

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 504.4.054

DOI: 10.15372/GIPR20220204

А.Ю. САНИН*, А.А. СТРОКОВ*, Т.С. КОШОВСКИЙ****

*Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6, Россия, eather86@mail.ru, aastrokov@mail.ru

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Россия, eather86@mail.ru, tkzv@ya.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА БЕРЕГА

Представлены результаты исследования, проведенного в прибрежной зоне Онежского озера. Изучено влияние береговых, в частности абразионных, процессов и впадающих рек на качество поверхностных вод озера. На восточном побережье озера в районе абразионных (ключевой участок «Андомская гора») и дельтовых (ключевой участок «Шальское Онего») берегов в октябре 2019 г. осуществлен отбор 47 проб воды (из поверхностного и придонного горизонтов), 26 проб донных отложений и 16 проб берегоформирующих отложений с дальнейшим определением концентрации металлов. Исследовалось содержание следующих металлов: железо (общее), марганец, алюминий, цинк, медь, никель, хром, свинец, кобальт и кадмий. Акцент был сделан на определении растворенной формы металлов в воде и подвижной формы в береговых и донных отложениях. Результаты показали, что концентрации металлов в природной среде озера в целом отражают гидрохимическую картину, характерную для этой территории, с превышением действующих нормативов ПДК до 20 раз в отношении Mn, Fe, Cu, Pb и Al. Полученный массив геохимических данных позволил провести корреляционный анализ влияния береговых процессов на качество прибрежных вод Онежского озера по содержанию металлов. Результаты показали наличие разных типов связи между содержанием металлов в донных отложениях и в воде (от «очень слабой» до «сильной»), которые являются статистически незначимыми. В районе Андомской горы — ключевого участка, расположенного на юго-восточном берегу, отмечается «сильная» (тесная) связь между содержанием Al, Cu и Pb в донных осадках и воде.

Ключевые слова: качество воды, абразия, твердый сток рек, тяжелые металлы, корреляция.

A.Yu. SANIN*, A.A. STROKOV*, T.S. KOSHOVSKII****

*Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, 119034, Moscow, Kropotkinskii per., 6, Russia, eather86@mail.ru, aastrokov@mail.ru

**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, eather86@mail.ru, tkzv@ya.ru

THE DISTRIBUTION OF METALS IN THE COASTAL ZONE OF LAKE ONEGA DEPENDING ON THE SHORE TYPE

This article presents the results of a study conducted in the coastal zone of Lake Onega. The research is devoted to studying the influence of coastal (abrasion in particular) processes and inflowing rivers on the quality of surface waters of the lake. In October 2019, 47 samples of water (from the surface and bottom horizons), 26 samples of bottom sediments and 16 samples of shore-forming sediments with further determination of metal concentrations were taken on the eastern coasts of the lake in the area of the abrasive (Andoma Mountain key area) and delta (Shal'skoe Onego key area) coasts. The content of the following metals was studied: iron (total), manganese, aluminum, zinc, copper, nickel, chromium, lead, cobalt and cadmium. The emphasis in this study is placed on the determination of the dissolved form of metals in water and the mobile form in coastal and bottom sediments. The results showed that the concentrations of metals in the natural environment of the lake as a whole reflect

the hydrochemical picture characteristic of this territory with an excess of the current standards of the quality of water up to 20 times for Mn, Fe, Cu, Pb and Al. The collected array of geochemical data made it possible to conduct a correlation analysis of the influence of coastal processes on the quality of coastal waters of Lake Onega in terms of metal content. The results showed the presence of different types of relationships between the content of metals in bottom sediments and water (from “very weak” to “strong”), which are statistically insignificant. In the area of the Andoma Mountain, the key area, there is a «strong» (close) relationship between the Al, Cu and Pb contents in bottom sediments and in water.

Keywords: water quality, abrasion, solid river flow, heavy metals, correlation.

ВВЕДЕНИЕ

Онежское озеро (Верхне-Свирское водохранилище) используется для питьевого и промышленного водоснабжения, в целях гидроэнергетики, водного транспорта, рекреации и добычи гидробиологических ресурсов [1]. Качество воды формируется под комплексным воздействием природных и техногенных факторов, характеризуется сезонными и многолетними колебаниями. Изучению влияния источников поступления химических веществ в озеро посвящен ряд работ сотрудников Карельского научного центра РАН [2–8].

В работах [1, 4] отмечается доминирующая роль речного стока, который обеспечивает около 60 % притока воды и 50–70 % поступления веществ в озеро. Однако важную роль играют и абразионные процессы. Природные и техногенные процессы, характерные для берегов Онежского озера, в литературе освещены сравнительно слабо. Основные результаты приведены в работах [4, 9–14].

Наибольшая длина волн, свойственных Онежскому озеру, достигает 20–22 м, но чаще не превышает 10 м [15]. Воздействие волн на дно ощущается до глубин, соответствующих половине их длины [10]. Положение нижней границы береговой зоны на этих глубинах подтверждается и различиями в донных отложениях на глубинах выше и ниже 5 м, зафиксированными в ходе полевых исследований. Как правило, крупно- и среднезернистые пески сменяются мелкозернистыми, заиленными песками или илами. Следовательно, наибольшее влияние абразионные процессы на качество вод озера должны оказывать на небольших глубинах, в прибрежной зоне.

Существенным образом на распределение загрязняющих веществ в пределах озера влияют течения. Их скорости максимальны для верхнего слоя воды и составляют в среднем 5 см/с, но в некоторых случаях достигают 12–15 см/с. На горизонтах 40–50 м они снижаются до 2–3 см/с [4, 13]. Сформировалось хорошо выраженное круговое течение, направленное против часовой стрелки [5, 13]. Это типичное плотностное течение, его скорость в среднем составляет 0,15 м/с [13]. Наличие данного течения обеспечивает поступление загрязняющих веществ в результате абразии и с твердым стоком рек, в том числе и на участки, смежные с теми, на которых происходит абразия и в пределах которых впадают реки.

Цель исследования — изучение влияния динамических процессов, происходящих на берегах Онежского озера, на содержание 10 тяжелых металлов в воде.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе исследования лежит морфогенетическая классификация берегов Онежского озера. Выделены семь типов берегов: первичные (слабоизмененные или неизмененные), абразионные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные, дельтовые, лагунные и антропогенные [10]. Для каждого из них характерны свои особенности динамических процессов, в частности разная интенсивность абразии и размыва берегов, а также аккумуляции материала, поступающего в береговую зону.

Для оценки воздействия береговых процессов на качество воды Онежского озера по содержанию металлов в 2018–2019 гг. авторами проводились исследования на трех ключевых участках озера: на восточном побережье, в районе Андомской горы (2018 и 2019 гг.) (участок «Андомская гора»); на западном побережье, в Пухтинской бухте (2018 г.); в районе устья крупного притока Онежского озера — р. Водлы (участок «Шальское Онего» (2019 г.)). Данные участки представляют собой абразионный, абразионно-аккумулятивный и дельтовый типы берега соответственно. В целом интенсивность абразионных процессов, по [10] и согласно нашим наблюдениям, на ключевых участках небольшая и редко превышает десятки сантиметров в год. Итоги исследований 2018 г. приведены в работе [14]. В настоящей статье основное внимание уделено результатам, полученным в 2019 году.

Из всего многообразия химических соединений, формирующих качество природной среды, авторы остановились на следующих тяжелых металлах (ТМ): железо (общее) (Fe), марганец (Mn), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), хром (Cr), свинец (Pb), кобальт (Co) и кадмий (Cd). Также анализировалось содержание алюминия (Al).

В литературе [1, 4, 16] железо и медь рассматриваются как приоритетные гидрохимические показатели для Онежского озера. Концентрации этих металлов в воде часто превышают действующие нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) для водных объектов хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного использования.

Для оценки поступления ТМ по фондовым и литературным материалам [8, 10, 14] проанализирован состав пород четвертичных отложений, размываемых притоками и водами озера, учтены особенности миграции ТМ.

На территории ключевых участков Онежского озера в октябре 2019 г. проводился отбор проб воды, донных и берегоформирующих отложений в семи створах. Отдельно рассмотрена р. Волда, в которой были отобраны пробы воды и донных отложений в четырех точках. Всего было отобрано 28 проб воды из поверхностных горизонтов, 19 — из придонных, взято 26 образцов донных отложений и 16 берегоформирующих.

Количественный химический анализ проб воды на содержание ТМ проводился в эколого-геохимическом научно-образовательном центре Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Пробы анализировались с применением метода атомно-абсорбционной спектроскопии с пламенной и электротермической атомизацией по методике [17]. Важно отметить, что при анализе содержания металлов в грунтах отдельно рассматривались их подвижные формы, которые могут переходить в воду, оказывая влияние на ее качество [18].

Полученный массив гидро- и геохимических данных по природной среде Онежского озера был использован для оценки влияния динамических процессов, имеющих место на рассматриваемых участках Онежского озера, на качество его вод по содержанию металлов. Для этого проведен корреляционный анализ с использованием стандартного набора статистических операций по расчету коэффициентов корреляции Пирсона (r) и Спирмена (R) с помощью программы STATISTICA v. 7.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка поступления ТМ в воду Онежского озера проводилась с учетом геолого-минералогического состава горных пород, которыми сложены берега озера и водосборные бассейны рек, впадающих в него, и минералогического состава четвертичных отложений, распространенных в Прионежье. Их мощность колеблется от метров до десятков метров [4, 10]. В районе Андомской горы берег Онежского озера сложен глинистыми породами на глубинах от 1,5 м, перекрытых мореной и галечным пляжем (до 0,5 м) [14, 19].

На интенсивность поступления ТМ и алюминия из природных источников влияют три фактора: их содержание в породах, слагающих берега и водосборные бассейны рек; их способность к миграции; интенсивность процессов речной эрозии и абразии берегов. Изученные ТМ характеризуются различной подвижностью. Минимальная подвижность свойственна Al и Fe, средняя — Zn, высокая — Cu, Pb, Mn, Ni, Co.

В период с 22 по 24 октября 2019 г. на территории исследования проведен отбор проб компонентов природной среды озера. Результаты количественного химического анализа проб поверхностной и придонной воды Онежского озера представлены в табл. 1 и 2. Одновременно с пробами воды отбирали пробы донных и берегоформирующих отложений. В табл. 3 приведены результаты определения подвижной формы ТМ в донных отложениях, в табл. 4 — в берегоформирующих.

Результаты корреляционного анализа, направленного на выявление связи между динамическими процессами на берегах Онежского озера и качеством его вод по содержанию металлов, представлены в табл. 5. Анализ проведен для шести металлов из 10, поскольку концентрации остальных на момент исследования находились ниже предела обнаружения. При оценке качества воды по содержанию металлов акцент сделан на сравнении с действующими нормативами ПДК как основного механизма, определяющего водопользование.

В поверхностном слое воды озера в районе Андомской горы нарушения хозяйственно-питьевых нормативов (ПДК_{хп}) отмечены в отношении Pb (в 2,2 раза) и Al (в 1,1 раза). Несоответствие рыбохозяйственным нормативам (ПДК_{рх}) наблюдается для Fe (до 2,7 ПДК_{рх}), Mn (до 4,9), Pb (до 3,6), Al (5,3), Cu (до 11,1 ПДК_{рх}). Остальные металлы имеют широкую вариабельность концентраций, которые при этом не превышают ПДК. В придонном слое воды выделяется Pb, концентрация которого 1,1–1,2 ПДК_{хп} и 1,8–1,9 ПДК_{рх}. Превышение ПДК_{рх} отмечено в отношении Mn (в 2,7–5,2 раза) и Cu (в 6,7–8,3 раза).

Таблица 1
Концентрации металлов в воде Онежского озера в районе Андомской горы (октябрь 2019 г.), мкг/л

Створ	Местоположение створа	Вертикаль	Глубина, м	Горизонт	Металл									
					Mn	Fe	Cu	Ni	Zn	Pb	Al	Cr	Co	Cd
1	Восточная окраина Андомского мыса	1 (урез)	0,3	Пов.	111,1	227,1	14,1	1,4	9,0	35,3	103,9	9,0	<2,0	<0,12
		2 (ЗВВ)	3,5	Пов.	83,4	107,5	8,7	0,8	5,1	31,4	3,4	9,3	<2,0	<0,12
		3 (вне ЗВВ)	6,5	Дно	93,9	126,4	9,1	1,2	<1	14,8	26,2	14,5	<2,0	<0,12
2	100 м к востоку от Андомского мыса	1 (урез)	0,3	Пов.	<0,3	100,3	8,3	1,2	<1	16,1	<1,5	45,4	<2,0	<0,12
		2 (ЗВВ)	3,5	Дно	<0,3	89,8	6,3	1,3	<1	11,0	9,8	11,8	<2,0	<0,12
3	200 м к востоку от Андомского мыса	1 (урез)	0,3	Пов.	<0,3	186,3	8,0	<0,6	<1	22,9	43,7	10,3	<2,0	<0,12
		2 (ЗВВ)	3,5	Пов.	<0,3	97,9	6,1	1,5	<1	12,3	<1,5	2,3	<2,0	<0,12
		3 (вне ЗВВ)	7,8	Дно	<0,3	72,3	5,2	1,0	2,1	5,7	11,4	1,0	<2,0	<0,12
4	300 м к востоку от Андомского мыса	1 (урез)	0,3	Пов.	<0,3	77,6	6,5	<0,6	<1	8,6	<1,5	0,4	<2,0	<0,12
		2 (ЗВВ)	3,5	Дно	<0,3	85,3	5,7	1,6	<1	7,2	6,3	0,4	<2,0	<0,12
		3 (вне ЗВВ)	7,8	Пов.	<0,3	579,1	10,0	2,2	<1	11,0	669,1	0,1	<2,0	<0,12
4	300 м к востоку от Андомского мыса	1 (урез)	0,3	Пов.	<0,3	76,9	7,8	0,7	5,6	6,7	<1,5	<0,1	<2,0	<0,12
		2 (ЗВВ)	3,3	Дно	<0,3	81,7	9,8	1,0	<1	11,8	64,0	<0,1	<2,0	<0,12
		3 (вне ЗВВ)	7	Пов.	<0,3	53,7	5,8	0,7	<1	7,7	<1,5	<0,1	<2,0	<0,12
4	300 м к востоку от Андомского мыса	1 (урез)	0,3	Дно	<0,3	85,3	8,4	2,8	<1	19,5	<1,5	0,8	<2,0	<0,12
		2 (ЗВВ)	3,3	Пов.	<0,3	93,5	12,2	1,4	<1	17,6	23,7	<0,1	<2,0	<0,12
		3 (вне ЗВВ)	7	Дно	112,9	130,4	8,1	2,3	6,1	14,5	9,5	<0,1	<2,0	<0,12
4	300 м к востоку от Андомского мыса	1 (урез)	0,3	Дно	112,9	97,6	9,0	0,6	<1	11,3	6,7	<0,1	<2,0	<0,12
		3 (вне ЗВВ)	7	Пов.	132,1	109,7	12,0	1,1	<1	7,7	4,1	<0,1	<2,0	<0,12
4				Дно	106,9	95,5	6,3	1,9	<1	8,6	3,4	<0,1	<2,0	<0,12

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: ЗВВ — зона волнового воздействия; пов. — поверхностный слой воды. Здесь и в табл. 2–4: знак «<» означает, что концентрация элемента находится ниже предела обнаружения.

Таблица 2

Концентрации металлов в воде Онежского озера в районе устья р. Водлы (октябрь 2019 г.), мкг/л

Ключевой участок	Створ	Местоположение створа	Вертикаль	Глубина, м	Горизонт	Металл									
						Mn	Fe	Cu	Ni	Zn	Pb	Al	Cr	Co	Cd
Шальское Онего	1	Район устья р. Водлы	1 (урез)	0,3	Пов.	132,8	1354,9	8,2	1,1	<1	13,8	475,2	<0,1	<2,0	<0,12
			2 (ЗВВ)	0,5	Пов.	162,2	1571,9	10,1	0,9	<1	9,3	613,3	0,3	<2,0	<0,12
	2	500 м к юго-востоку от устья р. Водлы	1 (урез)	0,3	Пов.	153,7	643,7	32,6	2,6	3,5	13,3	141,7	1,0	<2,0	<0,12
			2 (ЗВВ)	0,5	Пов.	132,1	1072,1	21,7	2,7	8,4	12,0	73,5	0,5	<2,0	<0,12
	3	900 м к юго-востоку от устья р. Водлы	1 (урез)	0,3	Пов.	130,8	202,1	29,5	1,0	9,5	8,1	166,5	0,1	<2,0	<0,12
			2 (ЗВВ)	0,5	Пов.	162,4	200,8	9,4	0,6	<1	13,5	202,8	<0,1	<2,0	<0,12
4	1,4 км к юго-востоку от устья р. Водлы	1 (урез)	0,3	Пов.	145,8	98,9	11,4	0,9	<1	11,5	380,4	0,6	<2,0	<0,12	
		2 (ЗВВ)	0,5	Пов.	151,1	68,0	10,5	<0,6	5,1	17,0	302,3	<0,1	<2,0	<0,12	
Река Водла	1	Устье реки	1 (урез)	0,3	Пов.	145,8	218,1	15,3	0,8	5,5	7,0	152,9	<0,1	<2,0	<0,12
			2 (ЗВВ)	0,5	Дно	145,8	218,1	15,3	0,8	5,5	7,0	152,9	<0,1	<2,0	<0,12
	2	1,5 км выше устья	1 (урез)	0,3	Пов.	154,5	176,4	10,5	0,6	<1	11,7	351,9	0,3	<2,0	<0,12
			2 (ЗВВ)	0,5	Дно	144,7	59,7	8,3	0,8	2,8	6,3	79,8	<0,1	<2,0	<0,12
3	3 км выше устья	1 (урез)	0,3	Пов.	129,7	1039,0	8,7	1,0	13,2	19,8	279,2	<0,1	<2,0	<0,12	
		2 (ЗВВ)	0,5	Дно	155,1	2010,2	10,0	0,9	<1	11,2	172,9	<0,1	<2,0	<0,12	
4	Автомарожный мост, г. Пудож	1 (урез)	6,4	Пов.	134,8	1577,4	11,8	1,1	<1	13,1	387,9	<0,1	<2,0	<0,12	
		2 (ЗВВ)	0,5	Дно	142,8	1028,1	6,4	1,8	2,0	10,3	400,0	<0,1	<2,0	<0,12	

Таблица 3

Концентрация металлов в подвижной форме в донных отложениях Онежского озера и р. Волде (октябрь 2019 г.), мг/кг

Ключевой участок	Створ	Вертикаль	Металлы										
			Mn	Fe	Cu	Ni	Zn	Pb	Al	Cr	Co	Cd	
Андомская гора	1	1 (урез)	37,91	12,18	2,95	<0,04	<0,025	1,31	1,25	<0,005	<0,02	<0,0012	
		2 (ЗВВ)	93,01	56,38	0,12	<0,04	<0,025	0,32	0,61	<0,005	<0,02	<0,0012	
		3 (вне ЗВВ)	50,38	20,14	<0,01	<0,04	0,17	0,41	1,12	<0,005	<0,02	<0,0012	
	2	1 (урез)	46,57	1,38	1,06	<0,04	<0,025	0,28	1,33	<0,005	<0,02	<0,0012	
		2 (ЗВВ)	44,12	18,17	<0,01	<0,04	<0,025	<0,02	1,05	<0,005	<0,02	<0,0012	
		3 (вне ЗВВ)	28,39	28,33	<0,01	<0,04	<0,025	0,33	0,28	<0,005	<0,02	<0,0012	
	3	1 (урез)	91,01	37,11	<0,01	<0,04	0,43	0,02	3,14	<0,005	<0,02	<0,0012	
		3 (вне ЗВВ)	30,67	3,39	1,13	<0,04	<0,025	<0,02	0,81	<0,005	<0,02	<0,0012	
	4	1 (урез)	82,13	61,82	1,52	<0,04	0,21	<0,02	2,14	<0,005	<0,02	0,0012	
		2 (ЗВВ)	66,12	59,81	0,95	<0,04	0,13	<0,02	0,43	<0,005	<0,02	<0,0012	
	Шальское Онего	1	1 (урез)	28,39	16,17	<0,01	<0,04	<0,025	<0,02	1,05	<0,005	<0,02	<0,0012
			2 (ЗВВ)	33,16	6,36	<0,01	<0,04	<0,025	0,11	1,11	<0,005	<0,02	<0,0012
3 (вне ЗВВ)			11,25	24,87	<0,01	<0,04	<0,025	<0,02	1,16	<0,005	<0,02	<0,0012	
2		1 (урез)	13,87	32,12	<0,01	<0,04	<0,025	1,02	0,4	<0,005	<0,02	<0,0012	
		2 (ЗВВ)	16,19	30,01	0,57	<0,04	<0,025	<0,02	0,72	<0,005	<0,02	<0,0012	
		3 (вне ЗВВ)	17,33	20,17	<0,01	<0,04	<0,025	<0,02	1,82	<0,005	<0,02	<0,0012	
3	1 (урез)	13,14	38,17	0,76	<0,04	0,68	0,02	1,13	<0,005	<0,02	<0,0012		
	2 (ЗВВ)	8,91	5,37	<0,01	<0,04	<0,025	<0,02	1,24	<0,005	<0,02	<0,0012		
	3 (вне ЗВВ)	3,45	7,04	<0,01	<0,04	<0,025	<0,02	1,09	<0,005	<0,02	<0,0012		
4	1 (урез)	11,02	1,98	<0,01	<0,04	<0,025	1,05	1,64	<0,005	<0,02	<0,0012		
	2 (ЗВВ)	6,47	17,06	1,12	<0,04	<0,025	<0,02	1,38	<0,005	<0,02	<0,0012		
	3 (вне ЗВВ)	6,97	8,12	0,96	<0,04	<0,025	<0,02	1,12	<0,005	<0,02	<0,0012		
Река Волда	1	Стрежень	21,05	39,77	<0,01	<0,04	<0,025	0,21	2,04	<0,005	<0,02	<0,0012	
	2	Стрежень	34,08	31,81	<0,01	<0,04	<0,025	1,01	1,14	<0,005	<0,02	<0,0012	
	3	Стрежень	62,66	56,33	<0,01	<0,04	<0,025	0,94	1,64	<0,005	<0,02	<0,0012	
	4	Левый берег	59,78	41,84	<0,01	<0,04	0,21	2,48	1,83	<0,005	<0,02	<0,0012	

Таблица 4
Концентрация металлов в подвижной форме в берегоформирующих отложениях Онежского озера и р. Водле (октябрь 2019 г.), мг/кг

Ключевой участок	Створ	Вертикаль	Металл									
			Mn	Fe	Cu	Ni	Zn	Pb	Al	Cr	Co	Cd
Андомская гора	1	1 (склон)	66,31	46,13	2,38	<0,04	2,12	3,01	2,01	<0,005	<0,02	<0,0012
		2 (пляж)	29,18	10,58	1,6	<0,04	0,37	1,02	0,57	<0,005	<0,02	<0,0012
	2	1 (склон)	52,01	74,08	5,63	<0,04	1,05	2,12	3,05	<0,005	<0,02	<0,0012
Шальское Онего	3	2 (пляж)	44,13	36,91	0,81	<0,04	0,67	1,01	1,26	<0,005	<0,02	<0,0012
		1 (склон)	50,02	17,13	3,07	<0,04	2,71	1,58	3,07	<0,005	<0,02	<0,0012
	4	2 (пляж)	38,61	11,06	1,68	<0,04	0,42	0,06	1,77	<0,005	<0,02	<0,0012
Шальское Онего	1	1 (склон)	54,95	36,91	7,66	<0,04	3,56	3,11	3,16	<0,005	<0,02	<0,0012
		2 (пляж)	13,16	20,12	1,57	<0,04	0,38	2,15	0,89	<0,005	<0,02	<0,0012
	2	1 (склон)	22,11	36,14	1,38	<0,04	0,26	4,02	0,58	<0,005	<0,02	<0,0012
Шальское Онего	2	2 (пляж)	11,33	47,09	0,85	<0,04	0,22	1,54	0,62	<0,005	<0,02	<0,0012
		1 (склон)	10,2	20,12	1,66	<0,04	0,56	0,47	0,11	<0,005	<0,02	<0,0012
	3	2 (пляж)	0,28	52,11	1,92	<0,04	0,41	0,54	0,24	<0,005	<0,02	<0,0012
Шальское Онего	3	1 (склон)	12,07	29,87	1,85	<0,04	0,61	0,78	0,21	<0,005	<0,02	<0,0012
		2 (пляж)	0,09	9,88	0,85	<0,04	0,22	0,38	0,13	<0,005	<0,02	<0,0012
	4	1 (склон)	2,16	20,08	1,03	<0,04	0,34	0,54	0,21	<0,005	<0,02	<0,0012
Шальское Онего	2	1 (склон)	18,65	56,22	1,66	<0,04	0,12	0,63	0,31	<0,005	<0,02	<0,0012

Таблица 5
Результаты корреляционного анализа, направленного на выявление связи между динамическими процессами на берегах Онежского озера и качеством его вод по содержанию металлов (пара «дно-вода»)

Ключевой участок	Статистика	Переменная	Объем выборки	Критическое значение коэффициента корреляции для указанного объема выборки при $p < 0,05$	Металл					
					Al	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Андомская гора	Коэффициент корреляции Пирсона r	Дно-вода (пов.)	7	0,7545	0,82	0,80	-0,16	-0,10	0,84	-0,39
		Дно-вода (придон.)	7	0,7545	0,79	0,35	0,06	0,61	-0,29	
	Коэффициент корреляции Спирмена R	Дно-вода (пов.)	7	0,7545	0,68	0,34	-0,02	0,22	0,50	-0,21
		Дно-вода (придон.)	7	0,7545	0,68	0,09	0,43	-0,12	0,24	-0,34
Шальское Онего	Коэффициент корреляции Пирсона r	Дно-вода (пов.)	8	0,7067	0,44	0,18	-0,02	-0,03	-0,01	0,65
		Дно-вода (придон.)	8	0,7067	-0,36	-0,26	-0,10	0,21	-0,16	-0,30
	Коэффициент корреляции Спирмена R	Дно-вода (пов.)	8	0,7067	0,13	0,45	0,22	-0,03	-0,34	0,22
		Дно-вода (придон.)	8	0,7067	-0,50	-0,41	0,00	0,02	-0,03	-0,08

Примечание. Пов. — поверхностный слой воды, придон. — придонный. Цветом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции (при $p < 0,05$).

В поверхностном слое воды озера в месте впадения р. Водлы отмечаются нарушения ПДК по тем же металлам, что и в районе Андомской горы. Отличие только в кратности превышения ПДК. Концентрации Mn достигают 1,5 ПДК_{хп} и 15,2 ПДК_{рх}; Fe — 5 ПДК_{хп} и 15 ПДК_{рх}; Cu — 20,4 ПДК_{рх}; Pb — 1,4 ПДК_{хп} и 2,3 ПДК_{рх}; Al — 2,2 ПДК_{хп} и 10,8 ПДК_{рх}. Для придонного слоя воды характерны следующие концентрации металлов: Mn — 1,4 ПДК_{хп} и 14,4 ПДК_{рх}; Fe — 3,8 ПДК_{хп} и 11,5 ПДК_{рх}; Cu — 13,8 ПДК_{рх}; Pb — 1,1 ПДК_{хп} и 1,9 ПДК_{рх}; Al — 1,6 ПДК_{хп} и 8,1 ПДК_{рх}.

Отобранные донные отложения в районе Андомской горы представлены преимущественно пылеватым песком (10–50 мкм). В некоторых пробах есть включения глинистой фракции (1–5 мкм). Донные осадки озера на участке впадения р. Водлы представлены мелко- или среднезернистым песком (50–1000 мкм).

Высокие концентрации подвижной формы ТМ в донных отложениях характерны для Fe и Mn. В районе Андомской горы содержание Fe находится в диапазоне 18–45 мг/кг, Mn — 37–68 мг/кг. Концентрации Cu и Al не превышают 2 мг/кг, Zn и Pb — 1 мг/кг. На участке впадения р. Водлы содержание Fe 14–22 мг/кг, Mn — 10–17 мг/кг. Концентрации Ni, Cr, Co и Cd на территории ключевых участков меньше предела обнаружения.

Распределение ТМ на вертикалях следующее. Суммарная концентрация рассматриваемых ТМ в донных отложениях озера в районе Андомской горы в 2–3 раза больше, чем в месте впадения р. Водлы. На андомском берегу концентрации металлов больше (114 мг/кг), чем за его пределами (55 мг/кг). На шальском берегу различия в концентрациях металлов не так очевидны.

Гранулометрический состав берегоформирующих отложений в районе Андомского мыса характеризуется пылеватым песком с включениями глины, на участке впадения р. Водлы — песком разной степени зернистости. Для береговых отложений озера также характерны высокие концентрации Fe и Mn. В районе Андомской горы концентрация Fe находится в пределах 20–44 мг/кг, Mn — 31–56 мг/кг. В месте впадения р. Водлы содержание Fe достигает 41 мг/кг, Mn — 12 мг/кг. Суммарная концентрация ТМ на склоне к востоку от Андомской горы составила 112 мг/кг, на пляже — 55 мг/кг. В районе устья р. Водлы концентрация ТМ варьирует от 42 мг/кг (склон) до 52 мг/кг (пляж).

Особый интерес представляет сопоставление концентраций ТМ и алюминия в разных средах. Содержание железа в береговых и донных отложениях различается слабо. Валовое содержание его в районе Андомской горы (2,2 %) несколько больше, чем в районе устья р. Водлы (1,2 %). Содержание подвижных форм железа практически одинаково. Напротив, концентрации железа в водах различаются очень существенно: на участке «Андомская гора» оно в среднем составляет 850 мкг/л, на участке «Шальское Онего» — 153 мкг/л.

Рассмотренные элементы характеризуются относительно высокой подвижностью в изучаемых условиях. Так, анализ подвижных форм свинца в береговых и донных отложениях указывает на закономерность уменьшения концентрации при движении от берега к озеру. Значимое влияние речных вод на поступление растворенного железа в воды Онежского озера подтверждается при анализе его концентрации на различном удалении от устья р. Водлы. На шальском берегу наблюдается закономерное уменьшение концентрации железа при удалении от устья р. Водлы. На расстоянии 1,4 км от устья концентрация железа в воде становится близкой к концентрации в районе Андомской горы. Содержание железа в воде практически не зависит от близости отобранной пробы к донным отложениям или берегу.

Результаты проведенного корреляционного анализа показали наличие разных типов связи между содержанием ТМ в донных отложениях и воде (от «очень слабой» до «сильной»), которые являются статистически незначимыми. Стоит выделить район андомского берега, где отмечается «сильная» (тесная) связь (значение коэффициента корреляции не менее 0,7) между содержанием Al, Cu и Pb в донных осадках и воде (см. табл. 5). Этот факт с высокой долей вероятности указывает на поступление данных металлов из донных отложений в придонный и поверхностный слой воды.

Оценка потенциального влияния береговых процессов на содержание ТМ и Al в донных осадках озера показала разные виды связи (от очень слабой до средней), однако статистически они незначимы. Таким образом, по результатам проведенных наблюдений не подтвердилось влияние береговых процессов на степень загрязненности донных отложений.

В целом гидрохимическая картина на ключевых участках Онежского озера по содержанию ТМ и Al характерна для данной геохимической провинции [16]. В силу этих особенностей использовать общероссийские величины ПДК по таким элементам, как железо и марганец, для вод гумидной зоны не имеет смысла, так как их естественные концентрации зачастую превышают установленные ПДК.

Озерная вода в районе андомского берега характеризуется низким и средним уровнем загрязненности (кратности превышения ПДК находятся в диапазоне от 1 до 10), в месте впадения р. Водлы — средним и высоким (кратности превышения ПДК находятся в диапазоне от 10 до 50), согласно литературным данным [20, 21]. Отмечается заметное влияние р. Водлы на гидрохимический режим Онежского озера в данном районе на момент обследования. При удалении от берега концентрации ТМ и АІ имеют тенденцию к уменьшению, что может быть связано со снижением влияния источника их поступления на конкретных участках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концентрации тяжелых металлов (Mn, Fe, Cu, Zn, Pb) и алюминия (Al) в воде на момент обследования превышали действующие хозяйственно-питьевые и рыбохозяйственные нормативы предельно допустимых концентраций до 20 раз.

Проведен корреляционный анализ влияния абразии и размыва берегов на качество прибрежных вод Онежского озера по содержанию металлов посредством поступления влекомых наносов и дальнейшего их осаждения на дно озера. Достоверные результаты были получены для района Андомской горы: корреляция отмечена в отношении Al, Cu и Pb. На участке «Шальское Онего» полученные результаты можно рассматривать как одно из подтверждений ведущей роли твердого стока рек (в частности, р. Водлы), обеспечивающего поступление большей части загрязняющих веществ в озеро, но для более надежного подтверждения данной закономерности необходимы аналогичные исследования на других участках берега.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта «Оценка воздействия береговых процессов на экологическое состояние Онежского озера» (18–35–00545 мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крупнейшие** озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Гл. ред. Н.Н. Филатов. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2015. — 375 с.
2. **Белкина Н.А.** Количественный и качественный состав органического вещества и его трансформация в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Труды Карел. науч. центра РАН. Сер. Лимнология. — 2017. — № 3. — С. 64–72.
3. **Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сабылина А.В., Рыжаков А.В.** Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2019. — № 3. — С. 62–72.
4. **Онежское озеро:** Атлас / Отв. ред. Н.Н. Филатов. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2010. — 151 с.
5. **Онежское озеро:** Экологические проблемы / Под ред. Н.Н. Филатова. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 1999. — 293 с.
6. **Сабылина А.В., Лозовик П.А., Зобков М.Б.** Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. — 2010. — Т. 37, № 6. — С. 717–729.
7. **Тимакова Т.М., Сабылина А.В., Полякова Т.Н., Сярки М.Т., Теканова Е.В., Чекрыжева Т.А.** Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденции ее изменения за последние десятилетия // Труды Карел. науч. центра РАН. — 2011. — № 4. — С. 42–49.
8. **Филатов Н.Н., Исаев А.В., Савчук О.П.** Оценка состояния и прогнозирование изменений гидрологического режима и экосистем крупных озер // Труды Карел. науч. центра РАН. Сер. Лимнология. — 2019. — № 3. — С. 99–113.
9. **Забраилов А.Ю.** Ветроволновой режим и условия плавания на Ладожском и Онежском озерах — М.: Транспорт, 1966. — 83 с.
10. **Игнатов Е.И., Борщенко Е.В., Загоскин А.Л., Землянов И.В., Санин А.Ю., Терский П.Н., Фатхи М.О.** Связь геологического строения побережья, истории развития рельефа и динамики берегов Онежского озера // Труды Карел. науч. центра РАН. Сер. Лимнология. — Петрозаводск, 2017. — № 3. — С. 65–78.
11. **Молчанов И.В., Былинкина В.Н., Викулина З.А., Горшунова Т.А.** Онежское озеро. — Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1946. — 207 с.
12. **Субетго Д.А.** Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. — СПб.: Изд-во Рос. пед. ун-та, 2009. — 343 с.

13. **Охлопкова А.Н.** Течения Онежского озера // Динамика водных масс Онежского озера. — Л.: Наука, 1972. — С. 74–113.
14. **Санин А.Ю., Строков А.А., Терский П.Н.** Оценка влияния природных процессов на содержание тяжелых металлов в воде Онежского озера // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2020. — № 65 (1). — С. 146–171.
15. **Забраилов А.Ю.** Ветроволновой режим и условия плавания на Ладожском и Онежском озерах. — М.: Транспорт, 1966. — 83 с.
16. **Качество** поверхностных вод Российской Федерации: Ежегодник. 2018 / Гл. ред. М.М. Трофимчук. — Ростов: Изд-во «НОК», 2019. — 561 с.
17. **ПНД Ф 14.1:2:4.139–98.** Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций железа, кобальта, марганца, меди, никеля, серебра, хрома и цинка в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектроскопии [Электронный ресурс]. — <https://docsplan.ru/Data2/1/4293832/4293832535.htm> (дата обращения 20.02.2021).
18. **Воробьева Л.А.** Теория и практика химического анализа почв. — М.: ГЕОС, 2006. — 400 с.
19. **Воскресенский И.С., Каревская И.А., Игнатов Е.И.** Новые данные по геологическому разрезу «Андомская гора» в Прионежье // Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2015. — С. 398–401.
20. **РД 52.24.643–2002.** Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. — СПб.: Гидрометеоздат, 2002. — 21 с.
21. **Нормативы** качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектах рыбохозяйственного значения. Утв. приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/420389120?marker=6540IN> (дата обращения 20.02.2021).

Поступила в редакцию 16.08.2021

После доработки 27.10.2021

Принята к публикации 29.12.2021