в воде различных химических элементов, в то время как таксономический состав диатомового комплекса крайне непостоянен по всем известным характеристикам.

Разнообразие видовых и внутривидовых таксонов изученного диатомового комплекса характеризовали значениями индексов Симпсона (D) и Маргалефа (d). Значения индекса доминирования D варьируют в пределах 0.044–0.174 ($x_{cp} = 0.080$, $\varepsilon = 1.376$). По этому показателю в качестве основных наиболее многочисленных видов на разных участках выделяются пары *Aulacoseira italica* – *A. distans* (иногда *A. italica* – *A. ambigua*) и *Melosira varians* – *Cocconeis placentula* (с преобладанием первого вида над вторым или наоборот). Значения d изменяются в пределах 16.7–25.0 ($x_{cp} = 20.3$, $S = 2.48$).

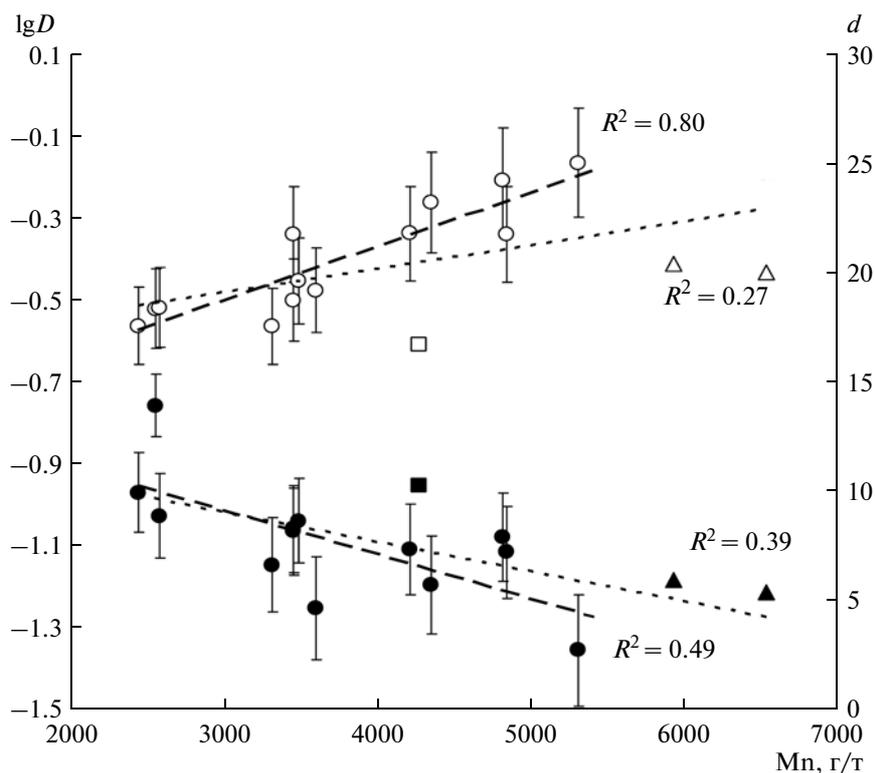


Рис. 3. Связь индексов разнообразия диатомового комплекса с концентрациями Mn в донных осадках: *закрашенные значки* – логарифмы значений индекса Симпсона (D), *светлые значки* – значения индекса Маргалефа (d); *треугольники* – снижение разнообразия при высоких концентрациях, *квадраты* – выпадение части видов (см. текст); *короткий штрих* – тренды для полной выборки; *длинный штрих* – тренды с исключением наблюдений (квадраты и треугольники); R^2 – коэффициенты детерминации линейных моделей.

Связь показателей состава диатомового комплекса и концентраций химических элементов. Проведенный корреляционный анализ показал, что для выборки, характеризующей диатомовый комплекс в целом, значения $\lg D$ уменьшаются с ростом в донных осадках концентраций Mn ($r = -0.63$). При этом в осадках с наименьшим содержанием Mn (2400–2600 г/т) максимально присутствуют и начинают доминировать планктонные виды *Aulacoseira italica* и *A. distans* (35.2–55.6% при $x_{cp} = 15.3\%$ и $\varepsilon = 1.94$).

Между значениями индекса Маргалефа и концентраций Mn отмечена линейная связь (рис. 3). В некоторых случаях на ослабление этой связи могут влиять, с одной стороны, наиболее высокие из полученных (см. таблицу) концентрации в донных осадках Mn (0.59–0.65 мас. %), Pb (57–58 г/т), а также концентрации других токсикантов, достигающих в пробах максимальных значений (г/т): Zn (278), Cu (107), As (15.4) в ассоциации с Li (до 23.3 г/т), с другой – выпадение из-за локальных особенностей условий формирования диатомового комплекса многих планктонных видов, замещающихся планктонно-литоральной *Melosira varians*, с одновременным активным вытеснением видами *Cocconeis placentula*, *Meridion circulare*,

Diatoma vulgare Bory, *Cymbella ventricosa*, *Gomphonema* sp. других видов-образователей, в том числе, например, до полного исчезновения представителей рода *Fragilaria* Lyngb. Изменение индекса доминирования Симпсона, хотя и в меньшей степени, но также зависит от этих факторов (см. рис. 3).

Отмечена статистическая связь значений концентраций в осадках Mn и суммарной процентной численности створок донных видов ($r = 0.70$). Корреляционная связь значительно усиливается ($r = 0.83$ при $r_{крит} = 0.51$; $P = 95\%$, $f = 13$) после исключения из выборки пробы с максимальными концентрациями Ni – 61 г/т и Cr – 89 г/т, высокими концентрациями Mn – 0.59 мас. %, а также (г/т): Pb (57), Zn (253), Cu (98), As (14.4). Менее сильная корреляционная связь между значениями концентраций Mn и индекса Маргалефа, рассчитанного для группы донных диатомей (варьирует в интервале 8.5–16.3 при $x_{cp} = 11.7$), изменяется не столь заметно (от $r_{Mn-d} = 0.54$ до $r_{Mn-d} = 0.58$).

Намечается отрицательное влияние Cd на выраженный индексом Маргалефа разнообразие донных видов ($r_{\lg Cd-d} = -0.54$), наибольшее количество которых (по числу таксонов) встречено в менее загрязненных Cd осадках (минимальное

статистически аномальное значение – 1.84 г/т). В пробе, характеризующей эти осадки, также установлены минимальные из всех количества (г/т): Cu (67), Pb (45), V (102) и Ni (34). Только в менее загрязненных осадках в единичных находках обнаружены: *Nitzschia navicularis* (Breb.) Grun., *N. vitrea* Norm., *N. acidoclinata* L.-B., *N. sigmoidea* (Ehr.) W. Sm., *Neidium affine* var. *amphirhynchus* (Ehr.) Cl., *Surirella birostrata* Hust.

В то же время воздействие Cd на суммарную численность створок донных диатомей, рассчитанную относительно всего комплекса (N_d), статистически незначимо ($r_{lgCd-N_d} = -0.38$).

Положительна корреляционная связь между значениями концентраций As и численности найденной в 50% проб донной *Pinnularia mesolepta* (Ehr.) W. Sm. ($r = 0.61$), концентраций Mn и численности редко встречающегося в изученных осадках (25% проб) также обитателя дна *Gyrosigma acuminatum* (Kütz.) Rabh. ($r = 0.57$).

Для обрастателей статистически значимы корреляционные связи, показывающие влияние As на величину индекса Симпсона ($r = 0.62$) и в меньшей степени – индекса Маргалефа ($r = -0.56$), рассчитанными для этой группы. В этой группе в основном представлен вид *Cocconeis placentula* (до 50.6% при $x_{ср.д} = 35.6\%$, $S = 9.46$).

В группе планктонных видов значимых корреляционных связей между концентрациями элементов и изученными показателями ее разнообразия не установлено.

Корреляционные связи между концентрациями элементов и параметрами разнообразия групп диатомей, выделенных по признаку галолюбности, достаточно неопределенны. Можно отметить положительную корреляционную связь значений численности створок галофилов и концентраций As ($r = 0.54$).

Суммарная численность створок алкалифилов и алкалибионтов из всех местообитаний положительно коррелирует с концентрацией в донных осадках Ni_{lg} ($r = 0.66$), Cu ($r = 0.64$), Pb ($r = 0.59$) и As ($r = 0.58$). Соответственно суммарная численность ацидофилов, индифферентов и неизвестных по отношению к рН таксонов симметрично сокращается при увеличении концентраций элементов: Ni_{lg} ($r = -0.66$), Cu ($r = -0.64$), Pb ($r = -0.59$) и As ($r = -0.58$).

По данным Л.Л. Смирновой с соавт. (2009), виды рода *Amphora* устойчивы к воздействию As при его концентрации в морских грунтах, не превышающей 4 мкг/г, т.е. в среднем в 3 раза ниже, чем в донных осадках р. Лососинки (см. таблицу). В изученных донных осадках происходит одновременное накопление ряда микроэлементов и створок немногочисленного донного вида, индифферента (соленость) и алкалифила *Amphora ovalis*

Kütz, обнаруженного в 56% проб (максимально до 2.4% от общего количества створок): Zn ($r = 0.70$), Li ($r = 0.58$), Mn ($r = 0.57$), Pb ($r = 0.53$), As ($r = 0.52$), Cu ($r = 0.51$). Присутствие Li в этом ряду свидетельствует о том, что развитие *Amphora ovalis* приурочено к донным осадкам с наибольшим содержанием мелкодисперсных фракций, насыщенных перечисленными элементами.

Некоторые авторы (Саут, Уиттик, 1990) относят виды рода *Nitzschia* к типичным для альгофлоры водотоков, загрязненных Zn. Однако в изученных донных осадках не установлено статистически значимой корреляционной связи между концентрацией Zn и численностью наиболее представленных в этом роде видов (соответственно до 4.8 и 6.6% в комплексе) *Nitzschia palea* ($r = -0.28$) и *Nitzschia* sp. ($r = -0.30$), а также рода *Nitzschia* в целом ($r = -0.29$). То же касается всех остальных элементов, для которых коэффициенты корреляции варьируют от -0.35 (Cu – род *Nitzschia*) до 0.42 ($lgCd - Nitzschia palea$).

Численность вида *Meridion circulare*, считающегося индикатором олигосапробных вод, имеет отрицательную корреляционную связь со значениями концентраций Cr ($r = -0.56$) и Ni_{lg} ($r = -0.51$), а к изменению концентраций Zn, Mn, As, Cu, Cd_{lg} , Pb и Li относится в целом индифферентно (r в этом ряду изменяется от -0.18 до 0.11). Другой индикатор “чистоты” (Sladecsek, 1986) – *Tabellaria flocculosa* – не проявляет статистически значимой корреляционной связи ни с одним из перечисленных элементов: от $r_{Pb-Т.п.} = -0.48$ до $r_{As-Т.п.} = 0.12$.

Между численностью *Aulacoseira lacustris* (Grun.) Kramm. (всего 0–2.4% от числа створок) и $lgNi$ обнаружена статистически значимая обратная связь ($r = -0.60$). При концентрациях Ni выше 40–45 г/т створки этой планктонной формы в пробах отсутствуют.

ВЫВОДЫ

1. Интегрированное исследование геохимических особенностей и состава диатомовых комплексов донных осадков водных объектов позволяет получать как общую, так и детальную (на уровне отдельных таксонов) информацию о связи микроэлементного состава осадков с количественными параметрами, характеризующими численность и разнообразие диатомей.

2. В целом диатомовый комплекс устьевой запруженной части р. Лососинки формируется в условиях щелочной среды и поступления большого количества загрязняющих химических элементов. В связи с воздействием многих факторов, включая химические, его состав крайне непостоянен.

3. Разнообразие видов изученного диатомового комплекса, характеризуемое индексами Симп-

сона и Маргалефа, растет с повышением концентраций Mn. При этом в донных осадках с наименьшими концентрациями этого элемента определяющей и доминирующей оказывается пара планктонных видов *Aulacoseira italica* и *A. distans*. К факторам, ослабляющим статистическую связь между значениями концентраций Mn и индекса разнообразия Маргалефа, относятся: 1) воздействие ассоциации токсичных элементов (Mn, Pb, Zn, Cu, As); 2) повышение роли видов *Melosira varians* и *Cocconeis placentula*, фиксирующих иные условия жизнедеятельности и накопления в донных осадках створок диатомей. Выявлена приуроченность группы донных диатомей (в отличие от планктонных и обрастателей) к осадкам, обогащенным Mn.

4. Несмотря на значительное превышение кларка и присутствие в донных осадках повышенных концентраций подвижных форм, влияние Cd на изученный диатомовый комплекс до конца не ясно. В определенной мере Cd может сокращать разнообразие донных видов. Снижение разнообразия видов группы обрастателей в свою очередь статистически связано с ростом концентраций As.

5. Для донных осадков, обогащенных Ni, Cu, Pb и As, характерны виды, развивающиеся в щелочных условиях среды (алкалофилы и алкалобионты).

6. Немногочисленный и встречающийся не во всех пробах донный вид *Amphora ovalis* приурочен к насыщенным Zn, Mn, Pb, As, Cu мелкодисперсным осадкам, только As — также немногочисленная донная *Pinnularia mesolepta*.

7. С ростом концентраций в донных осадках Cr и Ni численность вида-обрастателя *Meridion circulare* уменьшается. Планктонная *Aulacoseira lacustris* появляется лишь при самых низких концентрациях Ni.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель Авив: PiliesStudio, 2006. 498 с.
- Галицкая И.В., Махорина Е.И., Просунцова Н.С. Геоэкологические проблемы рекреационных территорий на малых реках / Сергеевские чтения. Вып. 4. Мат-лы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2002. С. 190–195.
- Горохов А.В., Марченко Л.П. Распределение тяжелых металлов в водах реки Лососинки / Экосистемы малых рек: биоразнообразие, биология, охрана: Тез. докл. всерос. конф. Борок, 2004. С. 17.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2008 г. Ред. коллегия: А.Н. Громцев (гл. ред.), Ш.Ш. Байбусинов, В.И. Колесова, О.Л. Кузнецов, Т.Б. Ильмаст. Петрозаводск: Мин-во сельского, рыбного хоз-ва и экологии РК, 2009. 288 с.
- Комулайнен С.Ф., Чекрыжева Т.А. Структура альгоценозов в водоемах озерно-речной системы реки Кенти, Республика Карелия / Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге. Мат-лы докл. II всерос. научно-практич. конф. Сыктывкар, 2009. С. 90–93.
- Кучерова З.С. Влияние меди на развитие диатомовых обрастаний // Биологические исследования Черного моря и его промысловых ресурсов. М.: Наука, 1969. С. 143–147.
- Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами. М.: ИМГРЭ, 1982. 74 с.
- Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09 (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ № 32 от 18 мая 2009 г.).
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06 (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ № 1 от 19 февраля 2006 г.).
- Рыбаков Д.С., Слукковский З.И. Геохимические особенности загрязнения донных осадков зарегулированной городской реки // Уч. зап. Петрозав. гос. ун-та. Июнь, 2012. Серия “Естеств. и техн. науки”. Петрозаводск, 2012. № 4 (125). С. 67–73.
- Саут Р., Умттик А. Основы альгологии. М.: Мир, 1990. 597 с.
- Смирнова Л.Л., Андреева Н.А., Антонова Л.С. Стратификация морских микроводорослей в перифитоне и донных отложениях микрокосмов под действием мышьяка / Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге: Мат-лы докл. II всерос. научно-практич. конф. Сыктывкар, 2009. С. 308–311.
- Справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Кокин, А.Е. Мирошников, В.Г. Прохоров. М.: Недра, 1990. 480 с.
- Федорец Н.Г., Медведева М.В. Эколого-микробиологическая оценка состояния почв города Петрозаводска. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 96 с.
- Sladeczek V. Diatoms as indicators of organic pollution // Acta Hydrochim. Hydrobiol. 1986. V. 14. № 5. P. 555–566.