

Оценка влияния природных процессов на содержание тяжелых металлов в воде Онежского озера*

А. Ю. Санин¹, А. А. Строков¹, П. Н. Терский²

¹ Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (ГОИН),
Российская Федерация, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

Для цитирования: Санин, А. Ю., Строков, А. А., Терский, П. Н. (2020). Оценка влияния природных процессов на содержание тяжелых металлов в воде Онежского озера. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (1), 146–171.

<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.108>

В статье приведены результаты исследований, проведенных в 2014–2015 и 2018 гг. на акватории и берегах Онежского озера, и посвященных изучению природных и антропогенных факторов, влияющих на качество вод разных районов озера. Среди природных факторов следует выделить доминирующую роль речного стока, который обеспечивает 50–70% поступления химических веществ в озеро. Однако в районах с отсутствием крупных притоков особую роль начинают играть процессы абразии или размыва берегов. По итогам работ 2014–2015 гг. осуществлена морфогенетическая типизация берегов, выделены семь их типов: слабоизмененные, абразионные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные, дельтовые, лагунные и антропогенные. Сделаны первые попытки провести корреляционный анализ влияния поступления тяжелых металлов с береговыми процессами на качество вод озера. В районе абразионных (Андомская гора) и абразионно-аккумулятивных (Пухтинская бухта) берегов Онежского озера в октябре 2018 г. проведены геоэкологические исследования, включающие отбор проб воды (24 пробы), донных (17 проб) и береговых (12 проб) отложений с дальнейшим определением содержания Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Co, Cd. В воде определялась растворенная форма, в грунте — подвижная. Концентрации металлов в целом отражают химический состав воды озера в осенний период года с превышением действующих нормативов до 10 раз в отношении Mn, Fe, Cu, Zn, Pb и Al. По итогам химического анализа проведен корреляционный анализ влияния абразии и размыва берегов на качество прибрежных вод Онежского озера. Результаты показали отсутствие влияния со стороны донных осадков озера в прибрежной зоне на содержание тяжелых металлов, кроме Al. Для него отмечена статистически значимая связь с коэффициентом корреляции не менее 0,7.

Ключевые слова: Онежское озеро, качество вод, загрязняющие вещества, типы берегов, абразия, аккумуляция, вдольбереговой поток, течения, тяжелые металлы, корреляция.

* Исследование проведено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-35-00545 мол_а.

1. Введение и постановка проблемы

Онежское озеро — важнейший источник питьевой воды для трех регионов северо-запада России (Республики Карелия, Ленинградской и Вологодской областей). Мониторинг его экологического состояния, включая качество поверхностных вод по приоритетным загрязняющим веществам, крайне важен и актуален сегодня.

Под загрязняющим веществом в настоящей работе понимается вещество в воде, вызывающее нарушение норм качества воды (согласно ГОСТ 17.1.1.01-77 «Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения»).

Качество озерных вод складывается под действием сложного комплекса природных и антропогенных факторов. Состав поверхностных вод бассейна Онежского озера зависит от климатических, геоморфологических, почвенно-геологических условий и растительного покрова (Трофимчук, 2017). Почвы региона характеризуются хорошей промытостью от легкорастворимых соединений (сульфатов и хлоридов), поэтому их накопление в речных и озерных водах происходит в малой степени, а органических веществ — в значительной степени. Водные объекты бассейна озера отличаются повышенным содержанием окрашенных органических веществ и железа.

Стоит отметить, что химический состав вод Онежского озера характеризуется сезонными и многолетними колебаниями, которые связаны с изменением фаз водного режима (весеннее половодье, летне-осенние дождевые паводки, зимняя межень) и водностью отдельных лет.

Химический состав воды озера и его притоков складывается под влиянием не только природных, но и антропогенных факторов. Многие работы показывают, что Онежское озеро по интенсивности антропогенной нагрузки четко разделяется на несколько районов (Кауфман, 1990; Филатов и др., 2010; Трофимчук, 2017). Наиболее освоенным является северо-западное побережье озера, где расположены три крупных промышленных центра — Петрозаводск, Кондопога и Медвежьегорск. Наибольшему загрязнению подлежат Кондопожская, Петрозаводская губа и Большая губа Повенецкого залива. Центральная часть озера (Центральное, Большое, Малое Онего, центральная часть Повенецкого залива) отличается высоким качеством вод.

Основными источниками поступления химических веществ в акваторию Онежского озера являются:

- антропогенные источники — выбросы промышленных предприятий, сброс сточных вод (сосредоточенных (точечных) и рассредоточенных (диффузных)) и т. д.;
- горные породы в пределах водосборных бассейнов рек, впадающих в озеро;
- донные отложения — поступление веществ вследствие процессов перемешивания водных масс в зоне контакта с донными осадками, имеющими различный гранулометрический и химический состав.

Факторами поступления химических веществ в озеро могут служить:

- поступление с твердым стоком рек;
- процессы абразии и размыва берегов озера;

- вдольбереговой поток наносов, обусловленный системой течений;
- поступление с подземными водами;
- трансграничный перенос из зарубежных стран вследствие преобладания ветров западного направления (атмосферные выпадения).

Среди факторов поступления следует выделить доминирующую роль речного стока (реки Водла, Шуя и Суна), который обеспечивает около 60 % притока воды и 50–70 % поступления веществ в озеро (Филатов и др., 2015). Стоит также отметить, что за последние два десятилетия увеличился вынос химических веществ с реками юго-западного побережья озера, что связано с организацией городских санкционированных и несанкционированных свалок на водосборах рек, новых садовых кооперативов, увеличением добычи строительного камня, сведением лесов на водосборах (Сабылина и Ефремова, 2017). Однако в районах с отсутствием крупных притоков ключевую роль начинают играть процессы абразии или размыва берегов.

Онежское озеро может служить примером для исследования поступления химических веществ за счет действия одного из природных факторов (процессы абразии и размыва берегов) и воздействия этого фактора на качество вод любого крупного внутреннего водоема.

Цель настоящего исследования — изучение влияния природных факторов поступления химических веществ, в частности абразионных процессов на берегах, на качество вод Онежского озера по содержанию 10 тяжелых металлов (ТМ).

Для достижения поставленной цели определены и решены следующие задачи:

- поиск и выбор ключевых участков озера и химических показателей загрязнения для проведения исследования;
- геоэкологическое опробование береговой зоны и прилегающей акватории озера, включающее отбор проб поверхностной и придонной воды, донных и береговых отложений;
- камеральная обработка результатов количественного химического анализа (КХА) содержания ТМ в природной среде озера;
- геохимическое исследование, посвященное анализу геологических карт района, минералогического состава пород, способности элементов к миграции в окружающей среде;
- корреляционный анализ влияния абразии берегов на качество воды в прибрежной зоне озера.

2. Методика исследования и фактический материал

По итогам работ 2014–2015 гг., проводимых сотрудниками ФГБУ «ГОИН» на Онежском озере, была осуществлена морфогенетическая типизация берегов озера и выделены семь их типов: слабоизмененные, абразионные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные, дельтовые, лагунные и антропогенные (рис. 1) (Игнатов и др., 2017). Наибольшие объемы поступления веществ в результате процессов абразии или размыва берегов характерны для абразионных и абразионно-аккумулятивных берегов.

Для осуществления исследования еще в 2014 г. были выбраны ключевые участки, представляющие различные типы берега, на различных этапах исследования

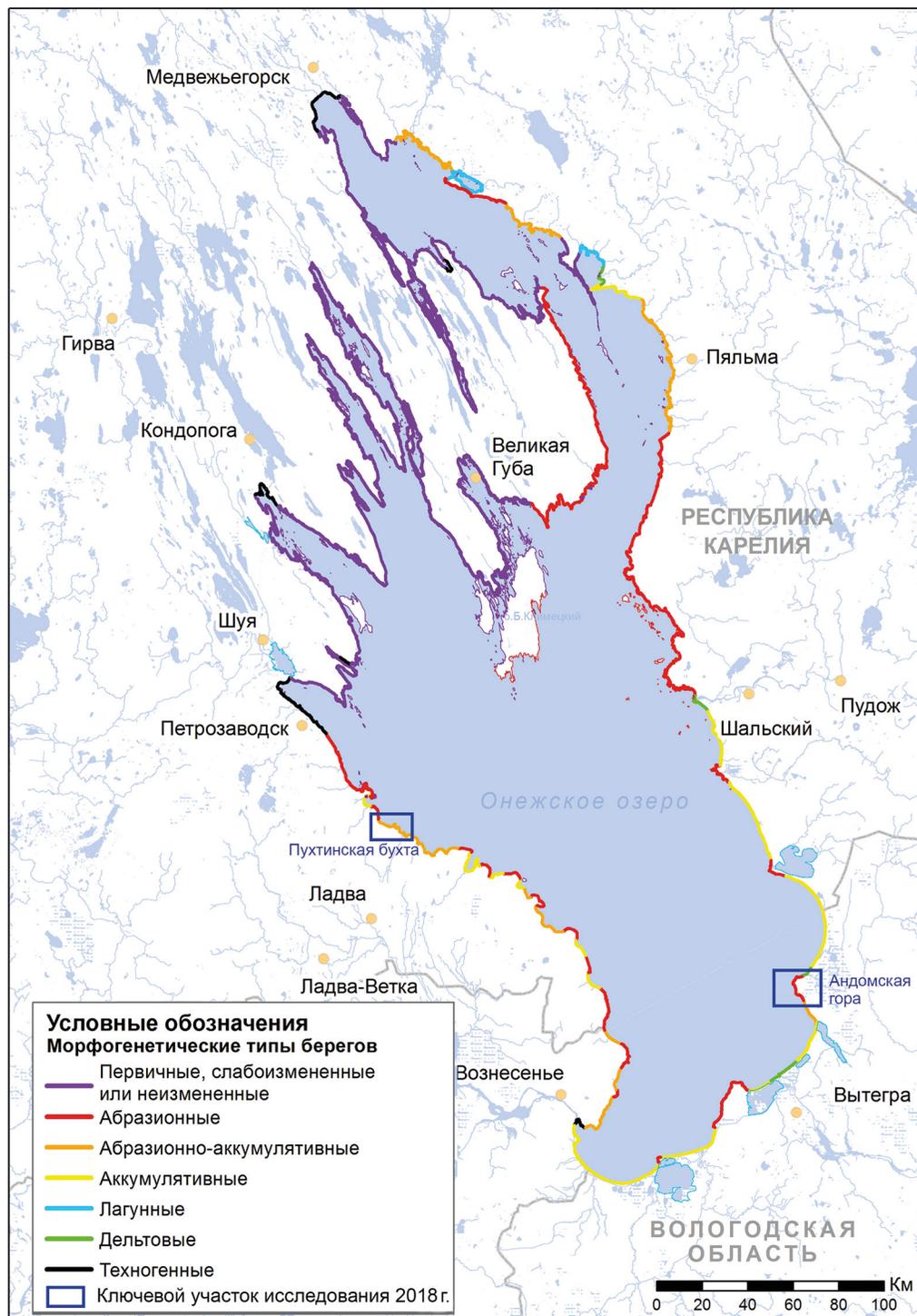


Рис. 1. Морфогенетические типы берегов Онежского озера и ключевые участки исследования (Игнатов и др., 2017)

их было от 12 до 21 и более, в зависимости от решаемых задач. Они представляют все части Прионежья — Южное, Западное, Восточное и Северное. На ключевых участках изучалось дно и берег с помощью георадиолокационной съемки, осуществлялась надводная (с судна и берега) и подводная фотосъемка, были взяты образцы поверхностных вод, береговых и донных отложений с целью определения концентраций органических веществ и ТМ. Были изучены имеющиеся фондовые и опубликованные данные (Биске, 1959; Богданов и др., 1999), в том числе и по близлежащим скважинам. Это позволило определить примерную мощность четвертичных отложений и структуру их чехла. В ходе работ применены методы математического моделирования, что позволило изучить вдольбереговые потоки наносов и динамику подводного берегового склона.

Все вышеперечисленные виды исследований позволили осуществить первичную оценку влияния береговых процессов на качество вод Онежского озера по ряду компонентов.

Основываясь на работах 2014–2015 гг., в 2018 г. авторами определены два ключевых участка Онежского озера в районе Андомской горы (д. Гневашевская, Вытегорский район Вологодской области) и Пухтинской бухты (СНТ «Сосновый Бор», Прионежский район Республики Карелия), которые представляют абразионный и абразионно-аккумулятивный типы берега соответственно (см. рис. 1).

Первый участок расположен на восточном побережье озера и характеризуется наиболее высокой интенсивностью абразионных процессов по сравнению с другими районами озера. Другая его особенность — значительная (до 20–30 м и более) высота берегового уступа, что обеспечивает ему высокую эстетическую ценность и, следовательно, рекреационную привлекательность. Второй участок расположен на западном побережье озера и в настоящее время активно используется для рекреационных целей, в частности для загородного отдыха жителей Петрозаводска.

В будущем возможна активизация рекреационного использования данных участков и строительство на них объектов рекреационной инфраструктуры, что, безусловно, должно происходить с учетом природных процессов.

На выделенных ключевых участках в октябре 2018 г. осуществлен отбор проб воды, донных и береговых отложений (табл. 1) в трех створах (рис. 2 и 3). На каждом створе выделены 3 вертикали, характеризующие вероятность потенциального волнового воздействия: урез воды (глубины 0–0,1 м), зона волнового воздействия (ЗВВ) (глубины до 5 м), вне ЗВВ (глубины более 5 м).

Таблица 1. Параметры массива данных геоэкологического опробования природной среды Онежского озера в 2018 г.

Ключевой участок	Количество отобранных проб, шт.			
	воды		донных отложений	береговых отложений
	поверхностной	придонной		
Андомская гора	9	0	8	6
Пухтинская бухта	9	6	9	6
Итого	18	6	17	12

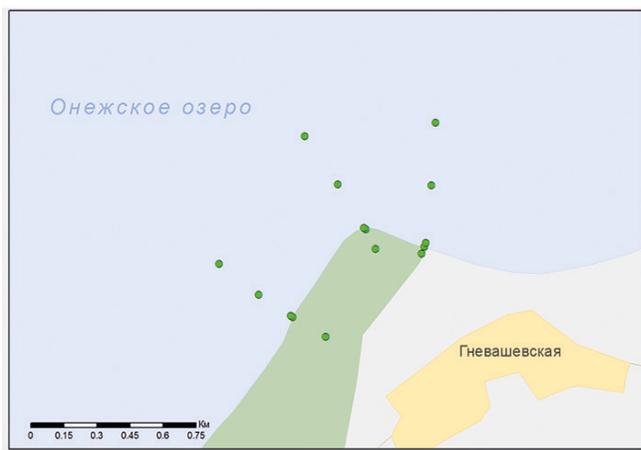


Рис. 2. Схема геозкологического опробования природной среды Онежского озера в районе Андомской горы (фото А. А. Строчкова)

По литературным данным (Забраилов, 1966), для Онежского озера характерны волны длиной до 20–22 м и иногда даже более. В случае постоянного повторения волн такой длины их воздействие на дно должно ощущаться до глубин, соответствующих половине их длины (Зенкович, 1962). Однако такие волны встречаются на Онежском озере достаточно редко и главным образом на открытой воде далеко от берега. Наблюдения показывают, что чаще всего высота воздействующих на береговую зону волн не превышает 1–1,2 м, длина таких волн не превышает 10 м (Забраилов, 1966), а нижняя глубина их воздействие на дно — 5 м. Положение нижней границы береговой зоны на этих глубинах подтверждает и полученные в ходе полевых исследований данные по донным отложениям — на этой глубине крупно- и среднезернистые пески сменяются мелкозернистыми, заиленными песками или илами, которые, как правило, накапливаются лишь за пределами активного волнового воздействия.

В районе Пухтинской бухты отбор проб воды производился из поверхностного и придонного слоев. В районе Андомской горы ввиду штормовых условий и перемешивания воды по всей толще пробы были отобраны только из поверхностного слоя.

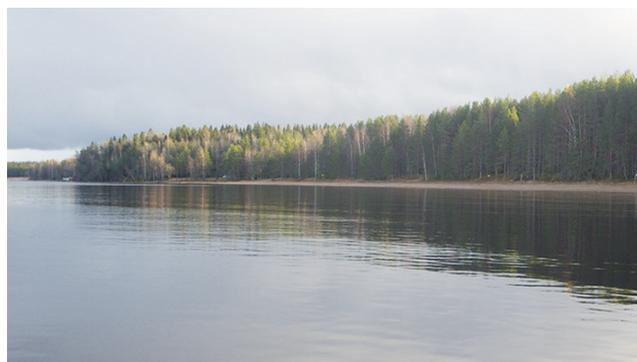
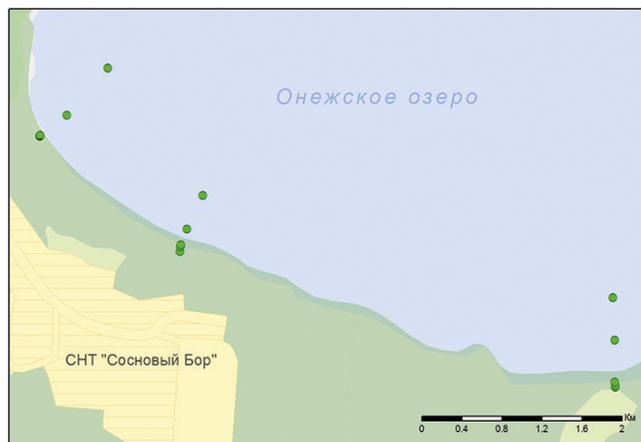


Рис. 3. Схема геоэкологического опробования природной среды Онежского озера в районе Пухтинской бухты (фото А. А. Строкова)

В качестве приоритетных показателей загрязнения природной среды Онежского озера в ходе исследования были выбраны 10 металлов, имеющих двойной генезис или природное происхождение (Строков и др., 2018):

- металлы двойного генезиса — железо общее ($Fe_{\text{общ}}$), марганец (Mn), алюминий (Al), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), хром (Cr), свинец (Pb);
- металлы природного происхождения — кобальт (Co), кадмий (Cd).

Металлы, имеющие двойной генезис, могут поступать в акваторию озера как по естественным причинам, так и в результате антропогенного воздействия.

Следует отметить, что Fe и Cu являются характерными и приоритетными показателями для Онежского озера на протяжении ряда лет и относятся к загрязняющим веществам, т. е. вызывают нарушение норм качества воды озера (Трофимчук, 2017; Строков и др., 2018). Их концентрации в воде часто превышают действующие нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) для водных объектов хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного использования.

Отбор проб поверхностных вод осуществлялся в 10-миллилитровые пробирки из подповерхностного слоя вручную с консервацией проб азотной кислотой,

придонных вод — с использованием глубинного батометра. Отбор проб донных отложений осуществлялся при помощи металлического цилиндрического дночерпателя с дальнейшим извлечением грунта из части пробы, не находившейся в контакте со стенками пробоотборника. Отбор проб береговых (пляжевых) отложений осуществлялся вручную пластмассовым совком методом конверта. Пробы грунтов отбирались в плотно закупориваемые пластмассовые баночки. Измерение глубины в местах отбора проб проводилось с использованием эхолота LOWRANCE HDS-8.

КХА проб на содержание ТМ проводился в эколого-геохимическом научно-образовательном центре географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Пробы воды анализировались с применением метода атомно-абсорбционной спектроскопии с пламенной и электротермической атомизацией по методике ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 «Методика измерения массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектроскопии». Пробы были отфильтрованы через фильтр «синяя лента», подкислены концентрированной азотной кислотой до рН около 2 (1 мл кислоты на 1 л пробы). Для анализа использованы атомно-абсорбционные спектрометры novAA-400, Analytik-Jena AG (Германия) и AA-240Z, Varian Inc. (США).

Пробы донных и береговых отложений анализировались с применением метода рентгенофлуоресцентного анализа на приборе «Спектрон МАКС = GV» по ПНД Ф 16.1.42-04 (издание 2010 г.) «Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа». При анализе содержания ТМ в грунтах рассматривались их подвижные формы, которые могут переходить в водную среду, оказывая непосредственное влияние на качество воды озера. Подвижная форма ТМ извлекалась с помощью ацетатно-аммонийного буферного раствора с рН 4,8 (ААБ) при соотношении грунт:раствор 1:10. Определение подвижной формы ТМ проводилось согласно методике, изложенной в работе (Воробьева, 2006). В коническую колбу вместимостью 100–150 мл брали навеску грунта, измельченного до размера частиц менее 1 мм массой 5 г, взятой с точностью до 0,01 г. Мерным цилиндром к навеске грунта приливали 50 мл ААБ. Колбу закрывали пластмассовой резиновой пробкой. Время взаимодействия грунта с раствором составил 1 час при постоянном взбалтывании. После этого суспензию фильтровали через сухой фильтр (белая лента) в сухую емкость. В полученной вытяжке определяли концентрации ТМ.

Гранулометрический состав проб донных и береговых отложений определялся на основании ГОСТ 8.777-2011 «Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения ISO 13320:2009». Для проведения гранулометрического анализа образец растирали резиновым пестиком и просеивали через сито 1 мм. Для разрушения связей между элементарными частицами образец увлажняли до состояния пасты добавлением 4% раствора пиррофосфорнокислого натрия. Пасту на пиррофосфате в фарфоровой чашке или ступке растирали без особого нажима в течение 10 минут пестиком с резиновым наконечником. Гранулометрический состав определяли на лазерном анализаторе размеров частиц «Анализетте-22», модель MicroTec plus фирмы Fritsch, предназначенного для анализа размеров частиц порошков в блоке сухого диспергирования

либо порошков или суспензий в блоке диспергирования в жидкости в диапазоне от 0,08 до 2000 мкм.

Для оценки поступления ТМ по имеющимся фондовым материалам, см. (Биске, 1959; Кауфман, 1990; Богданов и др., 1999; Филатов и др., 2010) и др., был проанализирован состав пород четвертичных отложений, размываемых притоками и водами озера. Учтены особенности миграции ТМ.

Для оценки влияния береговых процессов на качество вод Онежского озера проведен корреляционный анализ с использованием стандартного набора статистических операций по расчету коэффициентов корреляции Пирсона (r) и Спирмена (R) программы STATISTICA v. 7.0.

3. Результаты исследований

3.1. Теоретические основы для анализа полученных результатов

Для оценки потенциального поступления химических веществ в озеро важно иметь представление о геолого-минералогическом составе горных пород, слагающих берега озера, и впадающих в него рек, а также о степени подвижности химических элементов. Для исследуемых ключевых участков Онежского озера следует обратить внимание на минералогический состав четвертичных отложений, поскольку выходы кристаллических пород на дневную поверхность свойственны лишь незначительной части водосборного бассейна Онежского озера (Филатов и др., 2010).

В Прионежье практически повсеместно распространены четвертичные отложения, лишь изредка встречаются выходы дочетвертичных пород. Их мощность, как правило, составляет десятки метров, реже — метры (Игнатов и др., 2017).

В районе Андомской горы берег сложен глинистыми породами на глубинах от 1,5 м и ниже, перекрытых мореной (глубины 0,5–1,0 м) и галечным пляжем (до 0,5 м) (Воскресенский и др., 2015) (рис. 4).

В районе Пухтинской бухты берег сложен протерозойскими песчаниками (глубина более 4 м), перекрытыми флювиогляциальными (глубины залегания 1,5–4 м) и озерно-ледниковыми (глубины залегания до 0–1 м) отложениями. Верхний слой представлен современными пляжевыми отложениями (рис. 5).

Валуны морены, характерной для Прионежья, представлены туфосланцами, диабазами, гранитами, кварцитами, гранодиоритами, амфиболитами (Биске, 1959).

В свою очередь, для большинства типов изверженных горных пород известны содержания химических элементов. В табл. 2 представлено среднее содержание исследуемых ТМ в главных типах изверженных пород. Довольно высокое естественное содержание характерно для Al и Fe в породах (1n %), а также Cr и Mn (0,1n %) по сравнению с остальными металлами.

Еще одним важным критерием поступления ТМ в воду озера служит степень их подвижности или миграции. В табл. 3 представлены коэффициенты водной миграции для некоторых исследуемых ТМ в подземных водах зоны гипергенеза. Для Mn, Ni, Cu и Zn характерна средняя степень миграции ($K_x = 0,1-1$), для Al, Cr и Fe — слабая ($K_x < 0,1$).

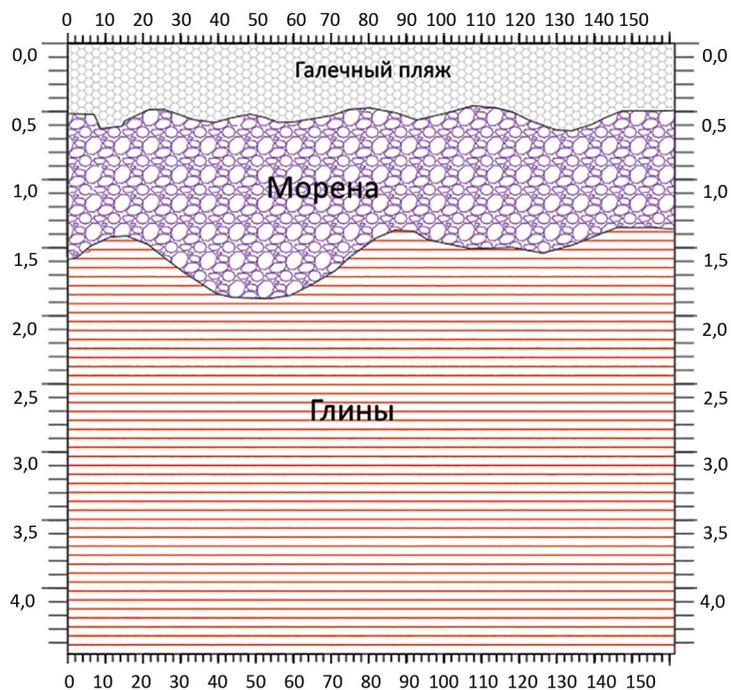


Рис. 4. Георадиолокационный профиль берега в районе Андомской горы

Таблица 2. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород (Перельман, 1989)

Химический элемент	По А. П. Виноградову				По А. А. Беусу	
	Ультраосновные породы (дуниты и др.)	Основные породы (базальты и др.)	Средние породы (диориты, андезиты)	Кислые породы (граниты, грано-диориты и др.)	Граниты	Грано-диориты
Al	0,45 (2,40)	8,76 (8,50)	8,85 (8,90)	7,70	7,40	8,60
Cr	0,20 (0,16)	0,02 (0,017)	0,005 (0,0055)	0,0025	0,001	0,0022
Mn	0,15 (0,10)	0,20 (0,12)	0,12	0,06	0,04	0,07
Fe	9,85 (8,70)	8,56 (8,40)	5,85 (5,50)	2,70	1,83	3,30
Co	0,02 (0,015)	0,0045 (0,0048)	0,001 (0,0009)	0,0005	0,0001	0,0007
Ni	0,2	0,016 (0,013)	0,0055 (0,0050)	0,0008	0,00045	0,0015
Cu	0,002 (0,001)	0,01 (0,0087)	0,0035 (0,0040)	0,002	0,001	0,0026
Zn	0,003 (0,005)	0,013 (0,0105)	0,0072 (0,0075)	0,006	0,0039	0,0056
Cd	0,00005 (0,00001)	0,000019 (0,000022)	– (0,000018)	0,00001	0,000013	0,000016
Pb	0,00001 (0,00010)	0,0008 (0,0006)	0,0015 (0,0012)	0,002	0,0019	0,0015

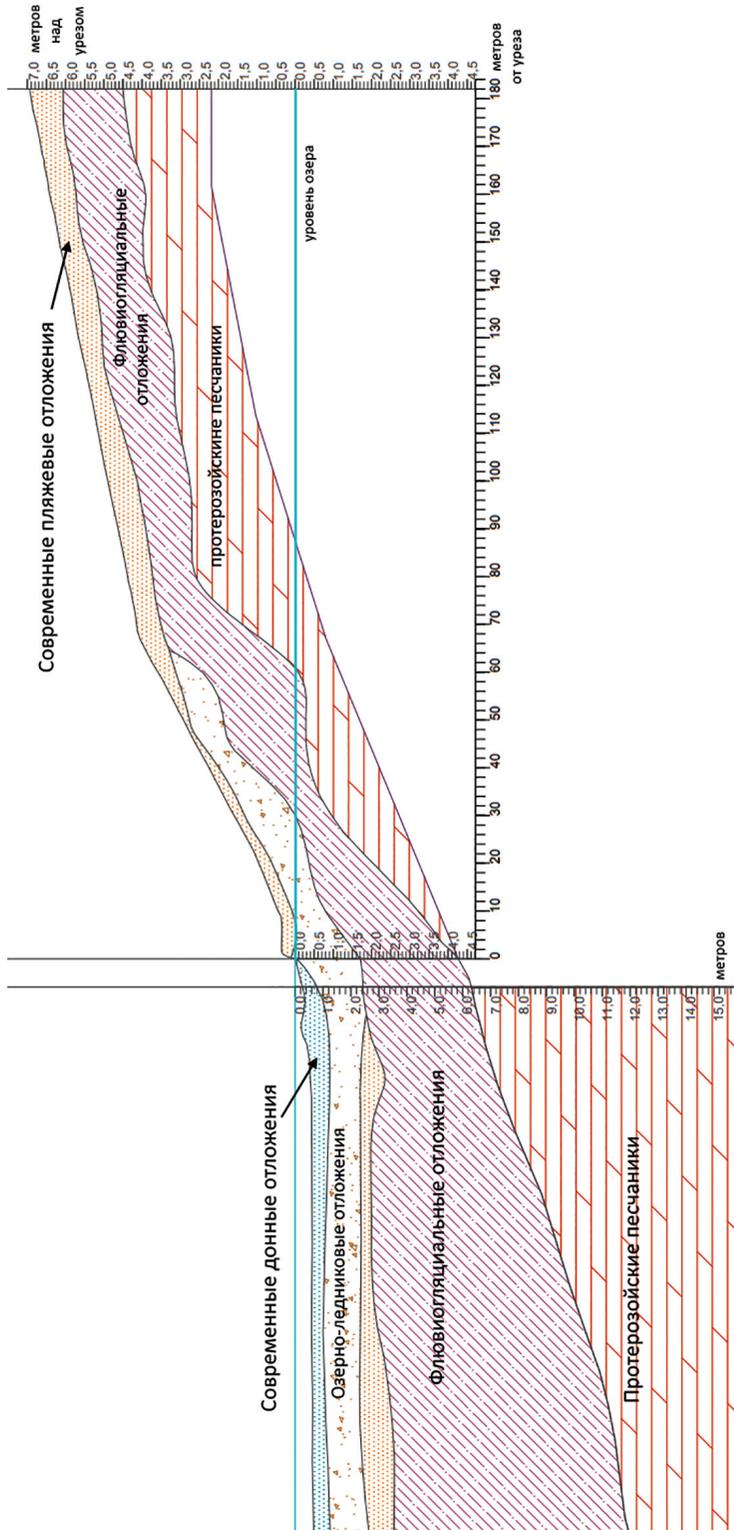


Рис. 5. Фрагмент георадарного профиля надводной и подводной частей берегового склона в районе Пухтинской бухты

Таблица 3. Характеристики водной миграции химических элементов в подземных водах зоны гипергенеза (Перельман, 1989) с дополнением

Элемент	Содержание элементов в водах по С. Л. Шварцеву, г/л	Содержание элементов в земной коре (по А. П. Виноградову), %	Коэффициент водной миграции, Кх	Степень миграции
Al	2,79*10 ⁻⁴	8,05	0,008	слабая
Cr	2,9*10 ⁻⁶	8,3*10 ⁻³	0,08	слабая
Mn	4,94*10 ⁻⁵	0,1	0,11	средняя
Fe	5,47*10 ⁻⁴	4,65	0,02	слабая
Ni	3,31*10 ⁻⁶	5,8*10 ⁻³	0,13	средняя
Cu	5,58*10 ⁻⁶	4,7*10 ⁻³	0,27	средняя
Zn	3,4*10 ⁻⁵	8,3*10 ⁻³	0,94	средняя

Миграционная способность ТМ очень низка и зависит в том числе от кислотности окружающей среды (Никаноров, 2008). В табл. 4 приведены группировки рассматриваемых ТМ по подвижности в зависимости от кислотности среды.

Таблица 4. Относительная подвижность элементов при миграции в окружающей среде (Никаноров, 2008)

Относительная подвижность	Окружающая среда			
	Окислительная	Кислая	Нейтральная до щелочной	Восстановительная
Высокая	Zn	Zn, Cu, Co, Ni	-	-
Средняя	Cu, Co, Ni, Cd	Cd	Cd	-
Низкая	Pb	Pb, Fe, Mn	Pb, Fe, Mn	Fe, Mn
Очень низкая	Fe, Mn, Al	Al, Cr	Al, Cr, Zn, Cu, Co, Ni	Al, Cr, Zn, Co, Cu, Ni, Pb

Значительная часть ТМ находится в сорбированном взвешенными веществами состоянии и подвергается седиментации без существенной трансформации их состава (Никаноров и др., 2013). Таким образом, ТМ накапливаются на дне и могут вызывать потенциальное загрязнение воды при определенных физико-химических условиях (вторичное загрязнение).

3.2. Результаты полевых исследований в 2018 г.

В октябре 2018 г. в районе выделенных ключевых участков Онежского озера проведен отбор проб компонентов природной среды озера. Кислотность среды (рН) на момент отбора проб находилась в диапазоне 7,5–7,7 в районе Андомской горы, 7,5–8,0 — в районе Пухтинской бухты. Температура воды составила +8,7 °С в районе Андомской горы и +7,7 °С — в районе Пухтинской бухты.

Результаты КХА проб поверхностной и придонной воды приведены в табл. 5. Сравнение с нормативами ПДК — в табл. 6 и 7.

Таблица 5. Концентрации ТМ в поверхностном и придонном слое воды Онежского озера в октябре 2018 г.

Ключевой участок	Створ	Место-положение створа	Вертикаль	Глубина, м	Горизонт	Концентрация, мкг/л									
						Mn	Fe	Cu	Ni	Zn	Pb	Al	Cr	Co	Cd
Андомская гора	№ 1	100 м к В от Андомского мыса	1 (урез)	0,1	пов	19,15	282,76	19,09	<0,6	43,67	10,94	243,18	<0,1	<0,7	<0,05
			2 (ЗВВ)	3,4	пов	16,19	135,86	13,07	<0,6	46,46	5,03	279,53	<0,1	<0,7	<0,05
			3 (вне ЗВВ)	6,3	пов	21,73	96,08	8,27	<0,6	46,01	2,27	339,28	<0,1	<0,7	0,156
	№ 2	Андомский мыс	1 (урез)	0,1	пов	64,26	1779,48	27,13	<0,6	49,74	11,53	5123,14	<0,1	<0,7	<0,05
			2 (ЗВВ)	3,4	пов	19,97	957,16	37,97	<0,6	66,03	5,06	4892,43	<0,1	<0,7	<0,05
			3 (вне ЗВВ)	6,3	пов	30,04	319,79	7,70	<0,6	53,57	2,12	1936,93	<0,1	<0,7	<0,05
	№ 3	300 м к З от Андомского мыса	1 (урез)	0,1	пов	14,13	292,65	22,34	<0,6	39,76	1,21	1418,61	<0,1	<0,7	<0,05
			2 (ЗВВ)	3,4	пов	15,56	596,71	14,66	<0,6	33,21	9,17	5012,34	<0,1	<0,7	<0,05
			3 (вне ЗВВ)	6,3	пов	50,18	394,3	11,38	<0,6	69,16	3,01	280,44	<0,1	<0,7	<0,05
Пухтинская бухта	№ 1	2,2 км к СВ от СНТ «Сосновый Бор»	1 (урез)	0,1	пов	27,52	147,14	1,29	0,76	46,28	1,30	176,75	<0,1	<0,7	<0,05
			2 (ЗВВ)	3,0	пов	14,02	635,18	30,70	<0,6	40,33	1,63	1854,43	<0,1	<0,7	<0,05
					дно	11,36	194,48	9,75	<0,6	125,43	1,76	70,03	<0,1	<0,7	<0,05
			3 (вне ЗВВ)	6,5	пов	5,53	85,58	0,66	<0,6	66,18	1,32	69,33	<0,1	<0,7	<0,05
					дно	4,08	74,53	20,12	<0,6	47,78	0,89	18,22	<0,1	<0,7	<0,05

Ключевой участок	Створ	Место-положение створа	Вертикаль	Глубина, м	Горизонт	Концентрация, мкг/л													
						Mn	Fe	Cu	Ni	Zn	Pb	Al	Cr	Co	Cd				
Пухлинская бухта	№ 2	750 м к С от СНТ «Сосновый Бор»	1 (урез)	0,1	пов	Mn	13,41	827,05	25,65	<0,6	35,38	2,53	548,28	<0,1	<0,7	<0,05			
						Zn	98,02	1,24	142,14	79,01	<0,7	<0,05							
			2 (ЗВВ)	3,0	дно	Mn	16,76	132,83	14,99	<0,6	48,77	1,80	4638,45	<0,1	<0,7	<0,05			
						Zn	86,27	1,18	26,59	<0,1	<0,7	<0,05							
			3 (вне ЗВВ)	6,5	дно	Mn	8,73	142,46	0,22	0,82	237,36	1,63	26,48	10,68	<0,7	<0,05			
						Zn	134,91	10,08	6253,42	15,03	<0,7	<0,05							
	№ 3	1,4 км к СЗ от СНТ «Сосновый Бор»	1 (урез)	0,1	пов	Mn	66,44	4349,78	9,93	<0,6	49,45	2,19	246,21	<0,1	<0,7	<0,05			
						Zn	412,13	10,31	4211,41	12,92	<0,7	<0,05							
			2 (ЗВВ)	3,0	дно	Mn	37,45	3050,47	43,37	<0,6	13,68	1,88	28,33	<0,1	<0,7	<0,05			
						Zn	68,17	1,27	102,36	<0,1	<0,7	<0,05							
			3 (вне ЗВВ)	6,5	дно	Mn	4,12	87,14	16,05	<0,6	4,09	248,49	4,09	68,17	1,27	102,36	<0,1	<0,7	<0,05
						Zn	68,17	1,27	102,36	<0,1	<0,7	<0,05							

Таблица 6. Кратности превышения ПДК ТМ в поверхностном слое воды Онежского озера в октябре 2018 г.

Ключевой участок	Верт.	Норматив*	Концентрация, доли ПДК									
			Mn	Fe	Cu	Ni	Zn	Pb	Al	Cr	Co	Cd
Андомская гора	урез	ПДКрх	3,3	7,8	22,9	0,06	4,4	1,3	56,5	0,005	0,07	0,01
		ПДКхп	0,3	2,6	0,02	0,03	0,04	0,8	11,3	0,002	0,01	0,05
	ЗВВ	ПДКрх	1,7	5,6	21,9	0,06	4,9	1,1	84,9	0,005	0,07	0,01
		ПДКхп	0,2	1,9	0,02	0,03	0,05	0,6	17,0	0,002	0,01	0,05
	вне ЗВВ	ПДКрх	3,4	1,5	9,1	0,1	5,6	0,4	21,3	0,005	0,07	0,01
		ПДКхп	0,3	0,5	0,01	0,03	0,06	0,2	4,3	0,002	0,01	0,05
Пухтинская бухта	урез	ПДКрх	3,6	17,7	12,3	0,08	7,2	0,8	58,2	0,8	0,07	0,01
		ПДКхп	0,4	5,9	0,01	0,04	0,07	0,5	11,6	0,3	0,01	0,05
	ЗВВ	ПДКрх	1,9	5,7	26,8	1,1	6,3	0,3	18,7	4,0	0,07	0,01
		ПДКхп	0,2	1,9	0,03	0,5	0,06	0,2	3,7	1,6	0,01	0,05
	вне ЗВВ	ПДКрх	1,9	0,9	8,6	0,06	5,5	0,2	1,04	0,005	0,07	0,01
		ПДКхп	0,2	0,3	0,01	0,03	0,06	0,1	0,2	0,002	0,01	0,05

Примечание: *ПДКрх — рыбохозяйственное использование; ПДКхп — хозяйственно-питьевое использование. Цветом выделены нарушения ПДК.

Таблица 7. Кратности превышения ПДК ТМ в придонном слое воды Пухтинской бухты Онежского озера в октябре 2018 г.

Ключевой участок	Верт.	Норматив*	Концентрация, доли ПДК									
			Mn	Fe	Cu	Ni	Zn	Pb	Al	Cr	Co	Cd
Пухтинская бухта	урез	ПДКрх	3,6	17,7	12,3	0,08	7,2	0,8	58,2	0,8	0,07	0,01
		ПДКхп	0,4	5,9	0,01	0,04	0,07	0,5	11,6	0,3	0,01	0,05
	ЗВВ	ПДКрх	2,2	11,3	22,7	0,1	19,5	0,8	74,3	0,6	0,07	0,01
		ПДКхп	0,2	3,8	0,02	0,03	0,20	0,5	14,9	0,3	0,01	0,05
	вне ЗВВ	ПДКрх	0,6	1,6	8,1	0,06	11,8	0,2	1,23	0,005	0,07	0,01
		ПДКхп	0,1	0,5	0,01	0,03	0,12	0,1	0,2	0,002	0,01	0,05

Примечание: *ПДКрх — рыбохозяйственное использование; ПДКхп — хозяйственно-питьевое использование. Цветом выделены нарушения ПДК.

Параллельно с отбором проб воды в районе ключевых участков проводился отбор проб донных и береговых отложений Онежского озера с дальнейшим определением гранулометрического состава наносов и содержания ТМ в грунтах. Результаты гранулометрического анализа донных отложений приведены в табл. 8, береговых отложений — в табл. 9. В табл. 10 представлены результаты определения концентраций подвижной формы ТМ в донных отложениях, в табл. 11 — в береговых отложениях.

Таблица 8. Гранулометрический состав донных отложений Онежского озера

Ключевой участок	Створ	Вертикаль	Грансостав, % объемный					
			< 1 (мкм)	1–5 (мкм)	5–10 (мкм)	10–50 (мкм)	50–250 (мкм)	250–1000 (мкм)
Андомская гора	№ 1	1 (урез)	5,6	19,1	12,4	10,3	1,8	45,4
		2 (ЗВВ)	4,7	16,8	11,2	11,8	0	51,8
		3 (вне ЗВВ)	4,2	15,3	9,9	10,5	9,5	48,6
	№ 2	1 (урез)	2,7	10,2	7,1	6,7	0	54,3
		2 (ЗВВ)	3,7	13	9,7	10,8	0	48,4
	№ 3	1 (урез)	4,3	14,1	9	30,9	35,6	6,1
		2 (ЗВВ)	1,1	2,6	1	2,1	71,6	21,6
		3 (вне ЗВВ)	0,5	0,9	0,4	1,4	59,4	37,4
	Пухтинская бухта	№ 1	1 (урез)	0,2	0,7	0,4	1,4	53,1
2 (ЗВВ)			0,5	1,3	0,7	1,7	83	12,8
3 (вне ЗВВ)			0,5	1,5	0,7	1,8	77,9	17,6
№ 2		1 (урез)	1,6	5,9	4,4	4,9	0	72,5
		2 (ЗВВ)	0,3	1,3	0,7	0,8	0,8	88,3
		3 (вне ЗВВ)	0,5	1,6	0,7	1,2	26,7	62,2
№ 3		1 (урез)	2	8,1	4,8	4,9	0,7	68,3
		2 (ЗВВ)	0,1	0,5	0,3	0,9	12,1	83,5
		3 (вне ЗВВ)	0,8	2,8	1,4	1,5	6,2	80,4

Таблица 9. Гранулометрический состав береговых отложений Онежского озера

Ключевой участок	Створ	Вертикаль	Грансостав, % объемный					
			< 1 (мкм)	1–5 (мкм)	5–10 (мкм)	10–50 (мкм)	50–250 (мкм)	250–1000 (мкм)
Андомская гора	№ 1	1 (склон)	1,7	11,4	10	37	36,6	3,3
		2 (пляж)	19,2	36,1	15,4	28,1	1,2	0

Ключевой участок	Створ	Вертикаль	Грансостав, % объемный					
			< 1 (мкм)	1–5 (мкм)	5–10 (мкм)	10–50 (мкм)	50–250 (мкм)	250–1000 (мкм)
Андомская гора	№ 2	1 (склон)	4,3	25,4	15,8	38,2	15,9	0,4
		2 (пляж)	3,2	11,6	8,4	31,5	39,3	6
	№ 3	1 (склон)	2,8	16,2	12	48,9	20,1	0
		2 (пляж)	6,7	20,9	13,3	45,3	13,8	0
Пухтинская бухта	№ 1	1 (склон)	1,4	5,5	4,4	6,5	27,1	51,8
		2 (пляж)	5,8	15,5	8,6	12,8	35,9	21,4
	№ 2	1 (склон)	2,1	13,5	13,1	61,8	9,5	0
		2 (пляж)	2	7	4,4	4,8	0	78,1
	№ 3	1 (склон)	1,5	13,3	13,4	58,8	13	0
		2 (пляж)	0,2	0,7	0,3	0,9	1,4	89,4

Таблица 10. Концентрация тяжелых металлов (подвижная форма) в донных отложениях Онежского озера в октябре 2018 г.

Ключевой участок	Створ	Вертикаль	Концентрация, мг/кг									
			Cu	Zn	Fe	Mn	Pb	Ni	Al	Cr	Co	Cd
Андомская гора	№ 1	1 (урез)	5,59	0,55	12,26	14,17	1,91	<	2,01	<	<	<
		2 (ЗВВ)	2,33	0,57	11,45	96,85	1,41	<	0,68	<	<	<
		3 (вне ЗВВ)	1,46	0,26	6,69	11,58	0,66	<	1,04	<	<	<
	№ 2	1 (урез)	2,33	0,30	11,78	26,58	0,55	<	1,18	<	<	<
		2 (ЗВВ)	0,95	0,38	9,87	9,31	0,38	<	2,15	<	<	<
	№ 3	1 (урез)	0,15	0,21	0,11	2,10	0,02	<	3,12	<	<	<
		2 (ЗВВ)	3,36	0,24	5,27	6,14	0,34	<	0,12	<	<	<
		3 (вне ЗВВ)	1,49	0,19	6,45	6,47	0,29	<	1,12	<	<	<
	Пухтинская бухта	№ 1	1 (урез)	1,44	0,18	41,27	2,65	0,23	<	0,04	<	<
2 (ЗВВ)			0,65	0,16	12,28	4,80	0,22	<	0,37	<	<	<
3 (вне ЗВВ)			0,77	0,40	14,22	14,21	0,23	<	0,27	<	<	<
№ 2		1 (урез)	0,58	0,13	10,17	1,72	0,19	<	1,26	<	<	<
		2 (ЗВВ)	1,51	0,13	7,49	4,44	0,23	<	0,86	<	<	<
		3 (вне ЗВВ)	1,32	0,36	11,27	6,61	0,22	<	0,25	<	<	<

Ключевой участок	Створ	Вертикаль	Концентрация, мг/кг									
			Cu	Zn	Fe	Mn	Pb	Ni	Al	Cr	Co	Cd
Пухтинская бухта	№ 3	1 (урез)	0,66	0,17	9,265	2,33	0,19	<	1,87	<	<	<
		2 (ЗВВ)	1,59	0,28	7,846	6,62	0,27	<	1,08	<	<	<
		3 (вне ЗВВ)	1,93	0,43	14,558	7,57	0,30	<	0,27	<	<	<

Примечание: знак < обозначает концентрацию элемента ниже предела обнаружения.

Таблица 11. Концентрация тяжелых металлов (подвижная форма) в береговых отложениях Онежского озера в октябре 2018 г.

Ключевой участок	Створ	Вертикаль	Концентрация, мг/кг									
			Cu	Zn	Fe	Mn	Pb	Ni	Al	Cr	Co	Cd
Андомская гора	№ 1	1 (склон)	2,30	0,78	7,175	68,00	1,70	<	0,12	<	<	<
		2 (пляж)	5,56	2,55	7,971	29,73	1,01	<	2,01	<	<	<
	№ 2	1 (склон)	2,61	0,89	44,22	37,97	2,15	<	3,12	<	<	<
		2 (пляж)	1,97	0,19	6,478	2,43	0,63	<	1,67	<	<	<
	№ 3	1 (склон)	1,87	1,08	13,21	54,70	3,63	<	3,05	<	<	<
		2 (пляж)	8,57	0,37	10,68	43,59	3,78	<	1,91	<	<	<
Пухтинская бухта	№ 1	1 (склон)	4,99	0,29	26,42	0,06	0,78	<	0,27	<	<	<
		2 (пляж)	1,66	0,28	6,484	0,20	0,38	<	0,11	<	<	<
	№ 2	1 (склон)	1,38	3,49	10,58	1,07	3,18	<	0,57	<	<	<
		2 (пляж)	0,81	0,18	39,92	30,22	0,47	<	0,16	<	<	<
	№ 3	1 (склон)	4,05	1,11	11,76	2,11	1,55	<	0,13	<	<	<
		2 (пляж)	0,85	0,34	1,542	0,04	0,54	<	0,21	<	<	<

Примечание: знак < обозначает концентрацию элемента ниже предела обнаружения.

Для оценки влияния береговых процессов (абразии и размыва) на качество вод Онежского озера в рамках данного исследования проводился корреляционный анализ с применением коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена с проверкой их значимости. В табл. 12 приведены результаты статистического анализа по шести ТМ. Для Ni, Cr, Co и Cd анализ не проводился ввиду их практического отсутствия в воде и береговых отложениях озера (концентрации меньше предела обнаружения).

Таблица 12. Результаты корреляционного анализа для ключевых участков Онежского озера

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	8	0,707	-0,14	-0,19	0,35	-0,09	0,46	-0,08
	Коэффициент корреляции Спирмена R	Дно-Вода	8	0,707	0,02	-0,19	0,17	0,43	0,45	0,05
Пухтинская бухта	Коэффициент корреляции Пирсона r	Дно-Вода (пов.)	9	0,666	0,70	-0,05	-0,26	-0,42	-0,42	-0,25
		Дно-Вода (придон.)	9	0,666	0,80	-0,10	-0,32	-0,49	-0,04	-0,19
	Коэффициент корреляции Спирмена R	Дно-Вода (пов.)	9	0,666	0,71	-0,13	-0,65	-0,45	-0,23	-0,10
		Дно-Вода (придон.)	9	0,666	0,71	-0,13	-0,27	-0,63	-0,25	-0,60

Примечание: цветом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции (при $p < 0,05$).

4. Обсуждение результатов

Результаты КХА отобранных проб воды Онежского озера в районах ключевых участков показали следующее. С учетом важности нормирования качества воды акцент сделан на сравнении с нормативами ПДК.

Хозяйственно-питьевые нормативы ПДК менее жесткие по сравнению с рыбохозяйственными, в связи с этим нарушения отмечены только в отдельных створах по отдельным металлам. Стабильные нарушения отмечены в отношении Fe (до 2,6 раза в районе Андомской горы и до 5,9 раза в районе Пухтинской бухты) и Al (до 17 раз в районе Андомской горы и до 11,6 раза в районе Пухтинской бухты). В зоне волнового воздействия Пухтинской бухты также зафиксировано превышение ПДК по Cr в 1,6 раза.

Во всех пробах отмечено стабильное превышение рыбохозяйственных ПДК по Mn (до 3,6 ПДК), Cu (до 26,8 ПДК), Zn (до 7,2 ПДК) и Al (до 84,9 ПДК). В районе Андомской горы отмечено превышение нормативов по Fe (до 7,8 ПДК) и Pb (до 1,3 ПДК). В районе Пухтинской бухты нормативы нарушены в отношении Fe (до 17,7 ПДК), Ni (до 1,1 ПДК) и Cr (до 4 ПДК).

В целом гидрохимическая картина рассматриваемых районов Онежского озера по содержанию ТМ не отличается от таковой в конкретный осенний сезон года (Трофимчук, 2017). Концентрации ТМ имеют тенденцию к уменьшению по мере удаления от берега, что может быть связано с уменьшением влияния источника их поступления в конкретных районах (размыва берегов и донных отложений, а также твердого стока рек). Концентрации ТМ в придонном слое воды, который находится в непосредственном контакте с донными отложениями, выше, чем в поверхностном. Особенно это прослеживается для Fe, Zn и Al. В придонном слое воды содержание Fe в 2 раза, Zn в 3,1 раза, Al в 4 раза выше, чем в поверхностном.

При сравнении двух ключевых участков между собой можно сделать вывод о том, что сильное волнение, имеющее место в районе Андомской горы, обуславливает взмучивание донных отложений и дальнейшее попадание ТМ в воду. Особенно это прослеживается в ЗВВ и за ее пределами. Концентрации большинства исследованных ТМ оказались выше, чем в районе Пухтинской бухты в спокойную погоду. Наибольшее различие характерно для Al, для которого концентрация в воде в районе Андомской горы оказалась в 4,5 раза выше, чем в районе Пухтинской бухты.

Отобранные береговые отложения в районе Андомской горы представлены мелкодисперсным песком с глиной, перекрытые галечным пляжем, на которые оказывается волновое воздействие (рис. 6). Донные отложения представлены мелко- и среднезернистым песком.

В районе Пухтинской бухты берега и донные осадки сложены преимущественно среднезернистым песком с редкими включениями мелких фракций (рис. 7).

Довольно высокие концентрации подвижной формы ТМ в донных отложениях характерны для Fe и Mn (см. табл. 10). В районе Андомской горы концентрация Fe находится в диапазоне 5–12 мг/кг, Mn — в диапазоне 2–97 мг/кг. В районе Пухтинской бухты содержание Fe колеблется в пределах 7–41 мг/кг, Mn — в пределах 2–14 мг/кг. При рассмотрении створов наблюдений картина следующая. Суммарная концентрация металлов примерно одинаковая на рассматриваемых участках

а*б*

Рис. 6. Общий вид береговых отложений Онежского озера в районе Андомской горы: галечный пляж с «пьяным лесом» (а); красноцветные и сизые глины на склоне (б) (фото А. Ю. Санина)

а*б*

Рис. 7. Общий вид береговых отложений Онежского озера в районе Пухтинской бухты: абразионно-аккумулятивный берег с впадающим ручьем (а); среднезернистый песок (б) (фото А. Ю. Санина)

озера и составляет в районе уреза около 25–28 мг/кг, 19–25 мг/кг на глубине более 6 м. Отличия концентраций наблюдаются в ЗВВ (глубина 3 м): в районе Андомской горы 50 мг/кг, в районе Пухтинской бухты 17 мг/кг.

Для береговых отложений озера также характерны высокие содержания Fe и Mn (см. табл. 11). В районе Андомской горы концентрация Fe находится в пределах 6–44 мг/кг, Mn — 2–68 мг/кг. В районе Пухтинской бухты содержание Fe достигает 40 мг/кг, Mn — 30 мг/кг. Следует отметить, что в районе Андомской горы глинистые частицы имеют значительно более высокие концентрации металлов по сравнению с песчаным пляжем Пухтинской бухты (в среднем в 4 раза). Суммарная концентрация ТМ на склоне Андомской горы составила около 83 мг/кг, на пляже — 44 мг/кг. В районе Пухтинской бухты концентрация ТМ находилась в пределах от 25 мг/кг (склон) до 28 мг/кг (пляж).

Результаты проведенного корреляционного анализа показали наличие разных типов связей между содержанием ТМ в донных отложениях и воде (от «очень слабой» до «средней»), которые являются статистически незначимыми. Отдельное

внимание стоит уделить содержанию Al в донных осадках и воде в районе Пухтинской губы. Здесь отмечается «сильная (тесная)» связь (коэффициенты корреляции составляют не менее 0,7), что с высокой долей вероятности указывает на поступление данного металла из донных отложений в придонный и поверхностный слой воды.

При выполнении работ в рамках настоящего исследования возник ряд дискуссионных вопросов и сложностей, которые снижают достоверность полученных результатов. Так, по минералогическому составу пород, слагающих берега, имеются лишь достаточно обобщенные и усредненные данные, которые не всегда позволяют сделать конкретные выводы по интенсивности поступления того или иного металла. Кроме того, способность металлов к миграции также зависит от местных физико-химических условий и может колебаться в широких пределах.

Другая проблема — одновременность воздействия нескольких природных процессов, обеспечивающих поступление металлов в воду Онежского озера, что усложняет определение роли (вклада) каждого из них. К примеру, даже в непосредственной близости от участка с активными абразионными процессами металлы с течениями могут быть принесены от устья впадающей реки, расположенной в десятках километрах от него. На рис. 8 показаны направления течений в Онежском озере на разных горизонтах в летне-осенний период по материалам (Филатов и др., 2010). Касательно рассматриваемых ключевых участков ТМ в районе Андомской

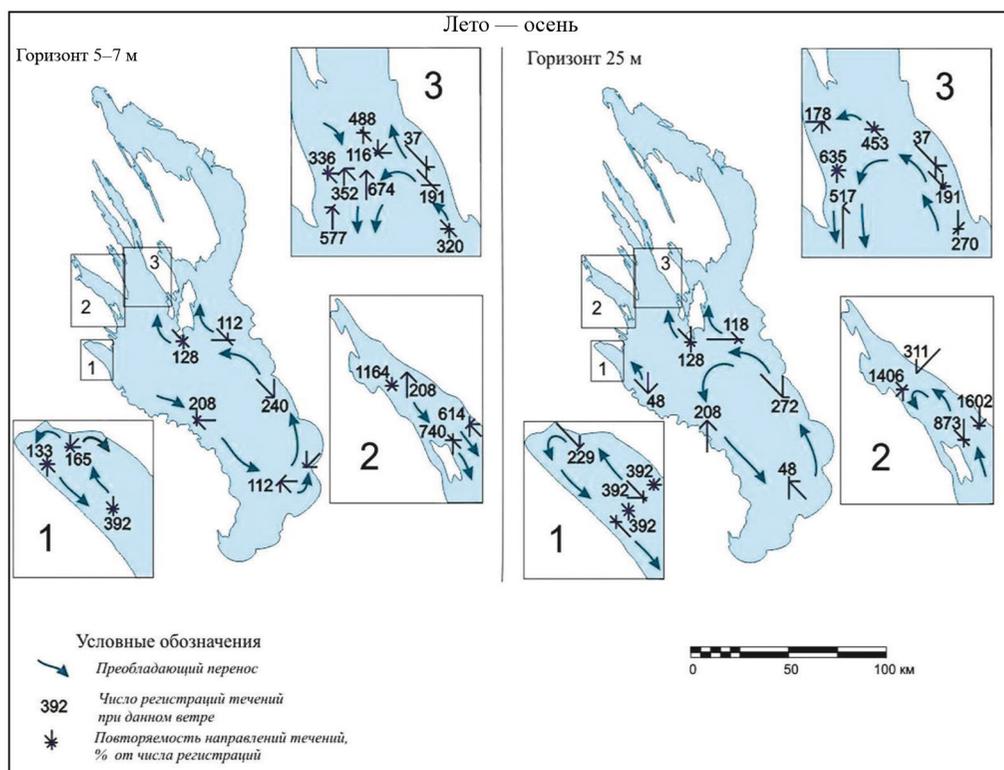


Рис. 8. Течения по данным длительных измерений при ветрах северных румбов (преобладающий ветер юго-восточного направления) (Филатов и др., 2010)

горы могут быть принесены из района устья р. Вытегры, в районе Пухтинской бухты — из района Петрозаводской губы, которая испытывает значительную антропогенную нагрузку (Калинкина и др., 2019), что может обеспечивать еще и совместное действие природного и антропогенного фактора.

В работе (Льюмменс и Терский, 2018) осуществлено воспроизведение циркуляционных процессов с использованием современных данных метеорологического реанализа (ERAInterim) и популярной гидродинамической модели DELFT3D с целью моделирования и картирования ветровых течений, имеющих первостепенную роль на акватории Онежского озера.

С учетом возрастающих требований к мониторингу экологического состояния водных объектов полученные результаты могут быть использованы для изучения транспорта химических веществ по всей площади объекта.

Выявленные корреляционные связи требуют дополнительного количества данных для их обоснования. Согласно (Никаноров и др., 2013), частота сетки отбора проб донных отложений зависит от глубины водного объекта и составляет от 30 до 400 м. Для рассматриваемых участков Онежского озера с глубинами до 10 м рекомендуемая сетка составляет от 30 до 100 м. Мониторинг содержания металлов рекомендуется вести в отдельные сезоны года с учетом преобладающих направлений ветрового воздействия.

5. Заключение

Для региона Онежского озера среди природных факторов поступления химических веществ наибольшую роль играет поступление с твердым стоком рек, однако на отдельных участках ведущую роль играют абразионные процессы, особенно для акватории, смежной с абразионными берегами и для участков берега, характеризующихся отсутствием крупных притоков. Для конкретного химического вещества интенсивность его поступления с твердым стоком рек или в ходе абразионных процессов определяется процентным его содержанием в берегоформирующих породах и склонностью к миграции. В работах 2018 г. и при подведении их итогов особое внимание уделялось следующим ТМ: Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Co, Cd.

В районе абразионных (Андомская гора) и абразионно-аккумулятивных (Пухтинская бухта) берегов Онежского озера в октябре 2018 г. проведены геоэкологические исследования, включающие отбор проб воды (24 пробы), донных (17 проб) и береговых (12 проб) отложений с дальнейшим определением содержания вышеприведенных ТМ. В воде определялась растворенная форма металлов, в грунте — подвижная. Концентрации ТМ в воде в целом отражают гидрохимическую картину озера в осенний период года с превышением действующих нормативов ПДК до 10 раз в отношении Mn, Fe, Cu, Zn, Pb и Al.

По итогам химического анализа проведен корреляционный анализ влияния абразии и размыва берегов на качество прибрежных вод Онежского озера посредством седиментации влекомых наносов на дно озера. Результаты показали отсутствие фиксируемого статистическими методами влияния со стороны донных осадков озера в прибрежной зоне на содержание ТМ, кроме Al. Для него отмечена сильная (тесная) статистическая связь с коэффициентом корреляции не менее 0,7. Проверка достоверности корреляционных зависимостей требует проведения до-

полнительных исследований с расширением сетки опробования и сезонности отбора проб воды и грунта.

* * *

Авторы признательны сотрудникам отдела информационного обеспечения морской и водохозяйственной деятельности ФГБУ «ГОИН» за помощь в написании статьи и подборе материала. Исследование 2014–2015 гг. проведено в рамках темы НИР №31/14 «Исследование современного состояния и качества вод Онежского озера» (руководитель И. В. Землянов). Исследование 2018 г. проведено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00545 мол_а «Оценка воздействия береговых процессов на экологическое состояние Онежского озера».

Литература

- Биске, Г. С. (1959). Морены Карелии. *Труды Карельского филиала Академии наук СССР*, 11, 83–91.
- Богданов, Ю. Б., Максимов, А. В., Коссовая, О. Л., Евдокимова, И. О. (1999). *Государственная геологическая карта Российской Федерации (третье поколение) масштаба 1:1000 000. Лист Р-35, 36.* Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.
- Воробьева, Л. А. (2006). *Теория и практика химического анализа почв.* Москва: ГЕОС.
- Воскресенский, И. С., Каревская, И. А., Игнатов, Е. И. (2015). Новые данные по геологическому разрезу «Андомская Гора» в Прионежье. В: *Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике.* Москва: МАКС Пресс, 398–401.
- Забраилов, А. Ю. (1966). *Ветроволновой режим и условия плавания на Ладожском и Онежском озерах.* Москва: Транспорт.
- Зенкович, В. П. (1962). *Основы учения о развитии морских берегов.* Москва: Наука.
- Игнатов, Е. И., Борщенко, Е. В., Загоскин, А. Л., Землянов, И. В., Санин, А. Ю., Терский, П. Н., Фатхи, М. О. (2017). Связь геологического строения побережья, истории развития рельефа и динамики берегов Онежского озера. *Труды Карельского научного центра РАН. Лимнология*, 3, 65–78.
- Калинкина, Н. М., Теканова, Е. В., Сабылина, А. В., Рыжаков, А. В. (2019). Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов. *Известия РАН. Сер. географическая*, 1, 62–72.
- Кауфман, З. С. (1990). *Экосистема Онежского озера и тенденция его изменения.* Ленинград: Наука.
- Льюммэнс, Л., Терский, П. Н. (2018). Моделирование ветровых течений Онежского озера на основе программного комплекса DELFT 3D.V: *Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Материалы XXIX Молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова.* Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 330–332.
- Никаноров, А. М. (2008). *Гидрохимия.* Ростов-на-Дону: НОК.
- Никаноров, А. М., Хоружая, Т. А., Назарова, А. А., Минина, Л. И. (2013). *Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов.* [руководящий документ] Ростов-на-Дону: Ростгидромет, ФГБУ «ГХИ».
- Перельман, А. И. (1989). *Геохимия.* Москва: Высшая школа, 138–139, 186–189.
- Сабылина, А. В., Ефремова, Т. А. (2017). Тенденции изменения поступления химических веществ с водами малых рек юго-западного побережья Онежского озера за последние 50 лет. *Экологическая химия*, 26(6), 333–339.
- Строков, А. А., Санин, А. Ю., Терский, П. Н., Фатхи, М. О. (2018). Современная гидроэкология Онежского озера и его бассейна. В: *Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Материалы XXIX молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова.* Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 295–299.
- Трофимчук, М. М. (2017). *Качество поверхностных вод Российской Федерации.* [ежегодник] Ростов-на-Дону: Ростгидромет, ФГБУ «ГХИ».

- Филатов, Н. Н., Калинкина, Н. М., Кухарев, В. И., Литвиненко, А. В., Лозовик, П. А., Лукин, А. А., Назарова, Л. Е., Тержевик, А. Ю., Тимакова, Т. М., Шаров, Н. В., Щипцов, В. В. (2010). *Онежское озеро*. [атлас] Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.
- Филатов, Н. Н., Калинкина, Н. М., Куликова, Т. П., Литвиненко, А. В., Лозовик, П. А. (2015). *Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях*. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2019 г.

Статья рекомендована в печать 27 ноября 2019 г.

Контактная информация:

Санин Александр Юрьевич — eather86@mail.ru

Строков Александр Александрович — aastrokov@mail.ru

Терский Павел Николаевич — pavel_tersky@mail.ru

Assessment of the impact of natural processes on the content of heavy metals Lake Onego water*

A. Yu. Sanin¹, A. A. Strokov¹, P. N. Terskii²

¹ N. N. Zubov's State Oceanographic Institute,
6, Kropotkinsky per., Moscow, 119034, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation

For citation: Sanin, A. Yu., Strokov, A. A., Terskii, P. N. (2020). Assessment of the impact of natural processes on the content of heavy metals Lake Onego water. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (1), 146–171. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.108> (In Russian)

The article presents the results of studies conducted in 2014–2015 and 2018 in the water area and shores of Lake Onego, devoted to the study of natural and anthropogenic factors that affect the water quality of different areas of the lake. Among natural factors, river flow provides 50–70 % of chemical substances into the lake. However, in areas of the lake where there are no large tributaries, abrasion or erosion processes on shores play a special role. As a result of work in 2014–2015, morphogenetic classification of shores was done and seven types were highlighted: slightly modified, abrasion, abrasion-accumulative, accumulative, deltaic, lagoon and anthropogenic. The first attempts to carry out a correlation analysis of coastal processes' impact on water quality of the lake (heavy metals intake) were made. Geoecological research including water (24 samples), bottom (17 samples) and coastal (12 samples) sediments sampling with subsequent determination of Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Co and Cd content was conducted in the area of abrasion (Andoma Mountain) and abrasion-accumulative (Pukhta Bay) shores of Lake Onego in October 2018. The dissolved form of metals was determined in water and the mobile form of metals was determined in sediments. Concentrations of metals reflect the chemical composition of lake water in the autumn and exceed maximum permissible concentrations by 10 times for Mn, Fe, Cu, Zn, Pb and Al. According to the results of chemical analysis, correlation analysis was conducted on abrasion and erosion of lake shores and the impact on the quality of Lake Onego coastal waters. There is no influence of bottom sediments in the coastal zone on the content of heavy metals except Al. Statistically significant correlation (correlation coefficient 0.7) has been noted for Al.

Keywords: lake Onego, water quality, pollutants, types of shores, abrasion, accumulation, long-shore transport, currents, heavy metals, correlation.

* This study has been realized with support of Russian Foundation for Basic Research. Scientific project is no. 18-35-00545 mol_a.

References

- Biske, G. S. (1959). Moraines of Karelia. In: *Trudy Karel'skogo filiala Akademii nauk SSSR*. Petrozavodsk, 83–91. (In Russian)
- Bogdanov, Iu. B., Maksimov, A. V., Kossovaia, O. L., Evdokimova, I. O. (1999). *State geological map of the Russian Federation (third generation) scale 1:1000 000. Sheet P-35, 36*. St. Petersburg: VSEGEI Press. (In Russian)
- Filatov, N. N., Kalinkina, N. M., Kukharev, V. I., Litvinenko, A. V., Lozovik, P. A., Lukin, A. A., Nazarova, L. E., Terzhevik, A. Yu., Timakova, T. M., Sharov, N. V., Shchiptsov, V. V. (2010). *Lake Onego*. [atlas] Petrozavodsk: Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ. (In Russian)
- Filatov, N. N., Kalinkina, N. M., Kulikova, T. P., Litvinenko, A. V., Lozovik, P. A. (2015). *The largest lakes-reservoirs of the North-West European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and antropogenic impact*. Petrozavodsk: Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ. (In Russian)
- Ignatov, E. I., Borschenko, E. V., Zagoskin, A. L., Zemlyanov, I. V., Sanin, A. Yu., Terskii, P. N., Fatkhi M. O. (2017). Connection between the geological structure of Lake Onego region, its topographic evolution and the dynamics of the lake shores. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. Limnologii*, 65–78. (In Russian)
- Kalinkina, N. M., Tekanova, E. V., Sabylina, A. V., Ryzhakov, A. V. (2019). Changes in the Hydrochemical Regime of Onego Lake Since the Early 1990s. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Ser. Geograficheskaiia*, 62–72. (In Russian)
- Kaufman, Z. S. (1990). *Ecosystem of Lake Onego and trend of its change*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Lummens, L., Terskii, P. N. (2018). Simulation of wind flows of Lake Onego on the basis of DELFT 3D. In: *Aktual'nye problemy geologii, geofiziki i geoekologii. Materialy XXIX molodezhnoi nauchnoi shkoly-konferentsii, posviashchennoi pamiati chlena-korrespondenta AN SSSR K. O. Krattsa i akademika RAN F. P. Mitrofanova*. Petrozavodsk: Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ., 330–332. (In Russian)
- Nikanorov, A. M. (2008). *Hydrochemistry*. Rostov-on-Don: NOK Publ. (In Russian)
- Nikanorov, A. M., Khoruzhaya, T. A., Nazarova, A. A., Minina, L. I. (2013). *Organization and monitoring of pollutants in bottom sediments of water bodies*. [guidance document] Rostov-on-Don: Rosgidromet, Federal'noe gosudarstvennoe biudzhethnoe uchrezhdenie Gidrokhimicheskii institut. (In Russian)
- Perelman, A. I. (1989). *Geochemistry*. Moscow: Vysshiaia shkola Publ., 138–139, 186–189. (In Russian)
- Sabylina, A. V., Efremova, T. A. (2017). Trends of Changes in Receiving Chemicals with Waters of Small Rivers in the South-West Coast of Onego Lake for the Last 50 Years. *Ekologicheskaiia khimiia*, 26(6), 333–339. (In Russian)
- Strokov, A. A., Sanin, A. Yu., Terskii, P. N., Fatkhi, M. O. (2018). Modern Hydroecology of Lake Onego and its basin. In: *Aktual'nye problemy geologii, geofiziki i geoekologii. Materialy XXIX Molodezhnoi nauchnoi shkoly-konferentsii, posviashchennoi pamiati chlena-korrespondenta AN SSSR K. O. Krattsa i akademika RAN F. P. Mitrofanova*. Petrozavodsk: Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ., 295–299. (In Russian)
- Trofimchuk, M. M. (2017). *Surface water quality of the Russian Federation*. [annual] Rostov-on-Don: Rosgidromet, Federal'noe gosudarstvennoe biudzhethnoe uchrezhdenie Gidrokhimicheskii institut. (In Russian)
- Vorobieva, L. A. (2006). *Theory and practice of chemical soil analysis*. Moscow: GEOS Publ. (In Russian)
- Voskresensky, I. S., Karevskaya, I. A., Ignatov, E. I. (2015). New data on geological section “Andoma Mountain” in Prionezhie. In: *Geomorfologicheskie resursy i geomorfologicheskaiia bezopasnost': ot teorii k praktike*. Moscow: MAKS Press, 398–401. (In Russian)
- Zabrailov, A. Yu. (1966). *Wind wave regime and conditions of navigation on Ladoga and Onego lakes*. Moscow: Transport Publ. (In Russian)
- Zenkovich, V. P. (1962). *Fundamentals of development of sea shores*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)

Received: February 15, 2019
Accepted: November 27, 2019

Contact information:

Alexander Yu. Sanin — eather86@mail.ru
Alexander A. Strokov — aastrokov@mail.ru
Pavel N. Terskii — pavel_tersky@mail.ru