

УДК 550.4

**ТИТОВА Ксения Владимировна**, младший научный сотрудник лаборатории экоаналитических исследований Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 16 научных публикаций

**КОКРЯТСКАЯ Наталья Михайловна**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экоаналитических исследований Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 78 научных публикаций, в т. ч. одной монографии

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИОННОСПОСОБНОГО ЖЕЛЕЗА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЕР\***

В статье представлены результаты послонного определения содержания реакционноспособного железа в толще донных отложений трех малых озер Архангельской области, ранее не охваченных подобными исследованиями; показаны особенности распределения указанного элемента. Данные получены в ходе изучения рассматриваемых объектов с 2008 по 2012 годы на достаточно представительном количестве образцов.

**Ключевые слова:** Малые озера, донные отложения, реакционноспособное железо.

**Введение.** Железо – один из наиболее распространенных химических элементов в земной коре, занимающий четвертое место среди них. Этот металл является активным участником геохимических окислительно-восстановительных процессов в результате возможной передачи электронов и своеобразным индикатором Red/OX условий, то есть в зависимости от условий внешней среды наблюдается доминирование определенной формы (окисленной или восстановленной) железа. Геохимические изменения проявляются в ходе трансформации форм нахождения железа, перераспре-

деления его в осадках; разнонаправленного обмена химическим элементом между осадками и наддонной водой через границу раздела вода-дно. В таких процессах, имеющих физико-химическую и микробиологическую природу, принимает участие не все железо, находящееся в осадке, а только его растворимая часть, присутствующая в составе иловых вод, или реакционноспособная (легкоподвижная) часть твердой фазы [4, с. 28].

Основными источниками его поступления в водные экосистемы являются вынос с водосборных площадей и проникновение подзем-

---

\* Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ-Север №11-05-98802; программы Президиума РАН №12-П-5-1021

ных вод. Объектами исследования являются малые озера юго-запада Архангельской области. Рельеф этой территории образован подходящими близко к поверхности палеозойскими породами (главным образом известняками и мергелями), покрытыми незначительным по мощности слоем морены четвертичных наносов морского и ледникового происхождения [1, с. 7]. В результате древних тектонических разломов, под действием неоднократно наступавших и отступавших ледников и сформировался рельеф данной местности; котловины расположенных здесь озер имеют ледниковое и ледниково-тектоническое происхождение [3, с. 45–46].

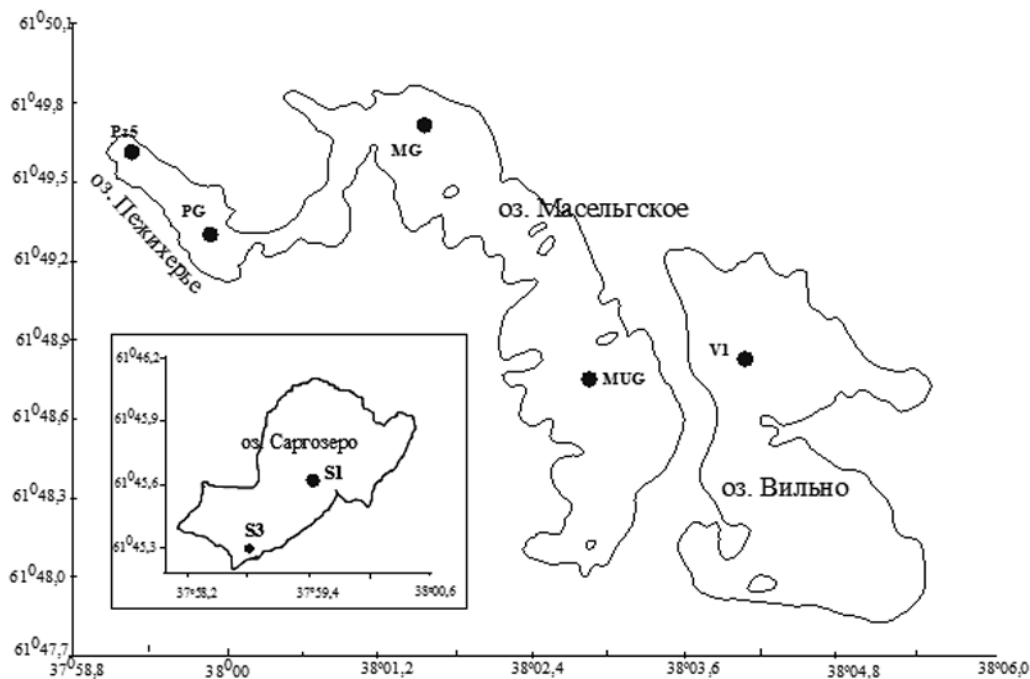
Таким образом, объекты нашего исследования расположены на территории, уникальной не только в геологическом аспекте (здесь проходит граница Балтийского кристаллического щита и Русской платформы) [3, с. 47], но и в культурно-природном наследии, о чем свидетельствует организация национального парка «Кенозерский» (Парк, КНП). Нами были изучены три малых озера на территории Парка: Масельгское, Вильно и Саргозеро. Все происходящие в них процессы протекают в естественных условиях. Морфометрические характеристики озер приведены в *таблице*.

**Материалы и методы.** Отбор проб донных отложений (ДО) осуществлялся в период с 2008 по 2012 год на выбранных по морфометрическим характеристикам станциях исследуемых озер во время зимней и летней межени (см. *рисунок*). Две из них были глубоководными

– до 20 м (MG и PG); остальные – мелководными (MUG, V1, Pz5 и S3 – до 5 м, а S1 – до 9 м). Общее количество отобранных проб составило 371, из них отдельно по станциям: MG – 106 образцов, PG – 54, MUG – 28, Pz5 – 44, V1 – 67, S1 – 51, S3 – 21. Для погружения в толщу осадков применялась ударная трубка диаметром 5 см из полимерного материала. Послойное разделение отобранных колонок производилось в зависимости от их визуальных литологических особенностей, преимущественно в интервале 5 см (реже 1-2 см – в основном для поверхностных горизонтов). Отложения незамедлительно упаковывались в полиэтиленовые пакеты с максимально возможным удалением из них воздуха с целью предотвращения окислительных процессов. Анализ по определению железа осадков проводился в условиях оборудованной лаборатории в непосредственной близости к местам их отбора. В соответствии с целями проводимых нами исследований применялась экстракция донных отложений 3,5 N серной кислотой без нагревания в течение 2 ч. При такой обработке в раствор переходит железо растворимых в разбавленной кислоте карбонатов, фосфатов, гидроксидов и сульфидов (пирит определяется расчетным путем) [4, с. 32]. На основании проведенного нами теоретического исследования способов извлечения форм железа из твердых матриц выявлено, что преимущество применения экстракции 3,5 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> заключается в достаточной селективности в извлечении минеральных соединений железа поровой воды и донных осадков и возможно-

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗЕР [2, С. 19]

Характеристики	Озера		
	Масельгское	Вильно	Саргозеро
Длина, км	6,5	3,0	2,0
Наибольшая ширина, км	1,0	1,4	1,0
Средняя глубина, м	2,9	2,3	3,3
Наибольшая глубина, м	20,0	5,0	9,0
Площадь зеркала озера, км <sup>2</sup>	3,44	2,70	1,5
Объем озера, км <sup>3</sup>	0,01013	0,00577	0,005



Расположение станций отбора проб донных осадков в озерах КНП (2008–2012 гг.)

стью разделения реакционноспособных форм различной степени окисления [5, с. 281]. Fe (II) определяли в аликвоте экстракта титрованием  $K_2Cr_2O_7$ , Fe (III) – в другой аликвоте титрованием  $Na_2S_2O_3$  выделившегося  $I_2$  после взаимодействия  $Fe^{3+}$  с KI. Параллельно осуществлялось установление влажности отобранных образцов донных отложений [4, с. 39–40].

**Результаты и их обсуждение.** Отобранные ДО отличались по литологическому строению. Илистые осадки характеризуются большим содержанием влаги: для глубоководных и мелководных станций V1, S3 и S1 влажность в среднем составляла 89 %, для поверхностного слоя – 92–96 %. Для отложений станций MUG и Pz5 усредненная влажность осадков достигает 70 и 77 % соответственно, что связано со сменой илистых осадков верхних горизонтов на плотные коричневые и серые глинистые (снижение содержания влаги от 93 до 50–60 %). Особенности в осадкообразовании сказались

на гранулометрии отложений озера Масельгское – обнаружен переходный слой на глубине 15–25 см, содержащий значительное количество песчаной фракции. Распределение реакционноспособного железа в толще осадков напрямую связано с литологическими особенностями осадков, морфологией озерной котловины, а также содержанием органического вещества и неорганических лигандов.

Глубоководные станции озера Масельгского, расположенные в центральной и западной частях водоема, выступают в роли концентраторов поступающих веществ. Содержание накапливающегося реакционноспособного железа в среднем составляет 7 % (здесь и далее в расчете на сухой осадок). Максимальные количества приурочены к поверхностным слоям, где содержание железа увеличивается до 10 %. В целом для обоих участков характерны одинаковые тенденции. Рассматривая распределение форм железа по глубине, можно отметить,

что по мере погружения в толщу отложений количественное содержание снижается: 10 % (0–5 см) – 5 % (15–30 см) – 3 % (глубже 30 см), оставаясь еще на достаточно высоком уровне. Поверхностный горизонт отличается доминированием окисленной формы железа, на долю которой приходится до 76 % от общего количества элемента. По мере продвижения к нижним слоям осадка начинает наблюдаться перераспределение форм в составе реакционноспособного железа: все большую роль играет восстановленная форма – от равных количеств ее с окисленной вплоть до 57 % от его общего количества. В переходном песчаном слое зафиксирован минимум концентраций, что связано с низкой удерживающей способностью песка ко всем компонентам. Развитие восстановительных условий в толще осадков сопровождается расходом органического вещества, необходимого для активации восстановительных процессов. Высвобождающееся при минерализации органики железо не накапливается в донных отложениях того горизонта, куда оно поступает. В отсутствие достаточного количества связывающих лигандов (например, на долю сульфидных форм приходится всего лишь до 3 % от общего содержания восстановленного железа), и ввиду сильной обводненности илистых осадков восстановленное железо может диффундировать в вышележащие слои отложений, достигая их поверхности, и вносить вклад в содержание железа этих горизонтов. При контакте его с остаточными количествами кислорода происходит окисление, что вызывает пополнение окисленными соединениями металла поверхностных слоев, наряду с поступлением их из водной толщи. Все процессы, описанные выше, характерны для обоих сезонов (зимней и летней межени).

Для мелководных станций озер Вильно и Саргозеро в илистых донных отложениях также наблюдается доминирование окисленной формы реакционноспособного железа в верхних слоях. Но общее количество его заметно ниже – 1,6 % и 3,0 % соответственно. В зимний период в отложениях обоих озер заметных

изменений в соотношении форм железа не наблюдается, перераспределения незначительны, хотя общее количество железа снижается. В летний период для озера Вильно эти тенденции сохраняются. Для Саргозера зафиксирована активизация восстановительных процессов в летний период по всей толще осадков, что можно связать с поступлением доступных органических веществ не гуминовой природы в результате разложения остатков высшей водной растительности и водорослей.

Мелководные станции озера Масельгского отличаются между собой по распределению реакционноспособного железа. При смене осадков с илистых на глинистые наблюдается заметное снижение количеств железа от 3–4 % до 0,5–1 %. Минимум в концентрации органического вещества (0,5–3 %) более глубоких слоев по сравнению с верхними слоями отложений (до 11 %) связан непосредственно с литологическими особенностями – глинистые осадки представлены в основном минеральными формами элементов со значительно меньшим содержанием органики. Для отложений западной части водоема (Pz5) в целом для зимней и летней межени отмечено преобладание восстановленной формы железа для нижних слоев глинистых осадков (до 40 см), в некоторых случаях здесь также зафиксированы максимумы в формах восстановленной серы, а также сокращение количества органического вещества. В южной части озера (MUG) восстановительные условия развиваются в подповерхностных горизонтах илистых отложений вплоть до зоны перехода, но четко выраженных закономерностей в смене условий не установлено.

Подводя итог исследованию распределения форм реакционноспособного железа в донных осадках трех малых озер КНП, следует отметить, что внутриводоемные особенности (морфология (строение озерной котловины), гидрология (ветровое перемешивание или стратификация), качество поступающего вещества) накладывают отпечаток на распре-

деление форм в его составе. Железо выступает в роли маркера, четко реагирующего на изменения Red/OX условий в отложениях, по соотношению форм (их перераспределению) можно судить о преобладающих в донных осадках по направленности протекания геохимических процессов.

### Список литературы

1. Агроклиматический справочник по Архангельской области. Л., 1961.
2. Козьмин А.К., Шатова В.В. Рыбохозяйственная характеристика озер Архангельской области. Архангельск, 1997.
3. Природное и культурное наследие Кенозерского национального парка: сб. науч. ст. / Е.Ф. Шатковская, С.В. Торхов, Д.В. Тормосов, Н.М. Теребихин и др. Петрозаводск, 2002.
4. Соколов В.С. Определение реакционноспособных форм железа и марганца в морских осадках // Химический анализ морских осадков. М., 1980. С. 28–41.
5. Титова К.В., Кокрятская Н.М. Сравнение способов извлечения форм железа из донных осадков при изучении биогеохимических процессов в водных экосистемах // материалы Всерос. совещ. «Современные проблемы геохимии», посвященного 95-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона. Иркутск, 2012. Т. 1. С. 279–281.

### References

1. *Agroklimaticheskiy spravochnik po Arkhangel'skoy oblasti* [Agroclimatic Guide to the Arkhangelsk Region]. Leningrad, 1961. 220 p.
2. Koz'min A.K., Shatova V.V. *Rybokhozyaystvennaya kharakteristika ozer Arkhangel'skoy oblasti* [Commercial Fishing Characteristics of the Arkhangelsk Region Lakes]. Arkhangelsk, 1997. 80 p.
3. Shatkovskaya E.F., Torkhov S.V., Tormosov D.V., Terebikhin N.M., et al. *Prirodnoe i kul'turnoe nasledie Kenozerskogo natsional'nogo parka: sb. nauch. st.* [Natural and Cultural Heritage of Kenozero National Park: Collected Papers]. Petrozavodsk, 2002. 175 p.
4. Sokolov V.S. *Opredelenie reaktivnykh form zheleza i margantsa v morskikh osadkakh* [Detection of Reactive Forms of Iron and Manganese in Marine Sediments]. *Khimicheskiy analiz morskikh osadkov* [Chemical Analysis of Marine Sediments]. Moscow, 1980, pp. 28–41.
5. Titova K.V., Kokryatskaya N.M. *Sravnenie sposobov izvlecheniya form zheleza iz donnykh osadkov pri izuchenii biogeokhimicheskikh protsessov v vodnykh ekosistemakh* [Comparison of Extraction Methods of Iron from the Bottom Sediments while Studying Biogeochemical Processes in Aquatic Ecosystems]. *Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya "Sovremennye problemy geokhimii"* [Proc. Russia-Wide Conf. "Modern Problems of Geochemistry"]. Irkutsk, 22–26 October, 2012. Vol. 1, pp. 279–281.

**Titova Kseniya Vladimirovna**

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

**Kokryatskaya Natalya Mikhailovna**

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

### DISTRIBUTION OF REACTIVE IRON IN THE BOTTOM DEPOSITS OF MINOR LAKES

The article presents the results of layerwise determination of reactive iron content in the bottom deposits of three small lakes in the Arkhangelsk Region that were not previously covered by such

researches. Specific features of distribution of this element are shown. The data were obtained during the study of the objects under consideration between 2008 and 2012 involving quite a representative number of samples.

**Keywords:** *minor lakes, bottom deposits, reactive iron.*

*Контактная информация:*

Титова Ксения Владимировна

*адрес:* г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23

*e-mail:* dirnauka@ierp.ru

Кокрятская Наталья Михайловна

*адрес:* 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23

*e-mail:* nkokr@yandex.ru

Рецензент – *Коробов В.Б.*, доктор географических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа института нефти и газа Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, директор Северо-Западного отделения института океанологии имени П.П. Ширшова РАН