

УДК 504.4:550.4

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ФОНОВЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

*Д.В. Иванов, И.И. Зиганшин, Е.В. Осмелкин*

### Аннотация

Определены фоновые (доиндустриальные) концентрации металлов в донных отложениях озер Республики Татарстан: Cd – 2, Co – 18, Pb – 29, Cu – 26, Ni – 48, Zn – 84, Cr – 33, Mn – 648 мг/кг. Содержание металлов в поверхностных слоях донных отложений определяется фациальными особенностями осадконакопления и колеблется в пределах регионального геохимического фона.

**Ключевые слова:** озера, донные отложения, металлы, геохимический фон.

---

### Введение

Изучение донных отложений (ДО) является одним из важных направлений в экологических исследованиях водных объектов, поскольку дает возможность получать интегрированные по времени средние значения загрязняющих веществ, реконструировать в историческом интервале условия формирования ДО и качество поверхностных вод, основываясь на определении фоновых значений содержания различных элементов и изменений их поступления в течение длительного времени.

В Российской Федерации на данный момент еще не разработаны нормативы содержания химических элементов и их соединений в ДО водоемов. В связи с этим одной из первоочередных задач геохимических исследований становится определение региональных фоновых концентраций элементов в седиментах.

Среди геохимических маркеров региональных процессов осадконакопления наиболее удобный объект - тяжелые металлы (ТМ), так как их концентрации в седиментах отличаются стабильностью во времени и всецело связаны с режимом взвешенных веществ и продукционными процессами в водоеме. Содержание ТМ в ДО является одним из наиболее объективных и надежных показателей загрязнения водоема [1, 2]. Процесс накопления ТМ в ДО водоемов и их удаление являются важными составляющими механизма регулирования содержания этих элементов в водной среде, влияющих на продуктивность водных экосистем и качество воды в них. Важнейшей особенностью, отличающей ТМ от других токсичных загрязнений, является то, что после попадания в окружающую среду их эколого-токсикологический эффект слабо понижается биологической средой и потенциальная токсичность определяется в основном физико-химическими формами. Для них характерны длительное сохранение и накопление в воде, седиментах и гидробионтах [3].

В качестве фоновых значений, как правило, используется установление основных геохимических уровней ТМ, основанное на их среднем содержании в почвообразующих породах, гумусовых горизонтах почв и поверхностных слоях ДО региона. Однако данный метод не позволяет получить точные данные по изменению концентрации элементов с течением времени. Более точным методом определения фоновых концентраций ТМ является установление так называемого «доиндустриального уровня» содержания элемента в стратифицированных слоях колонок седиментов [4]. Изучение стратифицированных слоев ДО, отобранных из самых глубоких частей колонок, позволяет выявить особенности в накоплении ТМ в ДО в течение длительного времени.

### 1. Методика исследования

Исследования геохимического состава ДО озер Республики Татарстан (РТ) выполнялись в период с 1997 по 2008 гг. Полевыми исследованиями охвачено более 100 озер РТ с учетом генезиса, географического положения, уровня антропогенной нагрузки и статуса. Образцы поверхностных (современных) слоев (0–10 см) ДО отбирали дночерпателем Петерсена в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 [5]. Аналитическая обработка образцов ДО состояла в определении гранулометрического состава, органического вещества (ОВ), реакции среды (рН) по стандартным методикам, используемым для анализа почв и грунтов [6–8]. Для определения геохимического фона ТМ в ДО статистической обработке были подвергнуты результаты атомно-абсорбционного определения концентраций ТМ (вытяжка 5н  $\text{HNO}_3$ ; [9]) в стратиграфических колонках ДО, отобранных в профундали 25 озер трубкой ГОИН-1.5. В качестве маркерного «доиндустриального» слоя отложений был взят слой 90–100 см, который был датирован, исходя из средней скорости осадконакопления в водоемах Средней Волги 3–5 мм/год [10, 11], концом XVIII – началом XIX в.

### 2. Результаты исследования

Современные ДО озер региона отличает широкое разнообразие гранулометрических разностей: от песков до глинистых илов. Для мелководной зоны озер, ограниченной двухметровой изобатой, типичны песчаные осадки с низким содержанием тонкодисперсных фракций (< 20%). Подавляющая часть отложений профундали отнесена к типу серых илов, причем 80% из них представляли собой глинистые илы высокой степени сортировки. Наиболее типичны для глубоководных зон озер РТ илы с содержанием пелитовой фракции 60–70%.

По содержанию ОВ современные ДО большинства изученных озер РТ относятся к группе минеральных осадков (не более 12% ОВ), преобладают озера с низким содержанием органики (2–4%). Накопление и распределение ОВ в составе отложений определяется продукционными характеристиками водоема и особенностями седиментации взвешенных частиц. В этой связи закономерно увеличение концентрации ОВ в ряду пески (0.90%) – илистые пески (1.14%) – песчанистые илы (2.81%) – серые илы (5.74%).

В спектре распределения величины рН отчетливо выделяются две группы ДО: кислые (рН 4.0–6.5) и слабощелочные (рН 6.6–8.0). В 70% изученных озер

Табл. 1

Вариационно-статистические показатели валового содержания ТМ в поверхностных слоях ДО, мг/кг ( $N = 105$ )

ТМ	$M^*$	$Me$	Min	Max	Нижний квартиль	Верхний квартиль	$\sigma$	$m$	$V$ , %
Cd	1.26	1.15	0.18	4.95	0.63	1.68	0.86	0.10	33
Co	12.4	11.5	1.3	36.5	7.8	16.5	6.5	0.7	52
Pb	21.3	18.5	1.7	58.2	10.7	30.3	13.5	1.5	63
Cu	17.4	17.1	0.8	42.8	11.8	22.7	8.9	0.9	51
Ni	33.7	33.4	2.1	108.8	20.3	43.8	18.7	2.0	55
Zn	59.9	57.2	3.5	190.3	36.9	75.5	35.6	3.7	59
Cr	25.7	26.4	0.5	64.9	17.0	32.3	14.6	1.6	57
Mn	408.8	348.8	18.8	1543.0	206.0	586.8	283.9	29.8	69
Fe, %	1.95	1.54	0.07	5.15	0.85	2.95	1.33	0.14	68

\*  $M$  – среднее арифметическое,  $Me$  – медиана, Min, Max – минимальное и максимальное значения,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение,  $m$  – ошибка среднего,  $V$  – коэффициент вариации.

доминируют кислые отложения, имеющие реакцию водной вытяжки от 5 до 6. В определенной мере это связано с составом выборки: на 60% она представлена илами профундали. Падение величины рН в глубоководной части озер происходит здесь на фоне накопления кислых продуктов разложения ОВ.

В то же время в целом ряде карстовых озер можно наблюдать картину, когда осадки профундали имеют более высокие значения рН, чем осадки литорали и водосборные почвы. Щелочной характер отложений таких озер может быть связан с аккумуляцией в них кальция, поступающего с подземными водами, а также вследствие бионакопления в раковинах моллюсков.

Вариабельность содержания ТМ в составе ДО определяется различиями обстановок седиментации и зависит от их распространенности в коренных и почвообразующих породах и почвах региона. В основном она колеблется в пределах 50–60% (табл. 1). Для современных осадочных образований столь крупной географической единицы как РТ подобный масштаб варьирования не является значительным. Из всех изученных металлов наименьшим разбросом значений отличался Cd, элемент с низким кларком в литосфере. Более распространенные элементы аквальных ландшафтов – Mn и Fe – имели и больший размах вариации в ДО озер. Не характерное для четвертичных отложений региона низкое валовое содержание Cr в составе ДО обусловлено слабой экстрагируемостью этого элемента из кристаллической решетки минералов.

Оценка содержания ТМ в ДО, основанная на средних величинах, полученных для всей совокупности данных, не может рассматриваться как полная и объективная. Это связано с геохимической неоднородностью разнотипных отложений, представленных широким спектром гранулометрических разновидностей (литологическими фациями): от песков до глинистых илов. Сорбционная емкость последних на порядок выше, чем песчаных отложений, в связи с чем сравнение концентраций ТМ в разнотипных озерных осадках с их средними концентрациями для всей территории РТ по меньшей мере некорректно.

Табл. 2

ТМ в фациальных типах ДО озер, мг/кг

ТМ	Пески	Илистые пески	Песчанистые илы	Серые илы
Cd	0.25	0.48	0.58	1.33
Pb	9.8	7.7	13.1	26.2
Co	4.4	5.1	7.7	14.5
Cu	2.7	5.9	10.7	20.3
Ni	6.5	13.2	21.2	42.4
Zn	8.7	19.9	34.5	70.3
Cr	4.6	5.6	16.0	28.3
Mn	76.1	188.5	191.1	440.5
Fe, %	0.67	0.56	0.82	2.19

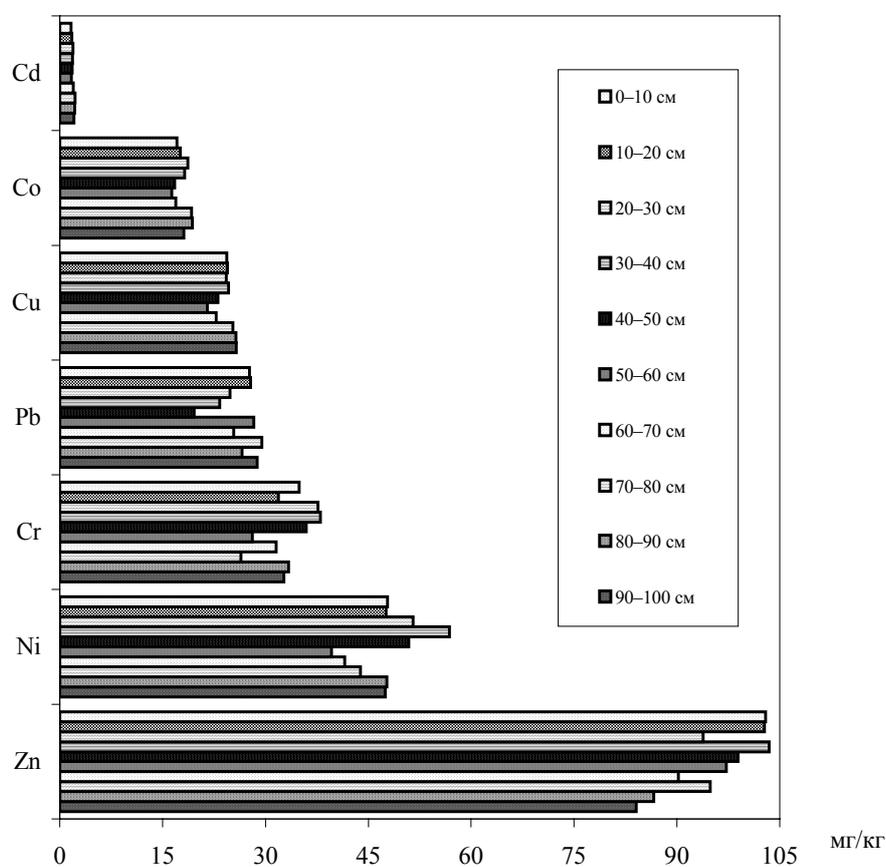


Рис. 1. Изменение содержания ТМ в стратифицированных слоях ДО озер РТ

Для нивелирования фактора дисперсности был произведен расчет средних концентраций ТМ в фациальных типах ДО (табл. 2). Аналогичные методические подходы к нормированию содержания металлов с учетом гранулометрического состава седиментов показали высокую эффективность на реках и водохранилищах Средней Волги, Урала и Сибири [12–16].

Табл. 3

Вариационно-статистические показатели содержания ТМ в слое 90-100 см ДО озер РТ, мг/кг ( $N = 25$ )

ТМ	<i>M</i>	<i>Me</i>	Min	Max	$\sigma$	<i>m</i>	<i>V</i> , %
Cd	2.1	1.7	1.4	3.5	0.8	0.3	38
Pb	28.8	31.6	9.9	44.2	13.6	5.6	47
Cu	25.7	24.5	21.5	35.2	5.1	2.1	20
Co	18.1	19.8	8.4	23.4	5.5	2.2	30
Ni	47.5	49.7	34.5	58.6	9.3	3.8	20
Zn	84.1	86.4	65.0	102.1	14.7	6.0	18
Cr	32.7	24.5	12.0	62.2	21.1	8.6	64
Mn	648.2	740.8	238.5	870.3	261.6	106.8	40
Fe	29392	27056	20250	44463	8192	3344	28

\* Условные обозначения см. в табл. 1.

Для исследованных ТМ характерно увеличение их концентраций от песчаных отложений к илистым. Каждому металлу присуща определенная геохимическая контрастность, связанная с обогащенностью ДО глинистым материалом, а также с химическими и геохимическими свойствами элемента. Ранжированный ряд по соотношению концентраций ТМ в серых илах и песках выглядит следующим образом: Pb, Co, Fe (3) – Cd (5) – Cr, Ni, Mn (6) – Zn (8) - Cu (10). Таким образом, в качестве геохимических индикаторов условий седиментогенеза наиболее ярко проявились два металла - Cu и Zn.

Распределение Cd, Co, Cu, Pb, Cr, Ni в стратифицированных слоях ДО (рис. 1) не имело четко обозначенных пиков концентраций. Небольшие колебания вызваны в основном гидродинамическими факторами, влияющими на течение процессов седиментации и сортировки частиц. Относительное накопление глинистых и песчаных фракций в составе ДО отразилось на общем уровне в них ТМ. Иная картина вертикального распределения в колонках ДО была получена для Zn, общее содержание которого выросло за последние 200 лет с 80 до 103 мг/кг.

С учетом показателей вариабельности в качестве фоновых концентраций ТМ (общие формы, экстрагируемые 5н HNO<sub>3</sub>) в илистых ДО озер РТ предлагается рассматривать их средние арифметические значения в слое 90–100 см: Cd – 2, Pb – 29, Cu – 26, Co – 18, Ni – 48, Zn – 84, Cr – 33, Mn – 648 мг/кг (табл. 3).

Сравнение современных концентраций ТМ в ДО с доиндустриальными фоновыми показало отсутствие значимых превышений по всем изученным элементам. Аномальные концентрации ТМ обнаружены лишь в 6 образцах современных ДО: Pb – оз. Провальное (коэффициент концентрации  $K_k$  над фоном 2.5); Cd – оз. Кара-Куль (2.5), Ni – оз. Лебяжье (1.5), Cr – оз. Черное (1.5), оз. Ковалинское (2.0), Cu – оз. Мочальное (1.5) По классификации Хокансона [2] ДО характеризуются умеренной степенью загрязнения конкретным металлом ( $1 < K_k < 3$ ). С учетом сравнительно невысокой контрастности указанные аномалии могут носить как природный, так и техногенный характер.

При оценке уровня загрязнения озерных отложений региона, относящихся к иным гранулометрическим разновидностям (пески, илистые пески, песчанистые илы), следует ориентироваться на средние концентрации металлов в соответствующих фациальных типах.

### Summary

*D.V. Ivanov, I.I. Ziganshin, E.V. Osmelkin. Regional Background Concentrations of Metals in Benthic Sediments of Tatarstan Republic Lakes.*

Background (pre-industrial) metal concentrations have been determined in benthic sediments of the Tatarstan Republic lakes (mg/kg): Cd – 2, Co – 18, Pb – 29, Cu – 26, Ni – 48, Zn – 84, Cr – 33, Mn – 648. The content of metals in modern lake sediments is defined by facial features of sediments accumulation and does not exceed the limits of regional geochemical background.

**Key words:** lakes, benthic sediments, metals, geochemical background.

### Литература

1. *Даувальтер В.А.* Концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер Кольского полуострова как индикатор загрязнения водных экосистем // Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов Кольского Севера. - Апатиты, 1995. - С. 24–35.
2. *Håkanson L.* An ecological risk index for aquatic pollution control - a sedimentological approach // *Water Res.* - 1980. - V. 14. - P. 975-1001.
3. *Förstner U., Wittmann G.T.W.* Metal pollution in aquatic environment. - Berlin-Heidelberg-New York: Springer, 1983. - 481 p.
4. *Даувальтер В.А.* Закономерности распределения концентраций тяжелых металлов в донных отложениях в условиях загрязнения и закисления озер (на примере Кольского Севера): Дис. ... канд. геогр. наук. - СПб, 1994. - 231 с.
5. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность.
6. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
7. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.
8. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.
9. РД 52.18.191-89. Методика выполнения массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. - М., 1990. - 32 с.
10. *Законнов В.В.* Седиментация в водохранилищах Волги // Современные проблемы исследования водохранилищ: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. - Пермь, 2005. - С. 126–130.
11. *Иванов Д.В., Зиганшин И.И.* Характеристика осадконакопления в озерах Республики Татарстан // Двадцать первое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Доклады и краткие сообщения. - Чебоксары, 2006. - С. 115–116.
12. *Иванов Д.В.* Фоновое содержание тяжелых металлов в компонентах островных экосистем Куйбышевского водохранилища: Дис. ... канд. биол. наук. - Н. Новгород, 1997. - 165 с.

13. Степанова Н.Ю., Латыпова В.З., Анохина О.К., Таиров Р.Г. Сорбционная способность и факторы формирования химического состава донных отложений Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ // Эколог. химия. - 2003. - № 12(2). - С. 105-116.
14. Эйрих А.Н. Разработка метода оценки загрязненности рек тяжелыми металлами для системы экологического мониторинга: Дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2003. - 118 с.
15. Нохрин Д.Ю., Грибовский Ю.Г., Давыдова Н.А. Подходы к идентификации происхождения тяжелых металлов в донных отложениях и проблемы нормирования на примере двух уральских водохранилищ ГРЭС // Водн. ресурсы. - 2008. - Т. 35, № 5. - С. 566-573.
16. Карнаухова Г.А. Процессы осадкообразования в водохранилищах ангарского каскада: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. - Барнаул, 2009. - 44 с.

Поступила в редакцию  
24.11.09

---

**Иванов Дмитрий Владимирович** - кандидат биологических наук, ученый секретарь, заведующий лабораторией биогеохимии Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, г. Казань.

E-mail: [water-rf@mail.ru](mailto:water-rf@mail.ru)

**Зиганшин Ирек Ильгизарович** – кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, г. Казань.

E-mail: [irek\\_ziganshin@mail.ru](mailto:irek_ziganshin@mail.ru)

**Осмелкин Евгений Витальевич** – старший преподаватель кафедры природопользования и геоэкологии Чувашского государственного университета, г. Чебоксары.

E-mail: [edemchr@mail.ru](mailto:edemchr@mail.ru)