научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

https://ecopri.ru **https://petrsu.ru**

Издатель
ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

https://ecopri.ru

№ 1 (22). Март, 2017

Главный редактор
А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugołek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции
185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, 33.
E-mail: ecopri@petrsu.ru
https://ecopri.ru

12+

© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

научный электронный журнал ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

https://ecopri.ru **https://petrsu.ru**

УДК 551.312:574.52:574.587(282.247.211)

БИОТЕСТИРОВАНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА С УЧЕТОМ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ГЛУБОКОВОДНОГО МАКРОЗООБЕНТОСА

КАЛИНКИНА Наталия Михайловна	*д. б. н., Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (Россия, Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), cerioda@mail.ru*
БЕЛКИНА Наталья Александровна	*к. х. н., Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (Россия, Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), bel110863@mail.ru*
СИДОРОВА Анастасия Ивановна	*к. б. н., Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), bolt-nastya@yandex.ru*
ГАЛИБИНА Наталия Алексеевна	*к. б. н., Институт леса КарНЦ РАН (Республика Карелия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11), galibina@krc.karelia.ru*
НИКЕРОВА Ксения Михайловна	*нет, Институт леса КарНЦ РАН (Республика Карелия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11), knikerova@yandex.ru*

Ключевые слова:
Глубоководный макрозообентос, Онежское озеро, биотестирование, илы, химический состав

Рецензент:
А. Е. Веселов

Получена:
22 ноября 2016 года
Подписана к печати:
27 марта 2017 года

Аннотация. Дана оценка токсичности донных отложений, отобранных в различных районах Онежского озера, по показателям жизнедеятельности тестовых видов ракообразных (Ceriodaphnia affinis Lillijeborg). Показано, что большинство районов Онежского озера характеризуются нетоксичными донными отложениями. Станции с токсичными илами расположены в районе Кондопожской губы, интенсивно загрязняемой сточными водами целлюлозно-бумажного комбината. Впервые выявлен центральный глубоководный участок Онежского озера, илы которого характеризуются токсичностью, обусловленной высоким содержанием железа, марганца и других микроэлементов, характерных для центральных районов озера. На основе анализа данных по химическому составу донных отложений, результатов биотестирования и биоиндикации выполнено картирование дна Онежского озера и выявлены три зоны. Для каждой зоны определены показатели основных представителей бентоса (амфиподы, олигохеты и хирономиды). Первая зона расположена в районах интенсивного антропогенного воздействия (Кондопожская, Петрозаводская губы, Повенецкий залив, Кижские шхеры). Вторая зона расположена, главным образом, в глубоководной части Петрозаводской губы, где наблюдается наиболее интенсивное развитие амфипод. Третья зона выявлена впервые: она расположена в центральной глубоководной части Онежского озера, в которой развитие сообществ макрозообентоса лимитировано токсическим фактором природного происхождения.
© Петрозаводский государственный университет

Введение

В настоящее время экосистема Онежского озера на большей части своей акватории (обширный профундальный район озера – Центральное, Большое, Малое Онего, центральная часть Повенецкого залива) сохраняет природный статус, который характеризуется как олиготрофный. Основные источники загрязнения озера находятся на берегах его северо-западных заливов (Петрозаводской, Кондопожской губ, Повенецкого залива). Они связаны с промышленными центрами городов Петрозаводск, Кондопога и Медвежьегорск. Целлюлозно-бумажный комбинат в г. Кондопоге и коммунально-бытовые сточные воды г. Петрозаводска оказывают наибольшее влияние на экосистему Онежского озера (Экосистема Онежского озера…, 1990; Сабылина и др., 2010; Калинкина и др., 2011; Крупнейшие озера-водохранилища…, 2015).

Процессы трансформации экосистем северо-западных заливов в настоящее время продолжаются. Важнейшим признаком этих процессов является накопление в эвтрофируемых заливах загрязняющих и биогенных веществ и расширение зоны антропогенного влияния на центральный район озера (Онежское озеро…, 1999; Сярки, Теканова, 2008). Онежское озеро испытывает усиливающееся в последнее время воздействие водного транспорта и растущего форелевого хозяйства (Стерлигова и др., 2011).

В связи с необходимостью выявления степени и характера нарушений в глубоководных участках Онежского озера весьма актуальными становятся исследования донных отложений, которые отражают эффект накопления антропогенного воздействия. Одним из эффективных приемов оценки ситуации на дне является биотестирование донных отложений (Жмур, 2001; Burton, 1991). Данные о токсичности илов позволяют получить интегральную характеристику опасности ситуации для организмов бентоса с учетом возможных эффектов взаимодействия загрязняющих веществ, накопленных в илах (Калинкина и др., 2013).

Для улучшения интерпретации данных, получаемых в опытах по

биотестированию донных отложений, был предложен принцип триады (Sediment Quality Triad), согласно которому в фокусе исследования должно быть три основных компонента: собственно биотестирование седиментов с использованием водных организмов; изучение химического состава седиментов; оценка состояния организмов бентоса при полевых наблюдениях (Chapman, 1990, 1992; Burton, 1991).

Цель настоящей работы – на основе использования принципа триады выполнить биотестирование илов Онежского озера с учетом их химического состава и показателей состояния глубоководного макрозообентоса.

Материалы

В 2014 г. в экспедиции на Онежское озеро были взяты пробы донных отложений (илов) для биотестирования и химического анализа. Пробы отбирали с помощью дночерпателя ДАК площадью захвата 250 см^2 на 47 станциях с глубинами 4.5–104 м (рис. 1).

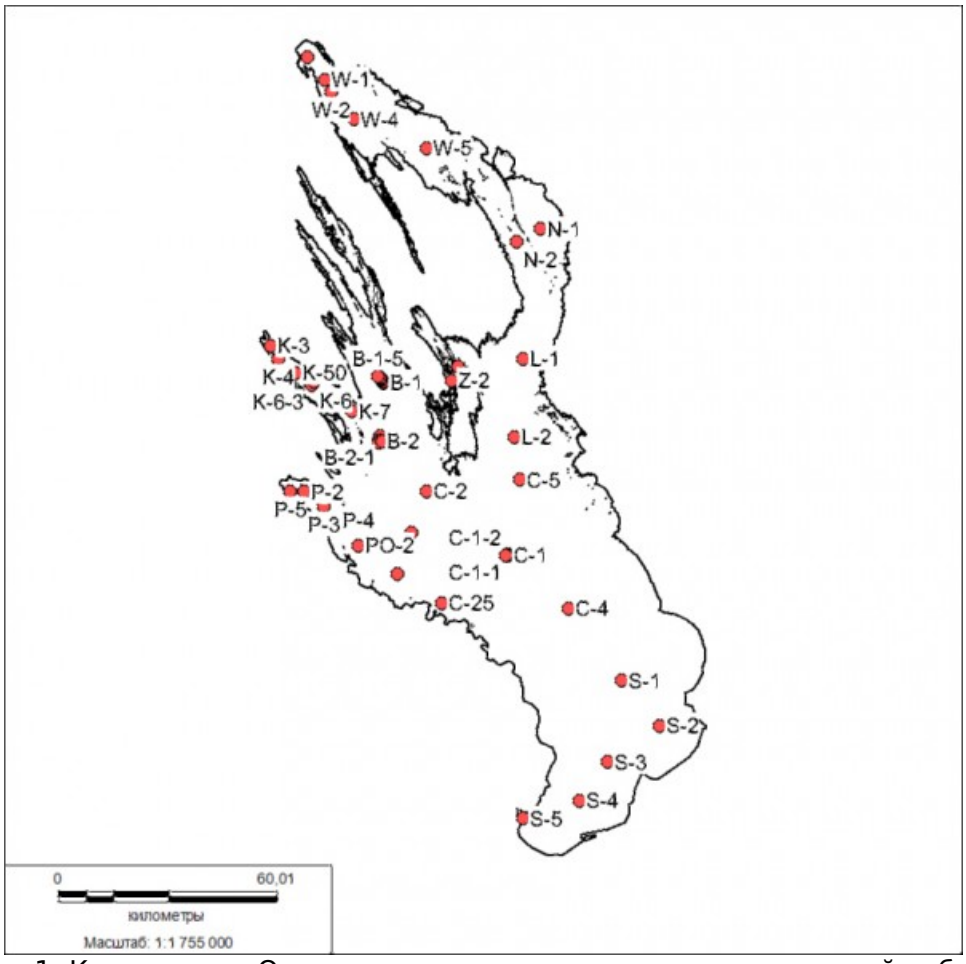

Рис. 1. Карта-схема Онежского озера с расположением станций отбора проб донных отложений на токсикологический и химический анализ (август 2014 г.)

Fig. 1. Map of Lake Onego, with the location of stations for bottom sediment sampling on toxicology and chemical analysis (August 2014)

Все пробы были отобраны в двух повторностях: с каждой станции по 2 дночерпателя. Для биотестирования и химического анализа отбирали верхний 2 см поверхностный слой мягких грунтов (в основном илов). Всего было собрано 94 образца донных отложений.

Кроме данных, полученных в 2014 г., в работе использовали архивные материалы Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. Была использована база данных по физико-химическому составу илов, отобранных в 2001–2013 гг. Отбор проб поверхностного слоя донных отложений осуществлялся стратометром «Limnos» и

поршневой трубкой, которая представляла собой модифицированный вариант стратометра Алексона (Hakanson, Jansson, 1983). База данных включала следующие показатели физико-химического состава илов: окислительно-восстановительный потенциал Eh (mv), pH, влажность, пористость, содержание органического углерода (С орг.), потери при прокаливании (ППП), содержание аммонийного азота N (NH4), общего азота (N общ.), общего железа (Fe общ.), общего марганца (Mn общ.) и общего фосфора (P общ.). Матрица включала 269 строк – данные для 70 станций, на которых в разные годы были отобраны пробы илов для химического анализа.

В работе использовали также архивные данные по показателям макрозообентоса за 2000–2013 гг. (Свидетельство о государственной регистрации баз данных № 2012620882): общая численность (N общ.) и биомасса макрозообентоса (B общ.), а также численность и биомасса трех его основных групп – амфипод (N amph., B amph.), олигохет (N olig., B olig.) и хирономид (N chir., B chir.). Эти три группы вместе составляют до 80–90 % общих показателей сообщества глубоководного бентоса (Полякова, 1998; 1999; Рябинкин, Полякова, 2008; Полякова, 2010). В матрицу анализируемых данных была также внесена глубина станции, на которой отбирали пробы зообентоса. Всего матрица включала 419 строк в соответствии с количеством проб бентоса, отобранных на 50 станциях в течение 2000–2013 гг.

Методы

Методы биотестирования донных отложений

Согласно методикам (Основы экогеологии…, 2004; Томилина, 2000; Жмур, 2001), из образцов проб донных отложений получали их водную вытяжку, которую подвергали биотестированию. В лаборатории донные отложения пропускали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Затем илы объемом 100 мл помещали в сосуды, в которые небольшими порциями добавляли чистую онежскую воду (отобранную в центральном районе озера) объемом 100 мл. Таким образом, объемное соотношение илов и воды составило 1:1. Смесь ила и воды оставляли на стабилизацию на 7 суток при температуре 17 ºС. Затем сливали надосадочную жидкость, аэрировали ее в течение 10 минут и помещали в нее тест-объекты. В качестве тест-объекта применяли планктонного рачка *Ceriodaphnia affinis* Lillijeborg, культура которого была любезно предоставлена сотрудниками Института биологии внутренних вод РАН в 2009 г. Этот вид в дальнейшем культивировался на базе лаборатории гидробиологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. Культуру рачков кормили одноклеточными зелеными водорослями *Scenedesmus quadricauda*. В работе И. И. Томилиной (2000) показано, что вид *Ceriodaphnia affinis* является оптимальным тест-объектом для оценки токсичности водной вытяжки донных отложений.

Продолжительность опытов по биотестированию водных вытяжек донных отложений Онежского озера составила 5 сут. Все опыты проводили при температуре воды 19.5–21 °С. В опытах использовали 3-дневых рачков, которых во время 5-суточного опыта не кормили. Опыты ставили в двух повторностях. В каждый сосуд помещали по 5 рачков. Плотность посадки рачков составляла 10–18 мл среды на одного рачка. В качестве контроля использовали два варианта: грунтовая вода (pH = 8.02), используемая для культивирования рачков *Ceriodaphnia affinis*, и вода из центрального района Онежского озера (pH = 7.54), применяемая для приготовления вытяжки из илов. В связи с большим количеством проб опыты ставили сериями. Всего было поставлено 9 последовательных серий опытов, каждая из которых имела свой контроль. Выживаемость рачков в контроле 100 %. Всего в экспериментах по биотестированию надосадочной жидкости было использовано 1050 экз. цериодафний, в том числе в контрольных опытах – 110 экз. рачков.

Методы химического анализа илов

Одновременно с биотестированием выполняли химический анализ илов, отобранных в 2014 г. Спектрофотометрическим методом в илах определяли общее содержание серы (в процентах на сухой вес донных отложений) (Ринькис и др., 1987). Количество лигносульфонатов в пробах илов определяли спектрофотометрическим

методом по реакции с азотной кислотой (Khabarov, 2004). Содержание органического углерода в илах (Сорг.) – методом Тюрина (Аринушкина, 1961), содержание общего азота, общего фосфора – спектрофотометрически (Ванчиков и др., 1999). Кроме того, определяли pH надосадочной жидкости в обеих повторностях опытов.

В пробах донных отложений, отобранных в 2001–2013 гг., потенциометрическим методом определялись величины pH (стеклянный электрод) и Eh (Pt электрод, медиатор ОЭДФК). Определение естественной влажности, пористости, потери при прокаливании 550 °С (ППП) проводили гравиметрическими методами. Органический углерод (С орг.) – методом Тюрина. Биогенные элементы определялись после сжигания сухого грунта в серной кислоте (метод Кьельдаля), фосфор общий фотометрическим методом с молибдатом аммония и аскорбиновой кислотой, l = 890 нм (РД 52.24.382-95), азот органический – методом Конвея с титриметрическим окончанием (NaOH). Азот аммонийный определяли микродиффузионным методом Конвея. Содержание железа и марганца определялось в кислых экстрактах, полученных при кипячении грунта естественной влажности в 1N H_2SO_4, фотометрическими методами: Fe – с о-фенантролином, l = 510 нм (РД 52.24.382-95.), Mn – с формальдоксимом, l = 450 нм (РД 33-5.3.03-96) (Аринушкина, 1982).

При статистической обработке данных использовали корреляционный анализ и метод главных компонент (Коросов, 1996; Ивантер, Коросов, 2003; Шитиков и др., 2005).

Результаты

По результатам биотестирования илов Онежского озера были выявлены три группы проб с разной токсичностью надосадочной жидкости: высокая токсичность (выживаемость рачков – 0–40 %); средняя (50–70 %); отсутствие токсичности (80–100 %). Большинство станций с токсичными пробами оказались приурочены к загрязняемым заливам – Кондопожской губе, Петрозаводской губе и северному участку Повенецкого залива. Именно здесь расположены основные источники загрязнения Онежского озера. Общая картина распределения илов с разной токсичностью представлена на рис. 2.

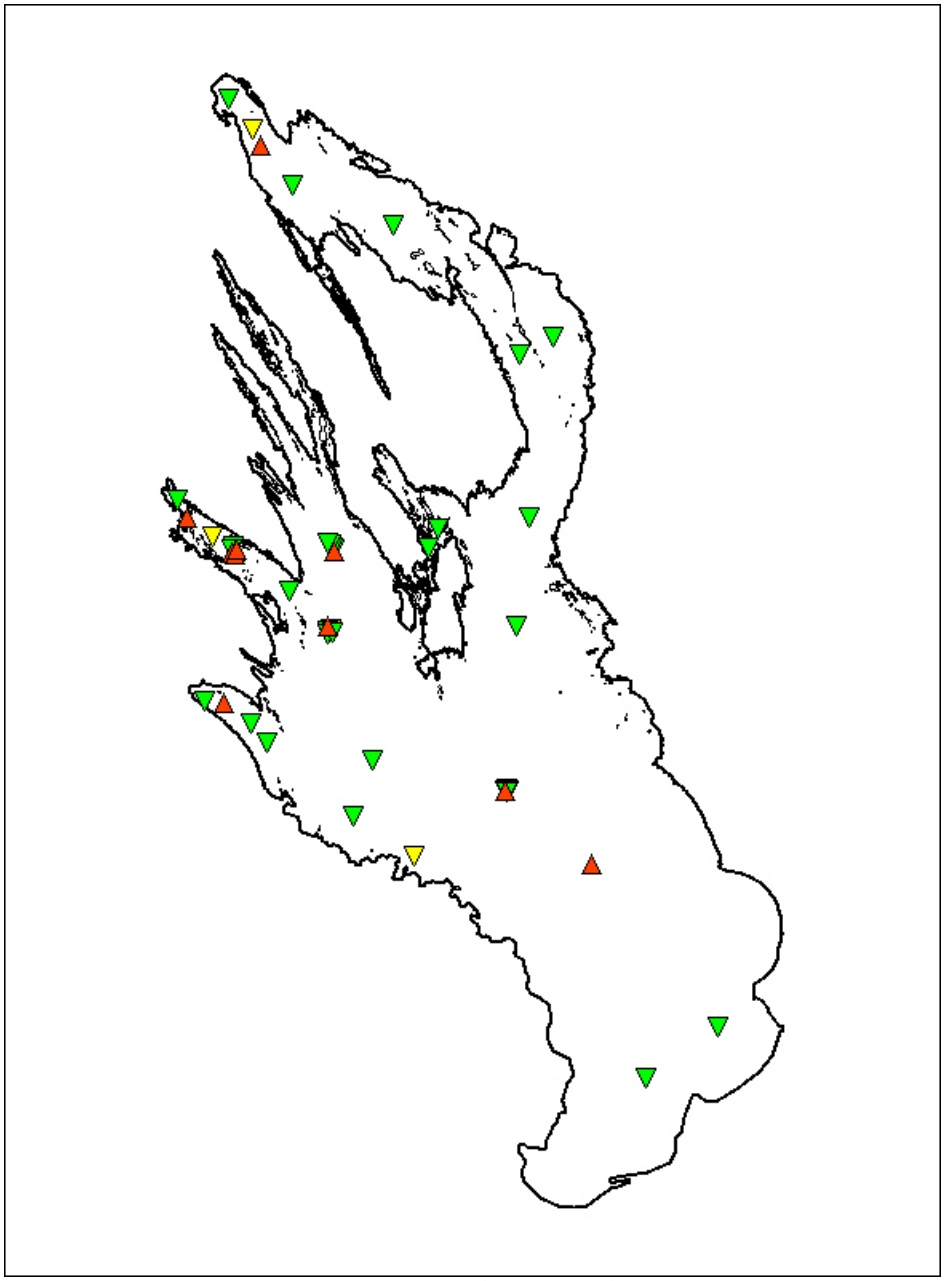

Рис. 2. Расположение станций отбора проб илов с разной токсичностью надосадочной жидкости; красный цвет – высокая токсичность; желтый цвет – средняя; зеленый цвет – отсутствие токсичности

Fig. 2. Location of station for bottom sediments sampling with different toxicity of supernatant liquid: red – high toxicity; yellow – average toxicity; green – no toxicity

Повторяемость данных по токсичности тестируемых образцов надосадочной жидкости (в пределах двух повторностей) высокая. Оценка повторяемости данных была выполнена с применением критерия $\chi 2$ (Шитиков и др., 2005). С этой целью каждой пробе была присвоена оценка в баллах: высокая токсичность – 1 балл; средняя – 2 балла; отсутствие токсичности – 3 балла. Строили таблицу сопряженности между показателями токсичности в баллах для двух повторностей (табл. 1). По величине критерия $\chi 2$ (25.8) между показателями токсичности в двух повторностях существует достоверная ($p < 0.05$) связь. Следовательно, независимая оценка токсичности илов на каждой станции в двух повторностях совпадает, что достоверно свидетельствует о существовании факторов токсичности, вызывавших гибель рачков в надосадочной жидкости.

Таблица 1. Таблица сопряженности, основанная на показателях токсичности

(баллы) первой повторности опытов (столбцы) и второй повторности (строки)

		Классы токсичности проб во второй повторности			Итог по строкам
Классы токсичности проб в первой повторности		**1**	**2**	**3**	
	1	6	1	2	9
	2	2	2		4
	3	2	2	27	31
Итог по столбцам		10	5	29	44

Значения pH тестируемой надосадочной жидкости изменялись в пределах 4–7.9. Необходимо отметить, что между величинами pH надосадочной жидкости двух повторностей опытов также была обнаружена высокая достоверная корреляция (r = 0.8; $p < 0.05$). Это говорит о хорошей повторяемости данных, полученных при отборе проб двумя дночерпателями.

Наименьшие значения pH (от 4 до 5.8) надосадочной жидкости отмечаются на станциях в Кондопожской, Петрозаводской губах и Повенецком заливе (северная часть). Согласно данным Н. А. Белкиной (2007), пониженные значения pH донных отложений связаны с процессами разложения органических веществ. Нейтральные значения pH (от 6 и более) отмечаются в районах, не испытывающих непосредственного интенсивного антропогенного воздействия. Расположение станций с различными значениями pH надосадочной жидкости представлено на рис. 3.

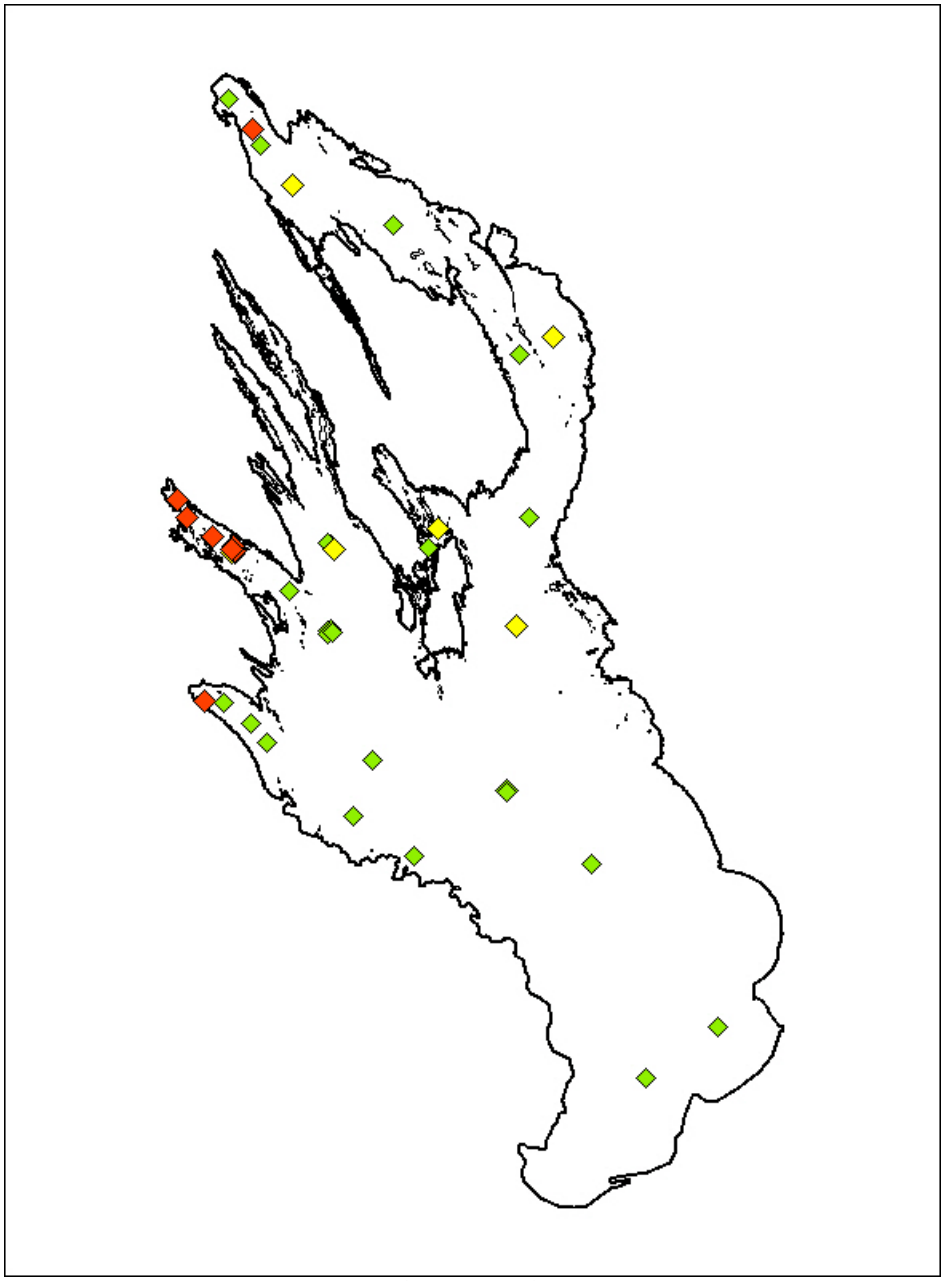

Рис. 3. Расположение станций отбора проб илов, надосадочная жидкость которых различалась по величине pH; красный цвет – значения pH от 4 до 5.8; желтый цвет – значения pH от 6 до 6.3; зеленый цвет – значения pH более 7.0

Fig. 3. Location of stations for bottom sediments sampling with different pH of supernatant liquid: red – pH from 4 to 5.8; yellow - pH from 6 to 6.3; green – pH over 7.0

Как правило, наиболее токсичные пробы илов характеризовались наименьшими значениями pH, что объясняется их приуроченностью к вершинным участкам загрязняемых заливов, где происходит интенсивная трансформация органических веществ (см. рис. 2, 3).

Однако достоверная корреляция между показателями токсичности проб и значениями pH отсутствовала (рис. 4). Это связано с тем, что токсичные пробы илов были обнаружены не только в загрязняемых районах озера, но и в центральной его части, не испытывающей прямого антропогенного воздействия. На рис. 4 эти станции представлены точками, локализованными в красном круге. В числе этих станций: станции B1 и B2 (Большое Онего), C1 и C4 (Центральное Онего) (см. рис. 1). В то же время для этих токсичных образцов надосадочной жидкости были характерны высокие значения pH, что и нарушало корреляцию между двумя показателями.

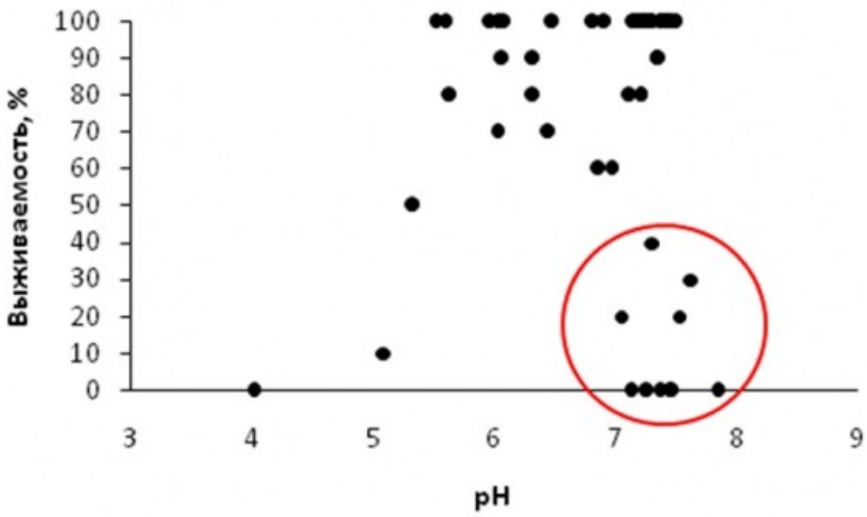

Рис. 4. Соотношение между значениями pH и показателями выживаемости рачков в надосадочной жидкости; красным кружком указаны пробы из центральных районов Онежского озера

Fig. 4. The relationship between pH values and crustaceans survival rates in supernatant liquid; red circle shows samples from the central areas of Lake Onega

Для объяснения причин высокой токсичности проб илов Онежского озера были привлечены данные по их химическому составу (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав илов Онежского озера (% от сухого веса), данные 2014 г. (цит. по Kalinkina et al., 2015)

Район	Показатели	Органический углерод	Общая сера	Общий фосфор	Общий азот
Кондопожская губа	Среднее	4.85	0.31	0.24	0.49
	Min	1.59	0.15	0.17	0.29
	max	14.66	0.58	0.35	1.06
Петрозаводская губа	Среднее	1.67	0.14	0.15	0.23
	Min	0.54	0.08	0.06	0.17
	max	2.68	0.17	0.22	0.28
Повенецкий залив	Среднее	4.01	0.12	0.16	0.2
	Min	0.31	0.1	0.11	0.18
	max	7.35	0.13	0.2	0.24
Большое Онего	Среднее	1.92	0.15	0.26	0.3
	Min	0.91	0.11	0.13	0.1
	max	4.07	0.18	0.43	0.46
Центральное Онего	Среднее	3.88	0.16	0.19	0.28
	Min	2.31	0.13	0.14	0.2
	max	5.5	0.18	0.25	0.35

Исследования химического состава илов показали, что в районе Кондопожской

губы Онежского озера отмечаются наибольшие концентрации азота, фосфора, серы общей, а также именно здесь обнаружен лигносульфонат натрия, основной компонент сточных вод Кондопожского ЦБК (0.03–0.059 % от сухого веса). В Кондопожской губе обнаружены высокие концентрации органического веществ (С орг.). Все эти показатели отражают влияние целлюлозно-бумажного комбината, который уже более 80 лет сбрасывает свои сточные воды в этот залив. Повышенная концентрация серы в донных отложениях Кондопожской губы связана с поступлением сточных вод целлюлозно-бумажного комбината, расположенного в вершинной части Кондопожского залива, для разрушения лигнина. Таким образом, токсичность илов, отобранных из района Кондопожской губы, связана именно с присутствием в надосадочной жидкости загрязняющих веществ, накопившихся в илах загрязняемого залива.

Токсичная проба была обнаружена также в Петрозаводской губе (станция Р2) (см. рис. 1). Эта станция является глубоководной (глубина 26.7 м) и расположена напротив порта г. Петрозаводска. Возможно, этот район залива накапливает загрязняющие вещества, поступающие с территории г. Петрозаводска, что и отразилось на токсичности пробы илов. Токсичные илы были обнаружены на двух близко расположенных станциях в вершинной части Повенецкого залива (станции W1 и W2). Выживаемость рачков в надосадочной жидкости, полученной из илов со станции W1, варьировала в пределах 50–70 %, со станции W2 – 0–40 %. Эти станции характеризуются наибольшими глубинами (80–85.5 м) и находятся достаточно близко к побережью. По-видимому, токсичность отобранных здесь илов определяют сточные воды г. Медвежьегорска, загрязняющие вещества которых накапливаются в этой глубоководной части Повенецкого залива.

Наибольший интерес представляют станции из центральных глубоководных районов Онежского озера, которые не испытывают прямого антропогенного воздействия. Тем не менее здесь были обнаружены илы, надосадочная жидкость которых проявила высокую токсичность. Так, в районе Большого Онего на станции В1 (см. рис. 1) в надосадочной жидкости наблюдалась полная гибель рачков в двух повторностях. На расстоянии около сотни метров от станции В1, т. е. на станциях В1-1–В1-6, илы были нетоксичны. Другая высоко токсичная проба илов была обнаружена на станции В2-2 (выживаемость 20 %). Показатели выживаемости рачков в надосадочной жидкости из илов на станции В2-1 варьировали в пределах 40–90 %. В Центральном Онего высокую токсичность (полная гибель рачков) проявили пробы со станции С1-4 и С4. Средней токсичностью характеризовалась проба со станции С1-1 (выживаемость рачков 69–70 %). Токсические свойства проявила проба илов со станции С25: в одной из повторностей выживаемость рачков составила 30 %. Сходная ситуация наблюдалась нами в 2013 г., когда в надосадочной жидкости из илов со станции В1 (залив Большое Онего) выживаемость цериодафний составила 20 %. В 2013 г. токсические свойства проявили также илы со станции С1 в Центральном Онего (выживаемость 50 %).

Объяснение высокой токсичности проб илов из центральных глубоководных районов Онежского озера можно найти, если обратиться к архивным данным по химического составу донных отложений за 2001–2013 гг. При статистическом анализе этих данных были использованы следующие показатели физико-химического состава илов: окислительно-восстановительный потенциал Eh (mv), pH, влажность, пористость, содержание органического углерода (С орг.), потери при прокаливании (ППП), содержание аммонийного азота N (NH4), общего азота (N общ.), общего железа (Fe общ.), общего марганца (Mn общ.) и общего фосфора (P общ.). Результаты компонентного анализа представлены в табл. 3. Информативность первой и второй компоненты составила 35 % и 20 % соответственно, что отражает высокую связь между изучаемыми показателями.

В первую главную компоненту наибольший достоверный вклад внесли показатели содержания в илах органического вещества – содержание органического углерода, потери при прокаливании, а также тесно и прямо пропорционально связанные с ними показатели пористости и влажности илов. С достоверным вкладом в

первую компоненту вошли также показатели содержания общего азота.

Таблица 3. Факторные нагрузки признаков (глубина и показатели физико-химического состава илов) в значения главных компонент

Признак	Первая компонента	Вторая компонента
Глубина, м	–0.13	–0.61
Eh, mv	0.28	–0.48
pH	0.07	0
Влажность, %	–0.83*	–0.27
пористость	–0.69*	–0.16
Сорг, %	–0.82*	0.43
ППП	–0.88*	0.24
N (NH4), %	–0.58	0.35
N общ., %	–0.81*	0.32
Fe общ., %	–0.38	–0.74*
Mn общ., %	–0.28	–0.6
P общ., %	–0.49	–0.6
Доля в общей дисперсии, %	35	20

Примечание: * – значимый вклад (p = 0.05)

Исходные данные по физико-химическому составу илов были ранжированы по величине первой главной компоненты. Всего были выделены три выборки данных. Распределение станций по трем выборкам, согласно ранжированию, представлено на рис. 5.

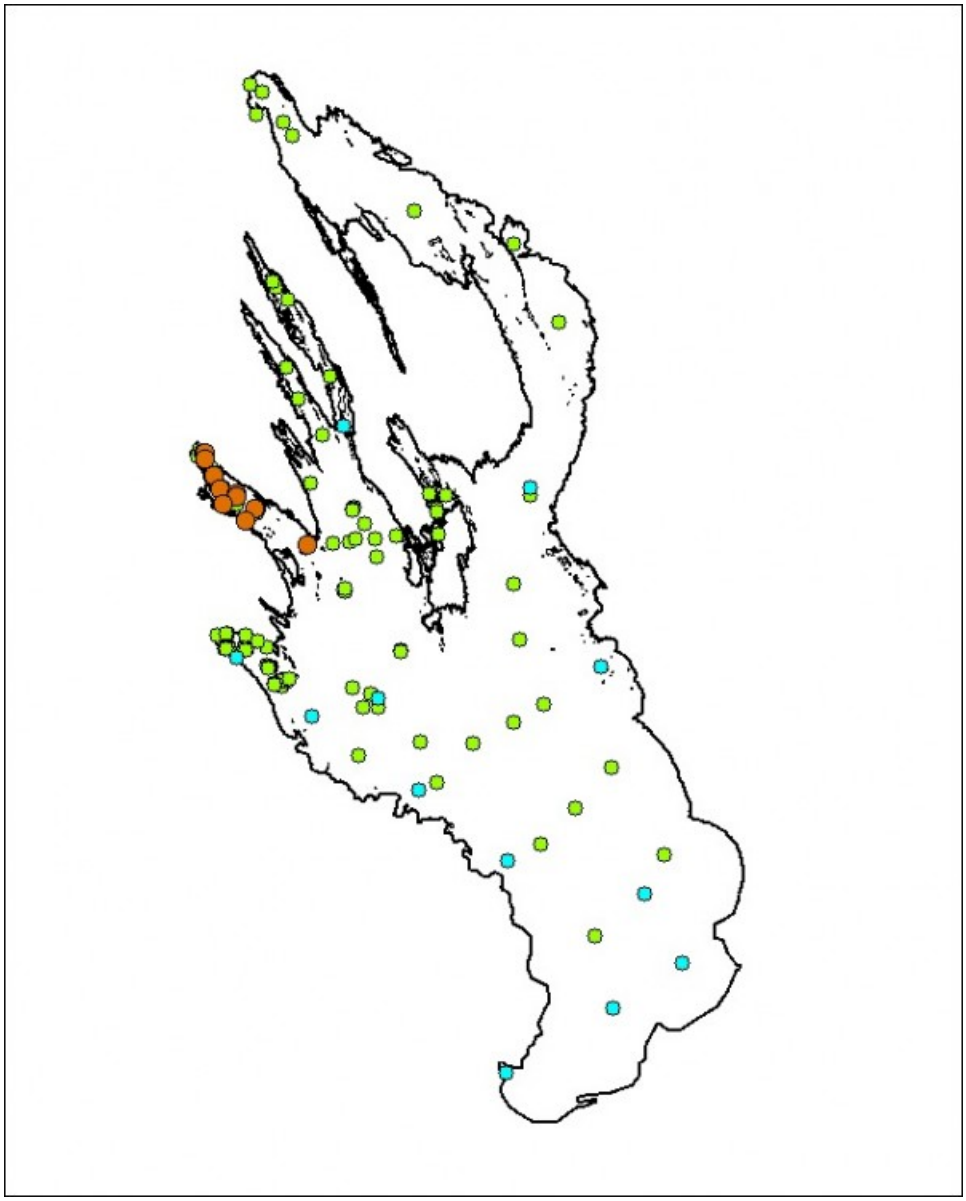

Рис. 5. Расположение станций, ранжированных по величине первой главной компоненты (коричневый цвет – 1-я выборка; зеленый цвет – 2-я выборка; голубой цвет – 3-я выборка)

Fig. 5. Location of stations ranked by the value of the first principal component (brown – 1st sample; green - 2nd sample; blue - 3rd sample)

Первая выборка станций (коричневый цвет на карте) характеризуется наибольшим значением всех показателей, внесших достоверный вклад в первую компоненту. Как видно, эти станции приурочены к Кондопожской губе, испытывающей максимальное антропогенное воздействие (сброс сточных вод Кондопожского ЦБК с высоким содержанием органических веществ). Этот залив интенсивно эвтрофируется, что и определяет высокую концентрацию азота в донных отложениях. Станции из второй выборки (зеленый цвет на карте) встречаются в Петрозаводской губе. Этот залив также эвтрофируется, но в меньшей степени, чем Кондопожская губа. В Петрозаводской губе содержание органического вещества в илах достаточно высокое, но в целом меньше, чем в Кондопожской губе. Повышенные уровни органического вещества (станции второй выборки) отмечаются в глубоководных участках, т. е. аккумулятивных зонах озера. Наконец, станции третьей выборки (голубой цвет на карте) приурочены в основном к прибрежным участкам, что отражает их транзитную роль в отношении транспорта органического вещества с водосборной территории вглубь озера. Таким образом, первая главная компонента интегрально отражает

содержание в илах органического вещества и общего азота антропогенного и природного происхождения.

Наибольший интерес представляет вторая главная компонента, достоверный вклад в которую внес единственный показатель – содержание общего железа. Станции с исходными данными были ранжированы по величине второй главной компоненты, разделены на две выборки и нанесены на карту (рис. 6).

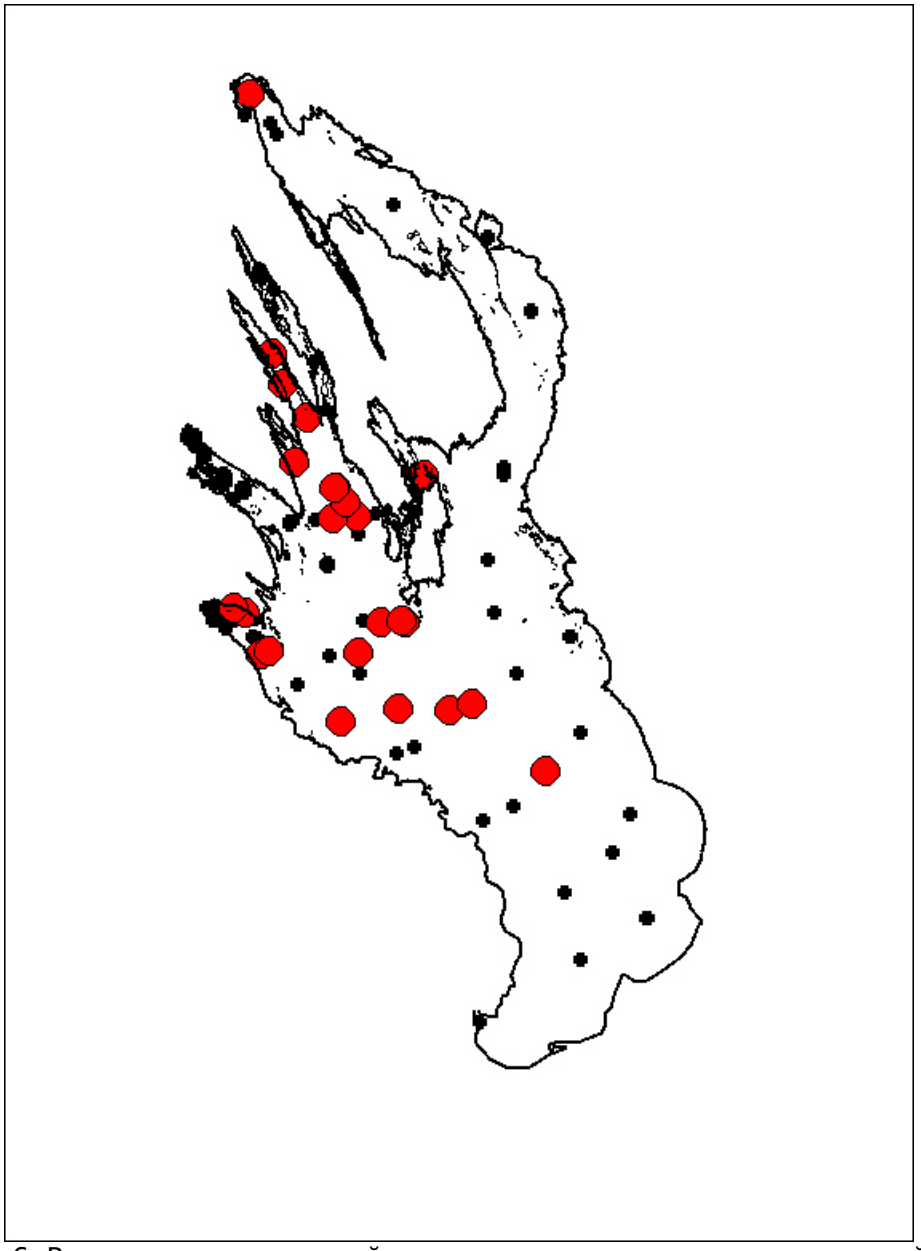

Рис. 6. Расположение станций, ранжированных по величине второй главной компоненты (красный цвет – 1-я выборка; черный цвет – 2-я выборка)

Fig. 6. Location of stations ranked by the value of the second principal component (red – 1st sample; black – 2nd sample)

Максимальное содержание железа характерно для станций первой выборки. Средняя величина содержания железа в илах на этих станциях составляет 7.97 ± 0.85 %; доверительный интервал при уровне значимости 0.05 – 7.12 ÷ 8.82 %. В первую выборку вошли станции, расположение абсолютного большинства которых приурочено к центральному профундальному району озера (см. рис. 6). Высокое содержание железа также характерно для Петрозаводской губы, Лижемской и Уницкой губ, Кижских шхер и вершинной части Повенецкого залива.

Вторая выборка станций (их большинство) характеризуется достоверно меньшим

содержанием железа: средняя – 4.09 %, доверительный интервал при уровне значимости 0.05 – 3.86 ÷ 4.32 %. Эти станции встречаются во всех районах озера. По данным химического анализа седиментов, практически все дно озера в той или иной степени обогащено соединениями железа. Более того, согласно исследованиям Н. А. Белкиной и др. (2010), содержание железа в илах Онежского озера на протяжении последних 25 лет возрастает.

Проведенный компонентный анализ позволил предложить гипотезу, объясняющую токсичность илов центрального района Онежского озера. Соединения железа могли поступать из илов в надосадочную жидкость и определять ее токсические свойства. По литературным данным (Стадниченко, 2014), высокая (до 50 %) смертность моллюсков *Planorbarius corneus* (L.) наблюдается при концентрации в воде сернокислого железа 9.5 мг/л при экспозиции опытов 2 сут. По нашим данным, смертность рачков *Ceriodaphnia affinis* в грунтовых водах с содержанием железа (II) 1.6–2.8 мг/л составила 30–50 % при экспозиции 3 сут. Близкие или большие концентрации железа, по-видимому, наблюдались в надосадочной жидкости из илов центрального района, что и привело к гибели рачков.

Нельзя исключать также эффектов совместного действия на рачков железа и марганца, характерного элемента, которым также обогащены илы Онежского озера. Возможно, токсичность илов обусловливает совокупное действие микроэлементов (железо, марганец, медь и другие), которыми богата геохимическая провинция (Фенноскандия), в пределах которой располагается Онежское озеро.

Результаты биотестирования илов (обнаруженная высокая токсичность илов в центральном районе Онежского озера) и данные химического состава илов позволили предложить гипотезу о существовании особой зоны в глубоководных районах озера. В пределах данной зоны развитие сообществ макрозообентоса лимитировано токсическим фактором природного происхождения (высоким содержанием железа, возможно, некоторых микроэлементов).

Эта гипотеза была проверена при анализе данных по состоянию макрозообентоса. Для этих целей был выполнен компонентный анализ данных за 2000–2013 гг., которые включали показатели общей численности (N общ.) и биомассы макрозообентоса (B общ.), а также численность и биомассу трех его основных групп – амфипод (N amph., B amph.), олигохет (N olig., B olig.) и хирономид (N chir., B chir.).

Результаты компонентного анализа показали, что между изучаемыми признаками существует тесная связь: доля от общей дисперсии, которая пришлась на первые две компоненты, составила 64 % (табл. 4).

Таблица 4. Факторные нагрузки признаков (глубина станции и показатели сообществ макрозообентоса) в значения главных компонент

Признак	Первая компонента	Вторая компонента
Глубина,м	–0.29	–0.32
N общ., тыс. экз./м^2	0.90*	0.17
B общ., г/м^2	0.83*	–0.46
N amph., тыс. экз./м^2	0.21	–0.90*
B amph., г /м^2	0.25	–0.91*
N olig., тыс. экз./м^2	0.84*	0.27
B olig., г /м^2	0.85*	0.04
N chir., тыс. экз./м^2	0.33	0.38
B chir., г /м^2	0.55	0.3

Доля в общей дисперсии, %	39	25

Примечание: * – значимый вклад (p = 0.05)

В первую главную компоненту с достоверными факторными нагрузками вошли следующие показатели: общие численность и биомасса, численность и биомасса олигохет. Во вторую главную компоненту с достоверными факторными нагрузками вошли показатели численности и биомассы амфипод.

На рис. 7 представлено расположение проб в осях двух первых главных компонент. Область точек на графике представляет собой изогнутую фигуру.

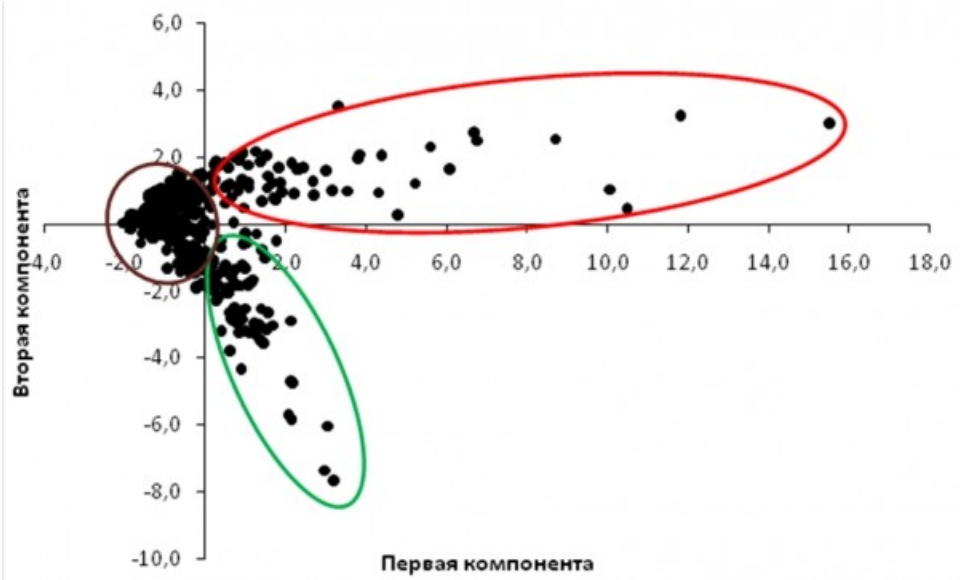

Рис. 7. Расположение проб макрозообентоса, отобранных в 2000–2013 гг., в осях двух главных компонент; по оси абсцисс – значения первой компоненты, по оси ординат – значения второй компоненты; в границах эллипсов: красный цвет – группа 1; зеленый цвет – группа 2; коричневый цвет – группа 3

Fig. 7. Location of macrozoobenthos samples obtained from 2000 to 2013, on the axes of two main components; on the abscissa – the value of the first component, on the ordinate – values of the second component; in ellipses: red – group 1; green – group 2; brown – group 3

Верхняя ветвь изогнутой фигуры расположена вдоль оси абсцисс (показана эллипсом красного цвета, группа 1). В пробах, соответствующих верхней ветви фигуры, слева направо возрастают общие показатели развития бентоса и тесно связанные с ними показатели олигохет. Расположение станций, на которых были отобраны пробы из первой группы, приурочено к районам интенсивного антропогенного воздействия (рис. 8).

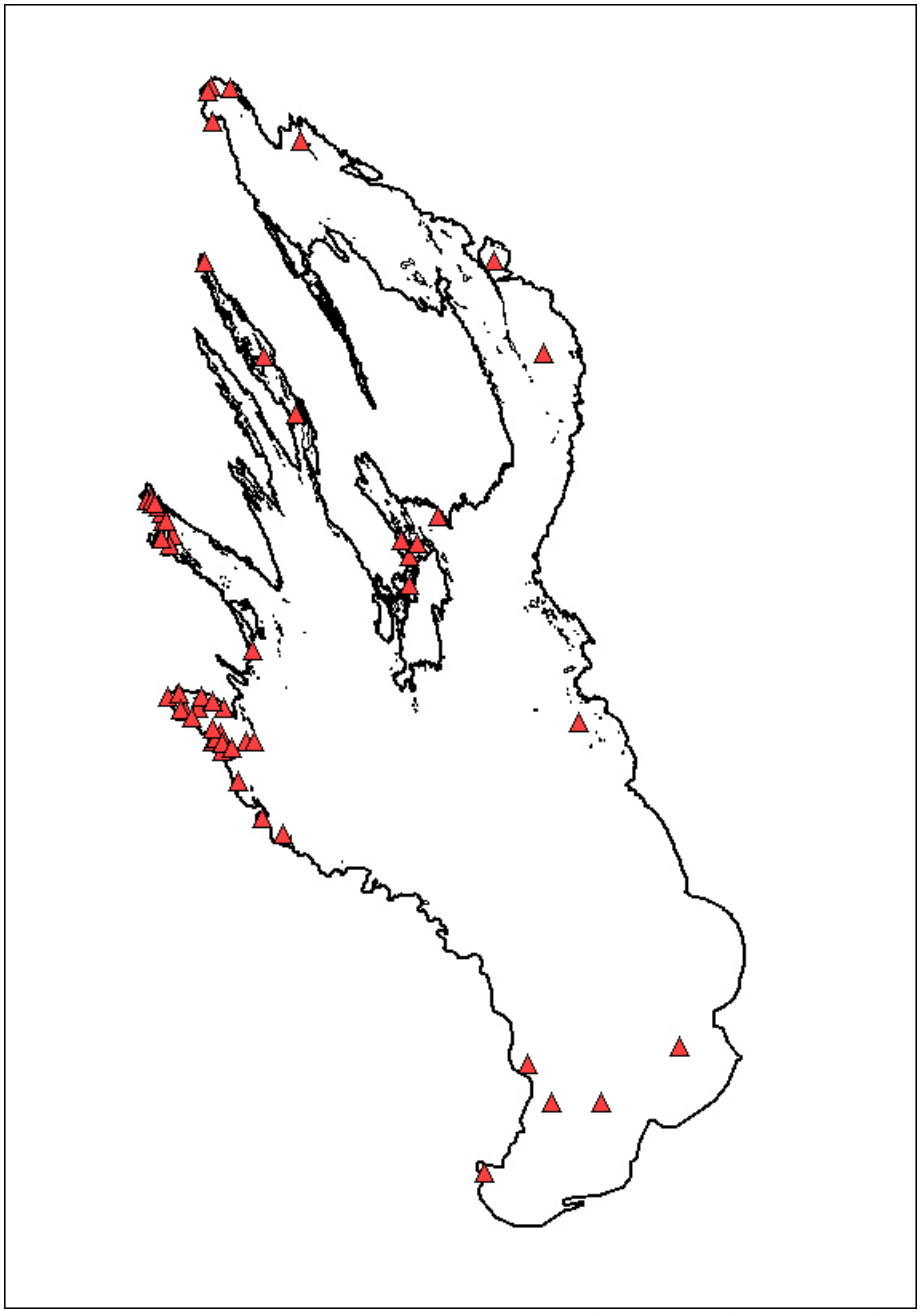

Рис. 8. Расположение станций, на которых были отобраны пробы группы 1 (угнетение амфипод и интенсивное развитие олигохет в результате действия антропогенного фактора)

Fig. 8. Location of stations where the samples of the group 1 were obtained (inhibition of amphipods and intensive development of oligochaetes as a result of anthropogenic factor)

Из 177 проб, которые вошли в первую группу, 138 проб (78 %) были отобраны на станциях, которые располагались в вершинной и серединной части Кондопожской губы, загрязняемой сточными водами ЦБК. Именно в этом районе олигохеты занимают доминирующее положение за счет практически единственного их представителя – Tubifex tubifex. В то же время здесь не обнаруживаются амфиподы или их численность крайне мала. В эту же группу входят пробы на станциях, где бентос отсутствует (так называемая мертвая зона в Кондопожской губе).

Станции, принадлежащие к первой группе, располагаются также в Петрозаводской губе в районе водозабора и сброса сточных вод г. Петрозаводска, в Повенецком заливе. В эту группу вошли также пробы со станций, расположенных в Кижских шхерах, испытывающих влияние водного транспорта, часто курсирующего в этом районе озера в связи с туристической привлекательностью острова Кижи.

Результаты компонентного анализа позволили выделить вторую группу станций. На рис. 7 она показана эллипсом зеленого цвета, а именно, нижняя ветвь изогнутой фигуры. Расположение станций, на которых были отобраны пробы из второй группы, представлено на рис. 9.

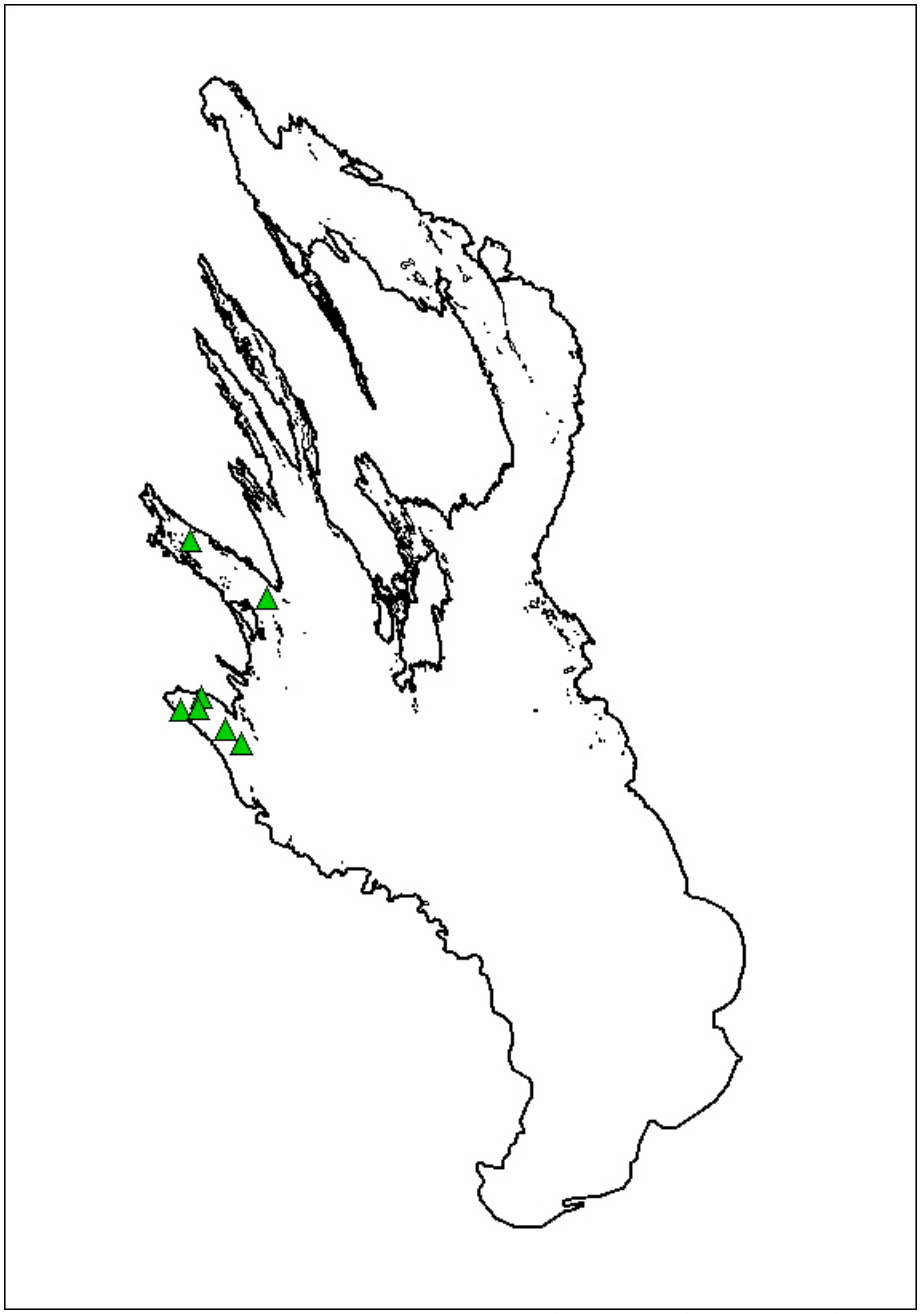

Рис. 9. Расположение станций, на которых были отобраны пробы группы 2 (зона стимуляции развития амфипод)

Fig. 9. Location of stations where the samples of the group 2 were obtained (stimulation of the amphipods development)

Практически все пробы (19 из 21) были отобраны на станциях в Петрозаводской губе Онежского озера, лишь 2 станции находятся в Кондопожской губе (см. рис. 8). Наиболее характерной чертой сообществ бентоса на этих станциях является резкое доминирование амфипод, которые достигают здесь наивысшего по сравнению с остальными районами озера развития.

Наконец, третья группа станций, которая была обнаружена в результате компонентного анализа данных по макрозообентосу, ограничена кругом коричневого цвета (см. рис. 7) и представляет вершину изгиба фигуры. Третья группа проб бентоса

была отобрана на станциях, расположенных, главным образом, в глубоководных районах, включая Центральное Онего, Большое Онего, глубоководные участки Повенецкого залива, Уницкой и Лижемской губ (рис. 10). Этот район характеризуется наименьшими показателями численности всех групп бентоса.

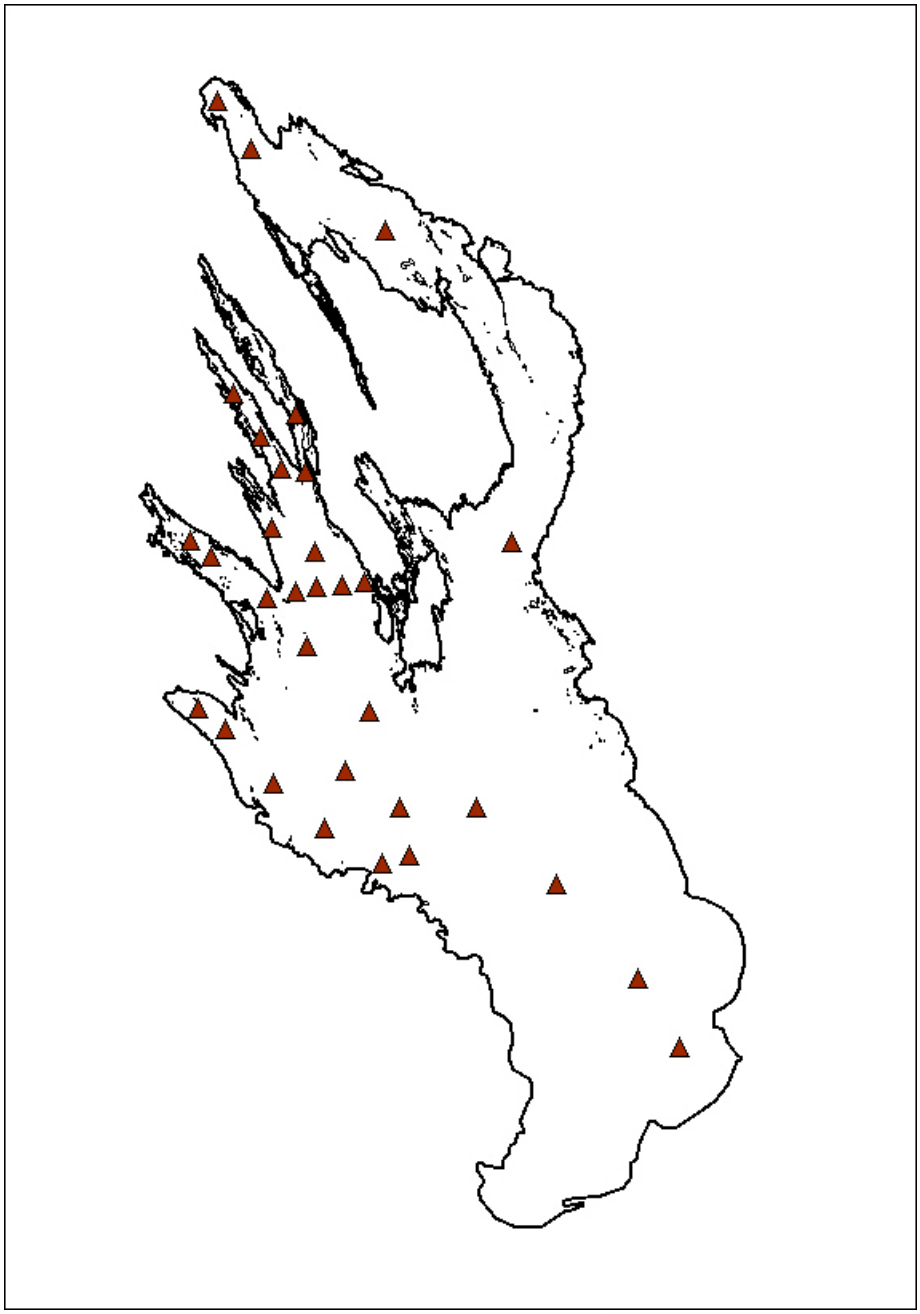

Рис. 10. Расположение станций, на которых были отобраны пробы группы 1 (лимитирование развития организмов макрозообентоса за счет действия токсического фактора природного происхождения)

Fig. 10. Location of stations where the samples of the group 3 were obtained (limiting macrozoobenthos development by a toxic factor of natural origin)

В табл. 5 представлены средние характеристики бентоса, отражающие характерное состояние макрозообентоса в трех зонах озера, соответствующих трем группам проб.

Таблица 5. Средние значения общей численности и основных групп макрозообентоса для трех зон дна Онежского озера

	Зона			
	1а	1б	2	3
Показатель	Сильнейшая деградация, включая «мертвые зоны»	Интенсивное антропогенное воздействие	Интенсивное развитие амфипод (барьерные зоны)	Глубоководные участки
Общая численность	1.27	11.97	6.05	1.17
Численность амфипод	0	0.2	3.62	0.39
Численность олигохет	0.6	10.35	2	0.67
Численность хирономид	0.72	0.88	0.37	0.11

В **первой зоне** проявляется интенсивное антропогенное воздействие (см. рис. 8). В пределах этой зоны выделяются две области по такому ключевому признаку, как отсутствие (1а) или присутствие (1б) в пробах амфипод. К первой зоне приурочена так называемая мертвая зона, где бентос отсутствует. Этот район находится в вершинной части Кондопожской губы, вблизи выпуска сточных вод ЦБК. В этой зоне отмечается резкое преобладание более резистентных форм – олигохет.

Для **второй зоны** наиболее характерной чертой сообществ бентоса является резкое доминирование амфипод, которые достигают здесь максимального развития. Вторая зона имеет разорванный ареал (см. рис. 9). Отдельные ее участки приурочены к открытым районам заливов – Кондопожской и Петрозаводской губ. Здесь складываются своеобразные барьерные условия, при которых накопление органического вещества сочетается с положительным влиянием озерных вод, способствующих формированию окислительных условий. Именно поэтому здесь сформировались оптимальные условия для развития амфипод. Кроме того, нельзя исключать влияния подземных вод, характерных для Петрозаводской губы (Пальшин, 1999). Подземные воды увеличивают показатели минерализации в придонных слоях воды, что важно для морских гляциальных реликтов, к которым относится монопорея.

Третья зона приурочена к наиболее глубоководным участкам Онежского озера (см. рис. 10). В этой зоне отмечаются весьма низкие показатели развития всех групп бентоса (амфипод, олигохет, хирономид). Согласно нашей гипотезе, именно для этого района характерны условия, лимитирующие развитие всех организмов макрозообентоса. Результаты биотестирования илов и данные химического состава седиментов позволили предположить, что причиной такого лимитирующего действия является токсический фактор природного происхождения (высокие концентрации железа, марганца и других микроэлементов в донных отложениях центральных глубоководных районов Онежского озера).

Обсуждение

По данным биотестирования илов, отобранных в Онежском озере в 2014 г., установлено, что большинство районов Онежского озера характеризуется нетоксичными донными отложениями. Наибольшее количество станций с токсичными илами расположено в районе Кондопожской губы, интенсивно загрязняемой сточными водами целлюлозно-бумажного комбината. Токсичность илов в Кондопожской губе связана с содержащимися в них загрязняющими веществами сточных вод (лигносульфонат, соединения серы). В Петрозаводской губе выявлена одна станция, где были обнаружены токсичные илы, – напротив порта г. Петрозаводска.

Впервые в центральном глубоководном участке Онежского озера (Большое Онего

и Центральное Онего) обнаружены илы, которые характеризуются токсичностью. Результаты биотестирования илов позволили предложить гипотезу о существовании особой зоны в центральной части Онежского озера, в которой развитие сообществ макрозообентоса лимитировано токсическим фактором природного происхождения. Гипотеза была подтверждена результатами анализа натурных наблюдений за состоянием макрозообентоса.

Статистический анализ данных по макрозообентосу Онежского озера за 2000–2013 гг. позволил выявить 3 зоны на дне озера, на которых показатели состояния донных сообществ различаются по соотношению групп бентоса. Первая зона приурочена к местам интенсивного антропогенного воздействия (Кондопожская, Петрозаводская губы, Повенецкий залив, Кижские шхеры). Вторая зона расположена, главным образом, в глубоководной части Петрозаводской губы, где наблюдается наиболее интенсивное развитие амфипод. Третья зона приурочена к центральной глубоководной части озера, а также Лижемской и Уницкой губам, где наблюдается лимитирование развития организмов макрозообентоса за счет действия токсического фактора природного происхождения.

Нами были сопоставлены показатели численности бентоса и содержания железа в илах из различных районов Онежского озера. Анализ натурных данных по общей численности бентоса в районах Онежского озера, не подверженных прямому антропогенному воздействию, показал, что наименьшая численность донных организмов наблюдается именно в центральных глубоководных районах, где содержание железа наибольшее. В районах с высоким содержанием железа в илах (7.12 ÷ 8.82 %) почти 90 % проб бентоса характеризовались показателями общей численности 2 тыс. экз./м^2 и менее. В то же время в районах с достоверно меньшим уровнем железа в илах (3.86 ÷ 4.32 %) около 50 % проб бентоса характеризовались численностью от 2 до 4 тыс. экз./м^2, в 30 % проб численность варьировала в пределах 4–6 тыс. экз./м^2. Следовательно, предположение об угнетающем действии соединений железа, марганца, других микроэлементов, сделанное на основе токсикологических исследований, подтвердилось данными натурных наблюдений за бентосом.

В литературе (Герд, 1949) давно отмечалось характерное для всех больших озер Фенноскандии угнетенное состояние организмов бентоса на коричневых рудоносных илах. Отмечается, что в илах, где встречаются марганцовистые конкреции, имеющие черный оттенок, рудные корки, резко сокращается численность представителей бентоса. С этой особенностью озер Карелии связана их низкая продуктивность. Подобная картина угнетения сообществ макрозообентоса на коричневых рудоносных илах отмечается и в водоемах Кольского полуострова (Кашулин и др., 2006). Однако причины столь низкой численности бентоса на рудоносных илах не приводились. Нами впервые экспериментально доказано существование токсического фактора природного происхождения, связанного с высоким содержанием в илах соединений железа и марганца, возможно, других микроэлементов. Именно этот фактор и ограничивает численность бентоса на рудоносных илах.

По литературным данным (Borodulina, Belkina, 2013), в глубоководных районах Онежского озера (залив Большое Онего, Уницкая губа) в придонном слое воды выделены зоны с аномальным распределением показателей (электропроводность, сульфаты, CO2, микрокомпоненты, pH). В районах субаквальной разгрузки обнаружены геохимические аномалии. Здесь в поверхностном слое донных отложений отмечается дифференциация микроэлементов (Zn, Ni, Cd, Cu, Pb) с их накоплением в твердой фазе и поровых водах. Возможно, токсическое действие илов, отобранных в Большом Онего, связано с геохимическими аномалиями в этом районе. В дальнейшем предстоит выяснить, какие микроэлементы, а также их сочетания определяют токсичность илов из центральных глубоководных районов Онежского озера.

Заключение

Биотестирование илов позволило установить, что большинство районов

Онежского озера характеризуются нетоксичными донными отложениями.

Наибольшее количество станций с токсичными илами расположено в районе Кондопожской губы, интенсивно загрязняемой сточными водами целлюлозно-бумажного комбината.

Впервые выявлен центральный глубоководный участок Онежского озера, илы которого обладают высокой токсичностью. Причины высокой токсичности илов из центральных районов озера связаны с высокими уровнями железа, марганца и других микроэлементов, что является геохимической особенностью Онежского озера.

На основе анализа данных по химическому составу донных отложений, результатов биотестирования и биоиндикации выполнено картирование дна Онежского озера и выявлены три зоны, в которых характеристики основных групп макрозообентоса различаются.

При проведении биомониторинга Онежского озера необходимо учитывать выявленные участки (три зоны), где состояние макрозообентоса различается. Для выявления тенденций изменения экосистемы Онежского озера необходимо сравнение зон не только между собой, но и выполнение анализа временных трендов для каждой зоны в отдельности.

Библиография

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв . М., 1982. 490 с.

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв . М.: МГУ, 1961. 491 с.

Белкина Н. А. Химический состав донных отложений // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 г. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. С. 40–49.

Белкина Н. А., Демидов И. Н., Лаврова Н. Б. Донные отложения // Онежское озеро: Атлас. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2010. С. 100–104.

Ванчиков Е. В., Кондратенок Б. М., Сталюгин В. В. Количественный фотометрический анализ . Сыктывкар, 1999. 36 с.

Герд С. В. Биоценозы бентоса больших озер Карелии . Петрозаводск: Издание Карело-финского госуниверситета, 1949. 197 с.

Жмур Н. С. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков, сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости цериодафний . М.: Акварос, 2001. 52 с.

Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию . Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 304 с.

Калинкина Н. М., Березина Н. А., Сидорова А. И., Белкина Н. А., Морозов А. К. Биотестирование токсичности донных отложений крупных водоемов Северо-запада России с использованием ракообразных // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 612–622.

Калинкина Н. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Тимакова Т. М., Чекрыжева Т. А. Биоиндикация загрязнения вод и донных отложений в Кондопожской губе Онежского озера // Геоэкология. 2011. № 3. С. 265–273.

Кашулин Н. А., Даувальтер Д. А., Ильяшук Б. П., Раткин Н. Е., Вандыш О. И. Современные подходы к оценке процессов трансформации пресноводных экосистем Севера // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований: Материалы юбилейной конференции, посвященной 15-летнему юбилею ИВПС. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2006. С. 197–218.

Коросов А. В. Экологические приложения компонентного анализа . Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1996. 152 с.

Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова, Н. М. Калинкиной, Т. П. Куликовой, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 375 с.

Онежское озеро. Экологические проблемы / Отв. ред. Н. Н. Филатов.

Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. 293 с.

Основы экогеологии, биоиндикации и биотестирования водных экосистем / Под ред. В. В. Куриленко. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 448 с.

Пальшин Н. И. Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава . Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. 86 с.

Полякова Т. Н. Донные ценозы в условиях антропогенного эвтрофирования // Онежское озеро. Экологические проблемы / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. С. 211–227.

Полякова Т. Н. Макрозообентос // Онежское озеро: Атлас. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2010. С. 119–121.

Полякова Т. Н. Макрозообентос. Онежское озеро // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1998. С. 64–67.

Ринькис Г. Я., Рамане Х. К., Куницкая Т. А. Методы анализа почв и растений . Рига: Зинатне, 1987. 174 с.

Рябинкин А. В., Полякова Т. Н. Макрозообентос озера и его роль в питании рыб // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. С. 67–91.

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.

Стадниченко А. П. Влияние сернокислого железа на быстрые поведенческие и физиологические реакции катушки роговой (Molluska: Gastropoda: Pulmonata) // Гидробиологический журнал. 2014. № 4. Т. 50. С. 45–50.

Стерлигова О. П., Китаев С. П., Ильмаст Н. В., Комулайнен С. Ф., Кучко Я. А., Павловский С. А., Савосин Е. С. Состояние заливов Онежского озера при товарном выращивании радужной форели // Поволжский экологический журнал. 2011. № 3. С. 386–393.

Сярки М. Т., Теканова Е. В. Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере // Известия РАН. Сер. Биологическая. 2008. № 5. С. 621–625.

Томилина И. И. Эколого-токсикологическая характеристика донных отложений водоемов Северо-Запада России: Автореф. дис. … канд. биол. наук . Борок, 2000. 22 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения . М.: Наука, 2005. Кн. 2. 337 с.

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения . Л.: Наука, 1990. 264 с.

Borodulina G. S., Belkina N. A. Study of the geochemical anomalies at the water-sediment boundary in subaqueous groundwater discharge zones in lake Onega // Book of abstract. 32nd congress of the international society of limnology. Budapest. August 4–9. Budapest, 2013. P. 191.

Burton G. A. Assessing the toxicity of freshwater sediments: annual review // Environmental Toxicology and Chemistry. 1991. Vol. 10. P. 1585–1627.

Chapman P. M. Pollution status of North Sea sediments – an international integrative study // Marine Ecology Progress Series. 1992. Vol. 91. P. 313–322.

Chapman P. M. The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation // Science of the Total Environment. 1990. Vol. 97–98. November. P. 815–825.

Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin, 1983. 316 p.

Kalinkina N. M., Sidorova A. I., Galibina N. A., Nikerova K. M. The toxicity of Lake Onego sediments in connection with the natural and anthropogenic factors influence // Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. June 18–20, 2015. Vol. 2. Rezekne: Rezeknes Augstskola, 2015. P. 124–127.

Khabarov Yu. G. Use of nitric acid for determination of lignosulfonates // Russian Journal of Applied Chemistry. 2004. Vol. 77. № 5. P. 858–860.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00766).

BIOASSAY OF LAKE ONEGO BOTTOM SEDIMENTS TOXICITY BASED ON THEIR CHEMICAL COMPOSITION AND DEEPWATER MACROZOOBENTHOS STATE

KALINKINA Nataliya Michailovna — *D.Sc., Northern Water Problems Institute, KRC RAN (Aleksander Nevsky st., 50 185030 Petrozavodsk, Republic of Karelia Russia), cerioda@mail.ru*

BELKINA Natalya Alexandrovna — *PhD, Northern Water Problems Institute, KRC RAN (Aleksander Nevsky st., 50 185030 Petrozavodsk, Republic of Karelia Russia), bel110863@mail.ru*

SIDOROVA Anastasiya Ivanovna — *PhD, Northern Water Problems Institute, KRC RAN (Aleksander Nevsky st., 50 185030 Petrozavodsk, Republic of Karelia Russia), bolt-nastya@yandex.ru*

GALIBINA Nataliya Alekseevna — *PhD, Forest Institute, KRC RAN (Pushkinskaya st., 11 185910 Petrozavodsk, Republic of Karelia Russia), galibina@krc.karelia.ru*

NIKEROVA Kseniya Mikhailovna — *Forest Institute, KRC RAN (Pushkinskaya st., 11 185910 Petrozavodsk, Republic of Karelia Russia), knikerova@yandex.ru*

Keywords: Deepwater macrozoobenthos, bioassay, bottom sediments, lake Onego, chemical composition

Reviewer: A. E. Veselov

Received on: 22 November 2016
Published on: 27 March 2017

Summary: The bioassay of the toxicity of bottom sediments sampled in different areas of Lake Onega was carried out by crustaceans biotesting (Ceriodaphnia affinis Lillijeborg). It was shown that in the most areas of Lake Onega there are non-toxic bottom sediments. Toxic bottom sediments were found in Kondopogskaya Bay, intensively polluted with pulp-and-paper mill wastewaters. For the first time in the deep central part of Lake Onega the area was revealed where the toxic bottom sediments contain a high content of iron, manganese and other trace elements typical for the central areas of the lake. The mapping of the bottom of Lake Onega was accomplished, and three zones were identified based on the analysis of the data concerning the chemical composition of bottom sediments, bioassay toxicity data and the results of the deepwater macrozoobenthos assessment. For each zone the parameters of the main groups of benthos (Amphipoda, Oligochaeta, Chironomidae) were defined. The first zone is located in the area of intensive anthropogenic influence (Kondopogskaya Bay, Petrozavodskaya Bay, Povenets Bay, Kizhi Skerries). The second zone is located mostly in the deep part of Petrozavodskaya Bay, where the most intensive development of amphipods is observed. The third area is identified for the first time: it is located in the central deep part of Lake Onega, where the communities of macrozoobenthos are limited by a natural toxic factor.