

УДК 551.312

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА, ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ЖЕЛЕЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КОНДОПОЖСКОЙ ГУБЫ (ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО)

Е. А. Вахрамеева*, Т. А. Жибарева

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н. П. Лаверова УрО РАН (пр. Никольский, 20, Архангельск,
Россия, 163020), *vakhr-elena@yandex.ru*

Актуальность проводимых исследований обусловлена необходимостью изучения процессов перераспределения и трансформации органического вещества и распределения форм железа в толще донных осадков озер. Данные многолетнего мониторинга в Кондопожской губе позволяют выявить процессы, влияющие на формирование донных отложений. Результаты исследований подтвердили, что поступающее органическое вещество двойного происхождения – автохтонное при значительной продуктивности части залива и аллохтонное, гумусовой природы терригенного происхождения, попадая в залив, осаждается на дно. Содержание органического вещества в донных отложениях связано с их гранулометрическим составом и содержанием железа. Выявлена корреляционная связь между этими показателями.

Ключевые слова: гранулометрический состав; донные отложения; автохтонное и аллохтонное органическое вещество; органический углерод; железо

Для цитирования: Вахрамеева Е. А., Жибарева Т. А. Распределение гранулометрического состава, органического вещества и железа донных отложений Кондопожской губы (Онежское озеро) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 18–27. doi: 10.17076/lim1902

Е. А. Vakhrameeva*, Т. А. Zhibareva. DISTRIBUTION OF THE PARTICLE-SIZE COMPOSITION, ORGANIC MATTER AND IRON IN BOTTOM SEDIMENTS OF KONDOPOGA BAY (LAKE ONEGO)

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy
of Sciences (20 Nikolsky Ave., 163020 Arkhangelsk, Russia), *vakhr-elena@yandex.ru*

Research into the processes of organic matter redistribution and transformation and the distribution of iron forms in the lake sediment column are of high relevance. Data from long-term monitoring in Kondopoga Bay provide insights into the processes that influence the formation of bottom sediments. The research results confirm that the incoming organic matter is of dual origin – autochthonous, due to significantly high productivity in part of the bay, and allochthonous, terrigenous matter of humic nature. Entering the bay, it settles

to the bottom. The organic matter content of the sediments is related to their particle size distribution and iron content. A correlation between these indicators was revealed.

Keywords: particle-size composition; lake sediments; autochthonous and allochthonous organic matter; organic carbon; iron

For citation: Vakhrameeva E. A., Zhibareva T. A. Distribution of the particle-size composition, organic matter and iron in bottom sediments of Kondopoga Bay (Lake Onego). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 18–27. doi: 10.17076/lim1902

Введение

Кондопожская губа – один из крупнейших и глубоководных районов Онежского озера, с грядой из более 20 островов, характеризующийся сильной расчлененностью береговой линии и сложным рельефом дна. Исследуемый водоем в северной части принимает воды р. Суны, впадающей около г. Кондопоги и несущей с водосбора воду, обогащенную гуминовыми веществами, и стоки крупнейшего Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК). Длина залива – 33 км, максимальная ширина – 9,5 км, объем водных масс – 4,3 км³, наибольшая глубина – 82 м, средняя – 21 м, площадь водного зеркала – 223 км² [Тимакова и др., 2014]. Этот район Онежского озера относится к наиболее обследованному, хорошо изученному [Васильева, 1990; Белкина, 2011; Тимакова, 2014; Калинин, Белкина, 2018]. Комплексные наблюдения за экологическим состоянием и качеством вод губы были начаты в 1960-е годы и проводились после важнейших изменений экологической ситуации в водоеме. Как показано в работе [Тимакова и др., 2014], в 1980-х годах были предприняты меры по нейтрализации кислых стоков, введены в эксплуатацию глубинный рассеивающий выпуск производственных вод и станция биологической очистки.

Наиболее подробная характеристика донных отложений (ДО), их гранулометрический и физико-химический состав приведены в работах [Семенович, 1973; Васильева, 1990]. Согласно Д. А. Субетто с соавт. [2022], озерные отложения котловины Онежского озера представлены ледниково-озерными и озерными отложениями – текуче-глинистыми алевритами и алевропелитами серого и зеленовато-серого (нижняя часть) цвета, которые вверх по разрезу переходят в текуче-органогенные и минерально-органогенные илы.

Донные отложения являются индикатором различных природных и антропогенных процессов, происходивших за весь период существования водоема. Гранулометрический состав ДО озерных экосистем является одним

из основных параметров, характеризующих типы осадков, а также дающих возможность судить о механизме процесса седиментации и динамике водной среды. Донные отложения аккумулируют органические (ОВ) и минеральные вещества, обуславливая этим нарушение геохимических циклов биогенных элементов. В толще ДО Кондопожской губы накоплена огромная информация об антропогенном влиянии сточных вод Кондопожского ЦБК и хозяйственно-бытовых стоков города Кондопоги [Васильева, 1990; Белкина, 2011; Тимакова и др., 2014; Калинин, Белкина, 2018].

Основными компонентами водоема, способного самостоятельно создавать (производить) ОВ, являются автотрофные организмы (водоросли, высшая водная растительность) и бактерии. Однако именно ОВ растительного происхождения является энергетической основой для продуцирования. Процессы образования ОВ и их распада называют процессами «продукции» (создание, производство) и «деструкции» (разрушение). Не весь органический материал разрушается с одинаковой скоростью. Жиры, сахара и белки разлагаются быстро, а древесина (клетчатка, лигнин) – очень медленно. Наиболее устойчивым промежуточным продуктом разложения органических веществ является гумус (перегной), дальнейшая минерализация которого происходит медленно. Гумусовые вещества представляют собой продукты конденсации ароматических соединений (фенолов, бензолов и др.) с продуктами распада белков и полисахаров; для их расщепления, видимо, требуются специальные ферменты, которые часто отсутствуют у почвенных и водных гетеротрофных организмов [Шилов, 2011].

Целью данного исследования является изучение гранулометрического состава и распределения органических веществ по содержанию потерь при прокаливании (ППП), общего ($C_{\text{общ}}$) и органического ($C_{\text{орг}}$) углерода, общего ($N_{\text{общ}}$) и органического ($N_{\text{орг}}$) азота, а также железа в донных отложениях кернов Кондопожской губы по мере удаления от источника антропогенного загрязнения.

Объекты и методы исследования

Отбор проб ДО в Кондопожской губе проводили в августе 2015 г. совместно с сотрудниками КарНЦ РАН. Пробы поверхностного слоя (0–5 см) отбирали дночерпателем Экмана-Берджа, кернов – поршневой трубкой длиной 50 см (модифицированный вариант стратометра Алексона) [Белкина, 2011]. Дискретность отбора проб 5 см.

Разрез К3–К7 [Сярки, Фомина, 2019], состоящий из пяти станций, представлен на рис. 1. Характеристика станций отбора показана в табл. 1. Следует выделить ст. К7 на выходе из губы, где отбирался поверхностный слой глубиной 5 см. Исследования, проводимые с 1990-х годов на этих станциях, получили мониторинговый характер.

Намеченные станции отличаются по морфологическим и гидрологическим характеристикам (табл. 1).

Непосредственно после отбора в судовой лаборатории в ДО определялся рН. Исследование гранулометрического состава, распре-

деления органического вещества и железа в донных осадках проводили в лаборатории эко-аналитических исследований в г. Архангельске.

Во влажных образцах определяли естественную влажность при температуре 105 ± 2 °С, гранулометрический состав и железо Fe(II) и Fe(III). В воздушно-сухих образцах – органическое вещество по содержанию ППП при 550 °С [Heiri et al., 2001]. Расчет ППП проводили на абсолютно сухую навеску. Определение общего органического углерода и органического азота выполняли методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на С,Н,Н-анализаторе фирмы «Hewlett-Packard».

Гранулометрический состав ДО озер определяли в соответствии с методикой [МИ № 88-16365-010-2017]. Расчет содержания фракций проводили на абсолютно сухую навеску образца. Относительная погрешность измерения для всех гранулометрических фракций составляет от 19 до 29 %. Гранулометрические фракции представлены в классификации Н. А. Качинского [Логвиненко, Сергеева, 1986].

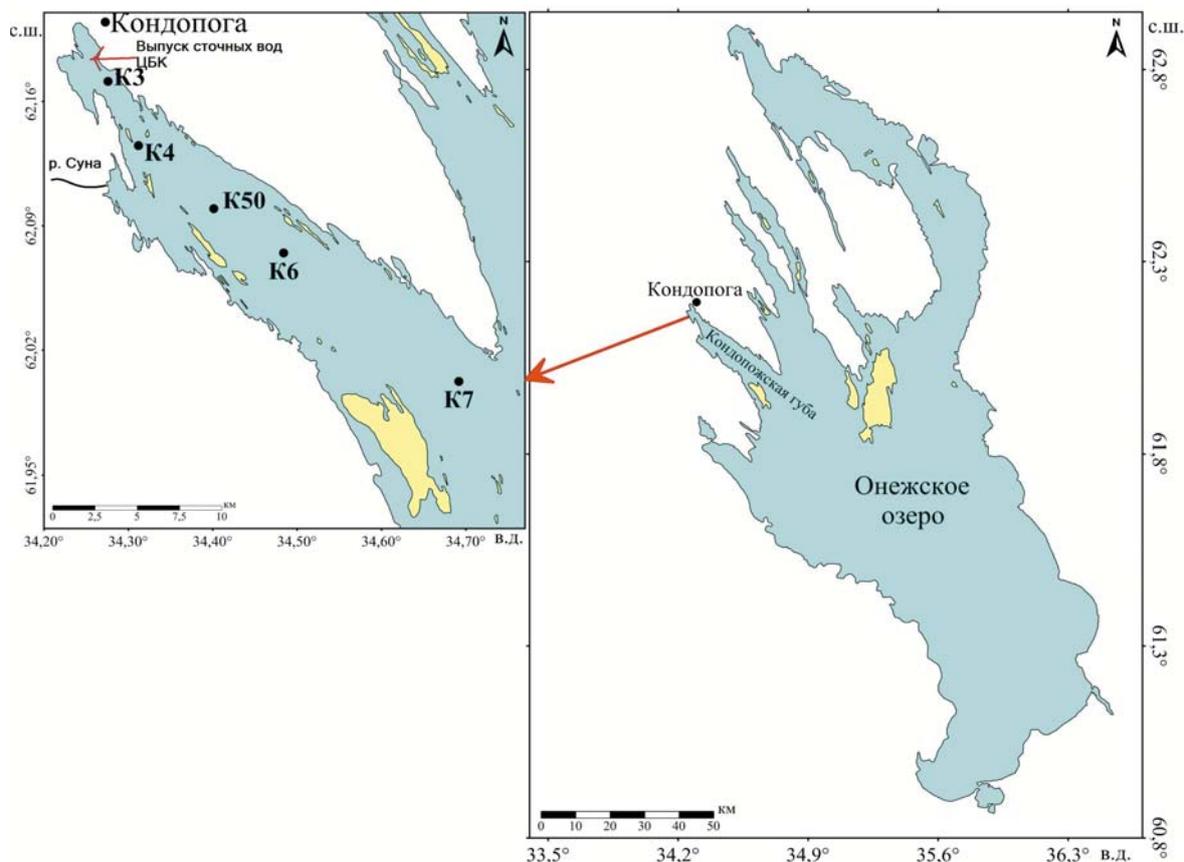


Рис. 1. Карта-схема отбора кернов донных отложений в Кондопожской губе Онежского озера

Fig. 1. Schematic map of sediment core sampling in Kondopoga Bay of Lake Onego

Таблица 1. Морфометрические характеристики Кондопожской губы и место отбора кернов донных отложений
Table 1. Morphometric characteristics of Kondopoga Bay and the location of sediment core sampling

Станция Station	Координаты точки отбора Coordinates of the sampling point	Расстояние от выпуска ЦБК, км Distance from the PPM outlet, km	Глубина отбора, м Sampling- depth, m	Мощность керна, см Core thickness, cm	Первичная характеристика осадка Primary characteristics of sediment
K3	62° 10.283'N 34° 16.553'E	0,2	12	0–50	Коричневый жидкий ил с песком, волокном, переходящий в пластичный серый и глину Brown liquid silt with sand, fiber, turning into soft gray and clay
K4	62° 08.102'N 34° 18.715'E	4,0	27	0–25	Коричневый жидкий ил, переходящий в плотный серый с растительностью Brown liquid silt turning into dense gray with vegetation
K50	62° 05.976'N 34° 24.078'E	10,0	39	0–35	Ил коричневый Brown silt
K6	62° 04.482'N 34° 29.052'E	15,0	78	0–45	Коричневый жидкий ил, переходящий в плотный серый с черными слоями Brown liquid silt turning into dense gray with black layers
K7	62° 00.150'N 34° 41.511'E	28,0	30	0–5	Светло-коричневый наилок, переходящий в серо-коричневую глину Light brown silt deposit turning into gray-brown clay

Определение реакционноспособных форм железа осуществляли после извлечения их из осадка 3,5 N серной кислотой [Соколов, 1980]. Fe(II) определяли в аликвоте раствора титрованием $K_2Cr_2O_7$, Fe(III) – из другой аликвоты, титрованием $Na_2S_2O_3$ выделившегося I_2 после обработки KI.

Микрофотографии ДО сделаны на микроскопе AltamiBio2 с увеличением в 100 раз.

Результаты и обсуждение

По данным гранулометрического анализа (табл. 2), керны ДО, отобранные на ст. K3 и K4, представлены алевропелитовыми илами с варьированием алеврита от 18,18 до 55,94 %. Верхние слои керна K3 содержат жидкий серый ил с включением древесных волокон, поступающих со сточными водами ЦБК [Белкина, 2011; Калинкина, Белкина, 2018]. Нижележащие слои кернов с этих станций содержат до 78,0 % пелита. На ст. K7 на выходе из залива первые 2 см определились как алевритовый песок, а последующие 3 см – алеврит с вариацией влажности от 29,5 % среднего слоя до 59,3 % в поверхностном слое (рис. 2). Все остальные пробы были сильно обводнены, влажность осадков варьирует от 73,6 до 94,5 %.

Анализ гранулометрического состава также показал, что ДО кернов состоят из чередующихся слоев серого и коричневого пелитового и алевропелитового ила. Так, в ДО ст. K50 и K6 по всей глубине кернов с увеличением глубины залива и удалением от выпуска сточных вод

Кондопожского ЦБК возрастает содержание пелитовой фракции (до 98,02 %), т. е. осадок становится более отсортированным и мелкодисперсным (табл. 2; рис. 3, а).

Общее содержание органического вещества по параметру ППП составляет в ДО по всем кернам от 2,41 до 45,72 % (табл. 3). Наибольшие значения ППП наблюдаются в слоях глубиной до 35 см в керне ст. K3, расположенной в районе сброса сточных вод Кондопожского ЦБК. Содержание ППП по разрезу K4–K6 также повышенное, но постоянное по всей длине кернов – от 12,27 до 28,22 %. Низкое содержание ППП в слоях 2–5 см на станции K7 в среднем 3,13 %, что подтверждает глинистый тип осадка (84,34 % алевритов).

Донные отложения алевропелитового и пелитового состава содержат повышенные концентрации $C_{орг}$ – от 1,21 % в нижних слоях керна до 11,18 % в поверхностном слое на ст. K3, что предполагает значительный разброс ОВ при практически одинаковом гранулометрическом составе ДО (табл. 2, 3; рис. 4). Полученные концентрации $N_{общ}$ и $N_{орг}$ практически равны и варьируют от 1,93 % в поверхностном слое до их исчезновения в нижней части керна.

Изменение концентраций ОВ зависит от особенностей продукционных процессов в озере. Изменчивость содержания всех форм азота в ДО связана с поступлением ОВ природного и антропогенного происхождения со взвешенными веществами и физико-химическими и биологическими превращениями в процессе оседания их в водной толще.

Таблица 2. Анализ типа донных отложений по содержанию гранулометрических фракций в ядрах Кондопожской губы (средние значения*)

Table 2. Analysis of the bottom sediments type by the content of granulometric fractions in cores of Kondopoga Bay (average values*)

Станция Station	Горизонт слоя, см Layer horizon, cm	Фракционный состав, % Fractional composition, %			Влажность, % Wetness, %	pH	Тип осадка Sediment type
		Песок Sand	Алевриты Silt	Пелит Pelites			
K3	0–10	1,78	53,97	44,26	95,3	6,27	Пелитоалеврит Pelite-silt
	10–15	11,94	36,00	52,06	93,3	6,19	Алевропелит с включением древесных остатков Silt-pelite with wood residues
	20–50	1,91	28,22	69,88	82,7	6,48	Алевропелит Silt-pelite
K4	0–15	1,13	37,24	61,33	89,3	6,63	Алевропелит Silt-pelite
	20–25	1,05	27,83	68,13	82,9	6,43	Алевропелит Silt-pelite
K50	0–35	1,64	10,11	88,21	84,6	6,95	Пелиты Pelites
K6	0–45	0,85	17,93	81,21	85,5	6,94	Пелиты Pelites
K7	0–2	45,64	42,68	11,68	44,4	6,61	Алевритовый песок Silt-sand
	2–5	9,01	84,34	6,65	43,7	6,53	Алеврит Silt

Примечание. *Представлены средние значения определяемых показателей в однотипных слоях осадков, глубина слоев суммируется.

Note. *The average values of the determined indicators of the sediment layers of the same type are given, the depth of the layers is summed up.

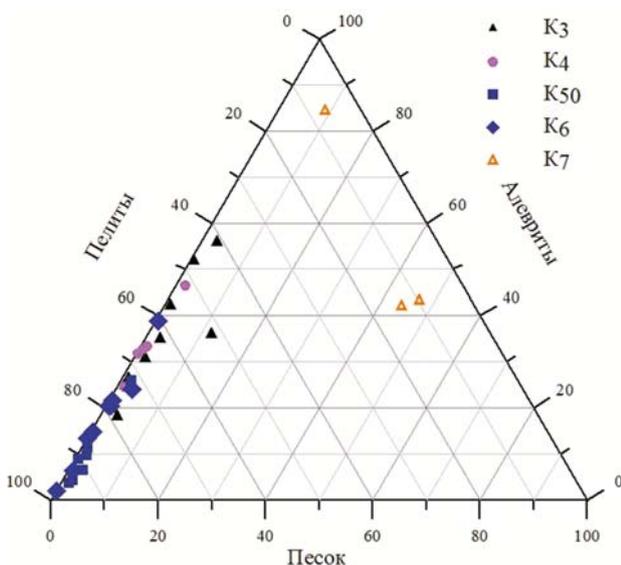


Рис. 2. Трехкомпонентная диаграмма гранулометрического состава ядер донных отложений Кондопожской губы

Fig. 2. Three-component diagram of the granulometric composition of sediments cores in Kondopoga Bay

Процесс накопления органического вещества в ДО отчетливо прослеживается на ст. К3 и К4 в северной части Кондопожской губы, принимающей сточные воды ЦБК. Ядра, отобранные в данной части залива (табл. 1), насыщены трудноразлагаемым органическим веществом (целлюлоза, остатки древесины, лигносульфоновые кислоты и др.), с запахом, грязно-серого и черного цвета в отличие от светлых оттенков коричневых и серых илов из глубоководной части губы [Белкина, 2011; Калинин, Белкина, 2018].

Полученные данные по содержанию в поверхностном слое ППП, $C_{орг}$ и $N_{орг}$ в Кондопожской губе указывают на наличие убывающего градиента распределения органических веществ от ЦБК в сторону открытого озера (рис. 3, б, 4; табл. 3). Общей закономерностью для всех исследованных ДО, как и по данным Н. И. Семеновича [1973], является наличие обратной взаимосвязи между $C_{орг}$ и содержанием пелитовой фракции с коэффициентом корреляции $r_{0,95} = -0,35$ ($n = 31$), что отражает

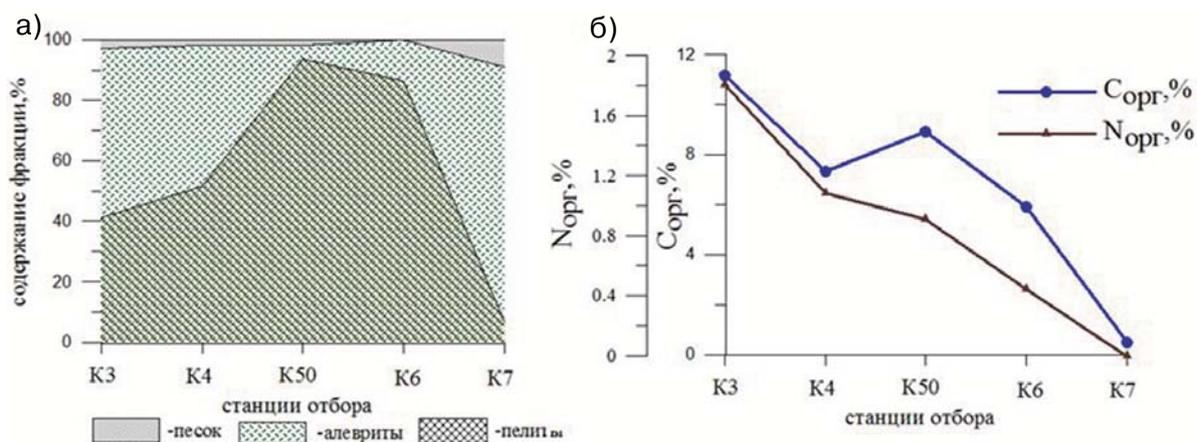


Рис. 3. Распределение гранулометрического состава (а) и C_{org} , N_{org} (б) в поверхностном слое донных отложений по разрезу К3–К7 в Кондопожской губе

Fig. 3. Distribution of granulometric fractions (a) and C_{org} , N_{org} (б) in the surface layer of bottom sediments along the K3–K7 section in Kondopoga Bay

Таблица 3. Распределение органического вещества и железа в кернах донных отложений Кондопожской губы (средние значения)

Table 3. Distribution of organic matter and iron in cores of bottom sediments in Kondopoga Bay (average values)

Станция Station	Горизонт слоя, см Layer horizon, cm	ППП, % Loss on ignition, %	$C_{общ}, %$ $C_{tot}, %$	$C_{орг}, %$ $C_{org}, %$	$N_{орг}, %$ $N_{org}, %$	$C_{орг}/N_{орг}$ C_{org}/N_{org}	Fe(II), %	Fe(III), %
К3	0–10	45,34	12,73	10,93	1,77	6,2	1,02	2,87
	10–15	39,84	9,16	8,82	0,73	12,1	0,78	1,16
	15–35	38,13	10,50	8,41	0,37	23,2	0,64	0,71
	40–50	10,34	1,86	1,70	0,06	34,6	1,04	1,06
К4	0–15	28,22	7,31	7,01	0,90	7,9	0,72	2,30
	20–25	25,84	5,81	3,63	0,29	15,6	0,68	1,60
К50	0–10	18,57	8,96	7,49	0,79	9,4	0,97	3,34
	15–35	12,02	4,18	3,75	0,39	10,1	1,29	2,61
К6	0–25	16,27	5,70	4,80	0,27	18,9	1,18	4,02
	30–45	15,67	3,24	2,56	0,08	41,5	0,60	3,18
К7	0–2	3,82	0,53	0,29	н.о.	-	0,15	0,96
	2–5	3,13	0,08	н.о.	н.о.	-	0,08	0,47

Примечание. н.о. – не обнаружено; «-» – расчет невозможен из-за отсутствия азота.

Note. н.о. – not found; «-» – calculation is not possible due to the lack of nitrogen.

высокое содержание мелких минеральных частиц глины (рис. 5, а). На рис. 5 (б) видна тесная взаимосвязь ОВ с органическим углеродом и азотом, указывающая на единый источник поступления их в ДО.

Соотношение C_{org}/N_{org} в ДО отобранных кернов, отражающее удельный вес органического вещества аллохтонного и автохтонного происхождения, варьирует в широком диапазоне от 6 до 81 (рис. 4, в). Органическое вещество является автохтонным, если соотношение C_{org}/N_{org} близко к 12. Если C_{org}/N_{org} более 12, ОВ представляет собой смесь веществ автохтонного и аллохтонного типа. Среднее значение C_{org}/N_{org} в

керне на ст. К50 равно 9,8 – соответственно, автохтонное органическое вещество ДО, продуцируемое водной растительностью, образуется на этой глубоководной станции [Хатчинсон, 1969; Белкина, 2011], а на остальных станциях присутствует поступление органического материала со стоками ЦБК и глинистого и карбонатного материала с водосборной площади залива. Среди почв водосборного бассейна наиболее распространены подзолы иллювиально-железистого и иллювиально-гумусово-железистого типа, что способствует поступлению железа в озеро, образуя комплексы с гумусовыми кислотами, растворимыми в воде [Субетто и др., 2022].

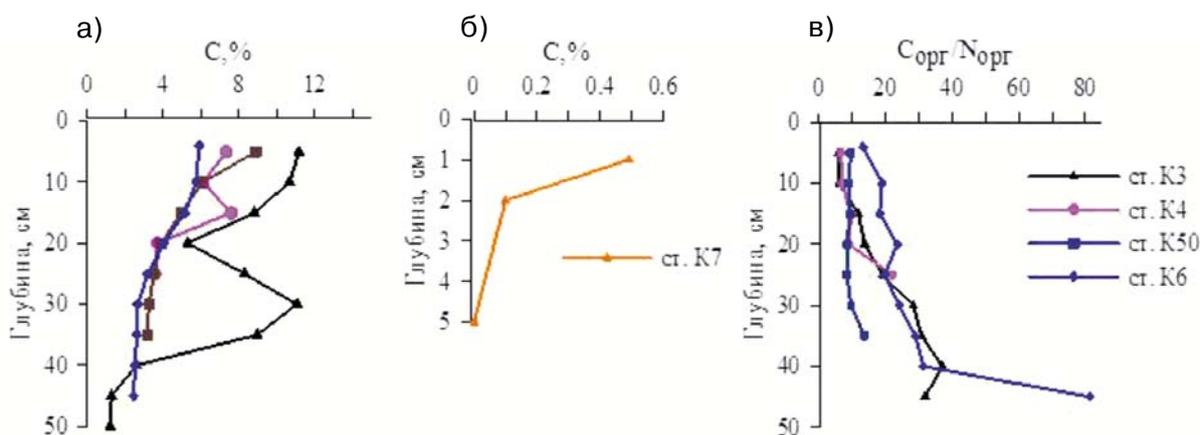


Рис. 4. Распределение $C_{\text{орг}}$ (а, б) и величины $C_{\text{орг}}/N_{\text{орг}}$ (в) в кернах донных отложений
 Fig. 4. Distribution of $C_{\text{орг}}$ (а, б) and $C_{\text{орг}}/N_{\text{орг}}$ (в) values in sediments cores

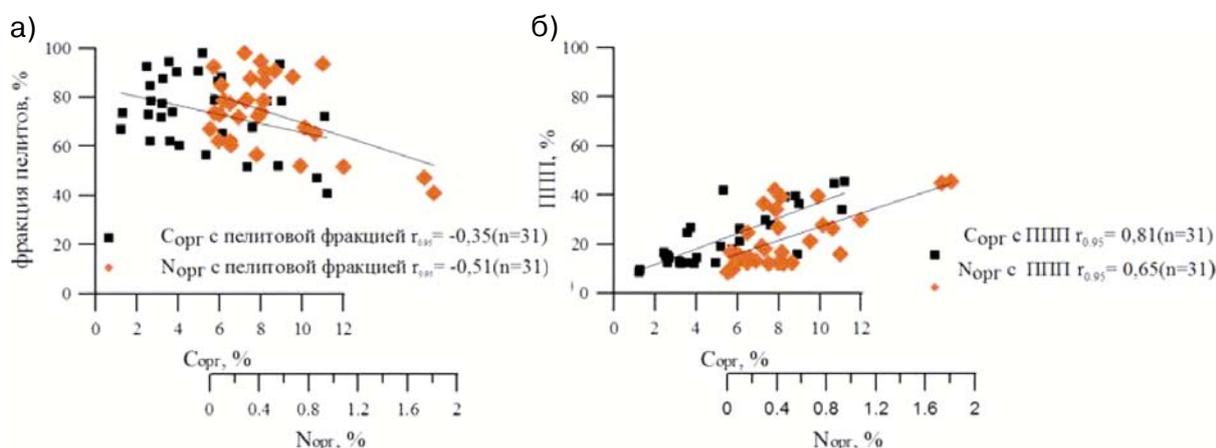


Рис. 5. Взаимосвязь пелитовой фракции и ППП (б) с $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{орг}}$
 Fig. 5. Relationship between pelitic fraction (а) and loss on ignition (б) with $C_{\text{орг}}$ and $N_{\text{орг}}$

На всех станциях количество Fe(II) распределяется по всей глубине колонок неравномерно – от 0,08 % на ст. К7 до 1,95 % на ст. К50 в середине керна. А с трехвалентным железом наблюдается совсем иная картина. Высокие концентрации Fe(III) отмечаются на разрезе К3–К6 в поверхностном слое 0–5 см – 4,32 и 7,22 % соответственно. Также выделяются две ст. К50 и К6 с повышенным содержанием Fe(III) по всему керну (табл. 3). Подобные средние значения Fe(II) в донных отложениях наблюдали с 2014 по 2016 гг. в озере Нижнее в Архангельской области – 1,15 % и Fe(III) – 2,15 % [Титова и др., 2019]. Концентрации железа в исследуемых кернах ДО практически не отличаются от значений валового железа в ДО Кондопожской губы, полученных ранее [Калинкина, Белкина, 2018].

Осадки ст. К7 отличаются от ДО поверхностного слоя на ст. К3–К6 по содержанию железа (табл. 3; рис. 6).

На рис. 7 представлены фото для сравнения содержания железа в слое 0–5 см на станции К6 (7,22 %) и в слое 0–2 см на ст. К7 (0,96 %).

Содержание Fe(III) составляет 7,22 % в поверхностном слое ДО и постепенно снижается к низу керна до 2,46 % на ст. К6, а на ст. К7 наблюдаем обратную картину – содержание железа минимальное и варьирует от 1,32 % на поверхности до 0,47 % на глубине 5 см.

Наличие взаимосвязи органического углерода с содержанием железа в донных осадках керна на глубоководной станции К6 представлено на рис. 8.

Можно предположить, что железо поступает в Кондопожскую губу с водами р. Суны как во взвешенной форме, так и в растворенной в виде комплексных соединений трехвалентного железа с гумусовыми веществами, а далее осаждается на дно.

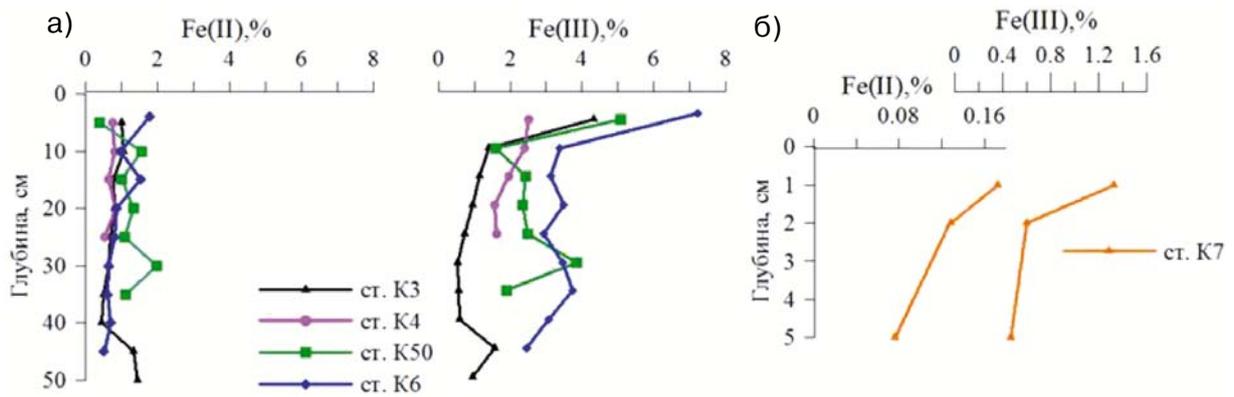


Рис. 6. Вертикальное распределение Fe(II) и Fe(III) на ст. К3–К6 (а) и на ст. К7 (б) в ядрах донных отложений озера

Fig. 6. Vertical distribution of Fe(II) and Fe(III) at st. K3–K6 (a) and at st. K7 (б) in cores of the lake sediments

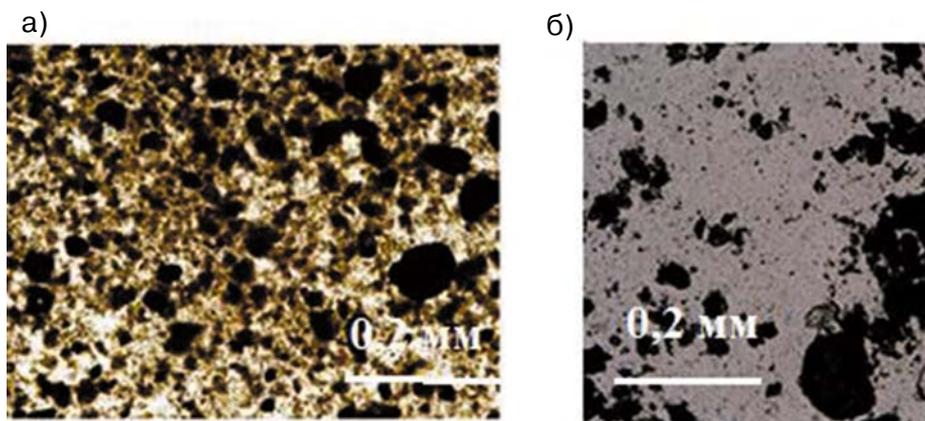


Рис. 7. Микрофотографии ДО на ст. К6 (а) и К7 (б)

Fig. 7. Microphotographs of the sediments at st. K6 (a) and K7 (б)

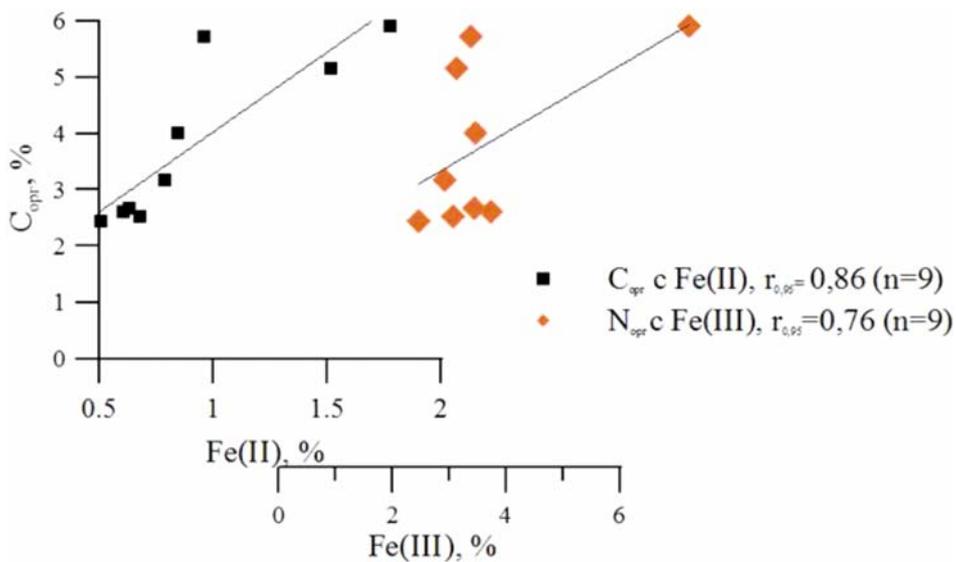


Рис. 8. Взаимосвязь органического углерода с Fe(II) и Fe(III) в ядре донных отложений ст. К6

Fig. 8. Relationship of organic carbon with Fe(II) and Fe(III) in the core of bottom sediments at st. K6

Заключение

Проведение многолетнего мониторинга в Кондопожской губе позволяет выявить процессы, влияющие на формирование состава донных отложений. Различия в процессах осадконакопления в вершинной части губы и на выходе определяются неравномерным распределением речного стока и антропогенной нагрузки. Значительный разброс концентраций ОВ при практически одинаковом составе ДО обуславливается различной седиментационной нагрузкой взвешенного вещества. В ходе проведенных исследований поверхностного слоя донных осадков распределение ППП, $C_{орг}$, $N_{орг}$ в Кондопожской губе свидетельствует о наличии убывающего градиента от ЦБК в сторону открытой части озера.

В заливе с высокой антропогенной нагрузкой в ДО превалирует аллохтонное органическое вещество над автохтонным. Установлено, что только на ст. К50 автохтонное органическое вещество ДО образуется в самом заливе.

Содержание органического вещества в донных отложениях связано с их гранулометрическим составом и содержанием железа. Выявлена корреляционная связь между этими показателями.

Литература

Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 35–41.

Васильева Е. П. Донные отложения. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Ред. З. С. Кауфмана. Л.: Наука, 1990. С. 147–175.

Калинкина Н. М., Белкина Н. А. Динамика состояния бентосных сообществ и химического состава донных отложений Онежского озера в условиях действия антропогенных и природных факторов // Принципы экологии. 2018. № 2. С. 56–74.

Логвиненко Н. В., Сергеева Э. И. Методы определения осадочных пород. Л.: Недра, 1986. 240 с.

МИ № 88-16365-010-2017 «Донные отложения водоемов. Определение гранулометрического состава ситовым и пипеточным методами». Введена 26.12.2017. Архангельск, 2017. 12 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука, 1973. 102 с.

Соколов В. С. Химический анализ морских осадков / Ред. В. С. Соколов. М.: Химия, 1980. С. 28–42.

Субетто Д. А., Белкина Н. А., Страховенко В. Д., Рыбалко А. Е., Зобков М. Б., Потахин М. С., Кулик Н. В., Ефременко Н. А., Лаврова Н. Б., Рязанцев П. А., Тарасов А. Ю., Филимонова Л. В., Шелехова Т. С., Шварев С. В., Алешин М. И., Беляев П. Ю., Бородулина Г. С., Здорвеннова Г. Э., Здорвеннов Р. Э.,

Ибрагимова А. Г., Карпечко Ю. В., Корост С. Р., Корост Д. В., Кузнецов В. Ю., Кухарев В. И., Левищев М. А., Малов В. И., Никонов А. А., Овдина Е. А., Орлов А. В., Рябинкин А. В., Слабунов А. И., Токарев М. Ю., Фролова Л. А., Гатальская Е. В., Кравченко И. Ю., Ханг Т. Палеолимнология Онежского озера; от приледникового озера к современным условиям / Ред. Д. А. Субетто. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 331 с.

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Современное состояние зоопланктона Кондопожского залива Онежского озера // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 3. С. 33–40. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_3_33

Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 74–82. doi: 10.7868/S032105961401012X

Титова К. В., Кокрятская Н. М., Вахрамеева Е. А. Мониторинговые исследования донных отложений антропогенно нагруженного озера Нижнее (Архангельская область) // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Мат-лы II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань, 2019. С. 189–194.

Шилов И. А. Экология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2011. 512 с.

Хатчинсон Д. Лимнология. Географические, физические и химические характеристики озер. М.: Прогресс, 1969. 591 с.

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // J. of Paleolimnol. 2001. Vol. 25. P. 101–110. doi: 10.1023/A:1008119611481

References

Belkina N. A. Role of sediments in the processes of transformation of organic matter and nutrients in lake ecosystems. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2011;4:35–41. (In Russ.)

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. of Paleolimnol.* 2001. Vol. 25. P. 101–110. doi: 10.1023/A:1008119611481

Hutchinson G. Limnology: Geographical, physical and chemical characteristics of lakes. Moscow: Progress; 1969. 591 p. (In Russ.)

Kalinkina N. M., Belkina N. A. Dynamics of benthic communities state and the sediment chemical composition in Lake Onega under the influence of anthropogenic and natural factors. *Printsipy ekologii = Principles of the Ecology*. 2018;2:56–74. (In Russ.)

Logvinenko N. V., Sergeeva E. I. Methods for determining sedimentary rocks. Leningrad: Nedra; 1986. 240 p. (In Russ.)

MI No. 88-16365-010-2017. Bottom sediments of water bodies. Determination of granulometric com-

position by sieve and pipetting methods. Accepted 26.12.2017. Arkhangel'sk; 2017. 12 p. (In Russ.)

Shilov I. A. Ecology: a university textbook. Moscow: Yurait; 2011. 512 p. (In Russ.)

Semenovich N. I. Bottom sediments of Lake Onega. Leningrad: Nauka; 1973. 102 p. (In Russ.)

Sokolov V. S. Chemical analysis of marine sediments. Moscow: Khimiya; 1980. P. 28–42. (In Russ.)

Subetto D. A., Belkina N. A., Strakhovenko V. D., Rybalko A. E., Zobkov M. B., Potakhin M. S., Kulik N. V., Efremenko N. A., Lavrova N. B., Ryazantsev P. A., Tarasov A. Yu., Filimonova L. V., Shelekhova T. S., Shvarev S. V., Aleshin M. I., Belyaev P. Yu., Borodulina G. S., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Ibragimova A. G., Karpechko Yu. V., Korost S. R., Korost D. V., Kuznetsov V. Yu., Kukharev V. I., Levichev M. A., Malov V. I., Nikonov A. A., Ovdina E. A., Orlov A. V., Ryabinkin A. V., Slabunov A. I., Tokarev M. Yu., Frolova L. A., Gatal'skaya E. V., Kravchenko I. Yu., Khang T. Palaeolimnology of Lake Onega: from a glacial lake to modern conditions. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2022. 331 p. (In Russ.)

Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. Current state of zooplankton in Kondopoga Bay of Lake Onego. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya = Aquatic Bioresources & Environment*. 2019;2(3):33–40. (In Russ.). doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_3_33

Timakova T. M., Kulikova T. P., Litvinova I. A., Polyakova T. N., Syarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. Changes in biocenoses of Kondopoga Bay, Lake Onego, under the effect of effluents from a pulp and paper mill. *Water Resources*. 2014;41(1):78–86. doi: 10.1134/S0097807814010126

Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Vakhrameeva E. A. Monitoring studies of bottom sediments of the anthropogenically loaded Lake Nizhneye (Arkhangel'sk Region). *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mat-ly II Mezhdunar. konf. (Kazan', 19–24 maya 2019 g.) = Lakes of Eurasia: Problems and ways to solve them. Proceed. II Int. conf. (Kazan, May 19–24, 2019)*. Kazan'; 2019. P. 189–194. (In Russ.)

Vasil'eva E. P. Bottom sediments. Ecosystem of Lake Onega and trends in its change. Leningrad: Nauka; 1990. P. 147–175. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 24.04.2024; принята к публикации / accepted: 30.08.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Вахрамеева Елена Анатольевна

научный сотрудник

e-mail: vakhr-elena@yandex.ru

Жибарева Татьяна Александровна

младший научный сотрудник

e-mail: ostrivok.vj_nt@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Vakhrameeva, Elena

Researcher

Zhibareva, Tatyana

Junior Researcher