

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВЫГОЗЕРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА¹

© 2014 г. Н. А. Белкина

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

185030 Петрозаводск, просп. А. Невского, 50

E-mail: bel110863@mail.ru

Поступила в редакцию 01.11.2012 г.

Представлены многолетние наблюдения за химическим составом донных отложений Выгозерского водохранилища. Выявлены основные закономерности изменения состава, свойств осадков, современного состояния донных отложений. Показано, что изменение экологической ситуации на Выгозере повлияло на процессы седиментогенеза в водоеме.

Ключевые слова: донные отложения, химический состав, водохранилище, загрязнение сточными водами целлюлозно-бумажной промышленности.

DOI: 10.7868/S032105961403002X

Донные отложения (ДО) занимают особое положение в цепи круговорота вещества и энергии в водоеме, являясь одновременно накопителем и внутренним источником химических веществ. В них отражены любые изменения физико-географических и лимнологических условий в различные периоды существования озера, поэтому они могут рассматриваться в качестве индикатора его экологического состояния. Методы оценки состояния экосистемы водоема под воздействием антропогенных факторов, основанные на изучении ДО, разрабатывались многими учеными [7, 8, 10, 19, 24–26, 29, 34–37]. Изучение ДО водохранилищ – составная часть лимнологических исследований по выявлению экологических последствий создания искусственных водоемов. В монографиях [4, 9, 15, 14, 20] подробно описаны седиментационные процессы в водохранилищах, созданных во второй половине XX в. на реках России.

Выгозеро – крупное озеро на северо-западе России, оно существовало в естественном состоянии до 1931 г. В течение XX в. оно подверглось двум крупным антропогенным трансформациям: в 1933 г. оно было превращено в Выгозерское водохранилище и стало частью трассы Беломорско-Балтийского канала, в 1954 г. в связи со строительством гидроэлектростанций на р. Нижний

Выг водоем вошел в состав Выгозерско-Ондского водохранилища. Северный район Выгозера испытывает влияние сточных вод Сегежского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), действующего с 1938 г. В соответствии с этим исследование ДО этого водоема представляется особенно актуальным.

Цель данной работы – обобщение результатов многолетних исследований химического состава ДО Выгозерского водохранилища.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выгозерское водохранилище принадлежит к бассейну Белого моря. Площадь его водосбора – 16800 км². Высота над уровнем моря – 89.3 м БС. Котловина – тектонического генезиса. На водоеме имеется 529 островов общей площадью 126 км². В него впадают реки Сегежа, Верхний Выг, Вожма, Шоба, Викша, и др., вытекает р. Нижний Выг. Площадь зеркала Выгозерского водохранилища – 1140 км², длина береговой линии – 658 км, объем воды в озере – 6.46 км³, средняя глубина – 6.2 м, наибольшая глубина – 22 м, период условного водообмена – 1.14 года [13].

В соответствии с морфологией озерной котловины и динамикой вод Выгозерское водохранилище делится на части: южную (озерно-речные системы, вошедшие в состав водохранилища в период затопления, – станции 210, 312), юго-во-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект РФФИ-Север №08-05-988811).

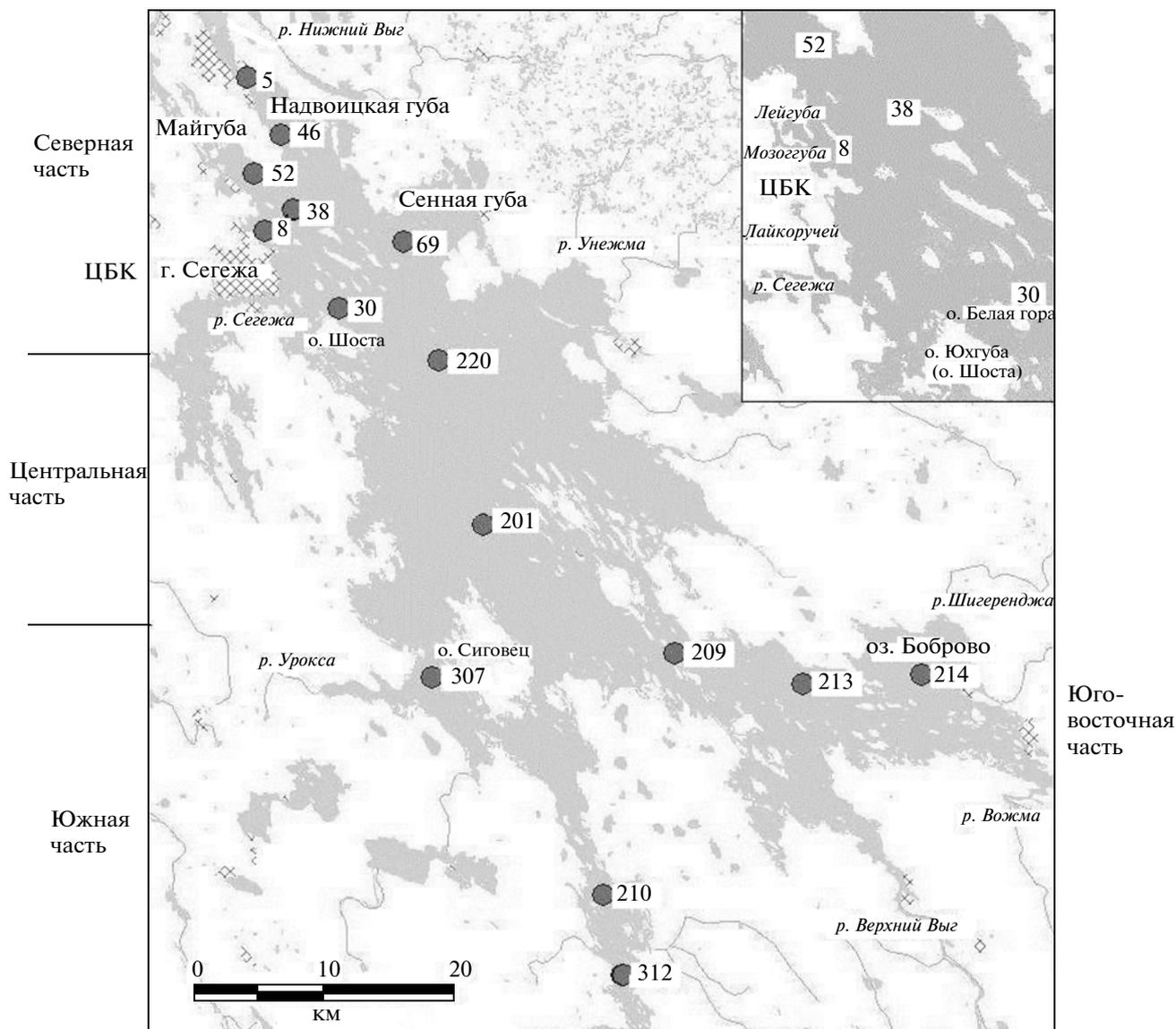


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб ДО Выгозерского водохранилища (числа на карте – номера станций).

сточную (место впадения рек Верхний Выг, Вожма, Тянукса, оз. Боброво – станции 209, 213, 214), центральную (станции 201, 220) и северное Выгозеро, в свою очередь делящееся на районы – восточный (Сенная губа, Надвоицкий зал. – станции 5, 46, 69) и западный, испытывающий влияние сточных вод Сегезжского ЦБК (станции 8, 30, 38, 52) (рис. 1). По гидрохимическим характеристикам южная и юго-восточная части водохранилища относятся к мезополигумусным слабощелочным слабокислым мезотрофным водоемам (юго-восточная – к эвтрофным), остальные участки – к мезогумусным среднещелочным слабокислым нейтральным мезотрофным водоемам [16, 27, 28].

ДО Выгозерского водохранилища изучаются в Институте водных проблем Севера (ИВПС) КарНЦ РАН с 1969 г. В 1969–1971 гг. было выполнено картирование ДО северной части водоема, исследован их механический и химический состав, стратификация осадков. В 1972–1974 гг. исследования были продолжены в других частях озера [5, 6, 23]. В 1981–1983 гг. в северном Выгозере изучались обменные процессы на границе вода–дно [17]. В 1992–1994 и 1999 гг. в рамках программы мониторинга водных объектов Карелии проводилось исследование химического состава ДО северного Выгозера [27]. В 2007–2010 гг. были отобраны пробы ДО на 15 станциях Выгозерского водохранилища (рис. 1). Отбор проб ДО осу-

ществлялся дночерпателем Экмана и поршневой трубкой (модифицированный вариант стратометра Алексона [36]). В пробах ДО измерялись величины рН (ПНДФ 14.1:3:4.121-97) и Eh [33], толщина окисленного слоя оценивалась визуально. Во влажных образцах определялись: естественная влажность, пористость и удельная масса [1], потребление кислорода илом (**ПК**) (экспозиция в течение суток, скляночный метод, ПНДФ 14.1:2:3:4.123-97), аммонийный азот (РД 52.24383-2005), после экстракции в кислой среде – железо общее ($Fe_{\text{общ}}$) (ПНДФ 14.1:2.2-95), марганец (Mn) и фосфор минеральный ($P_{\text{мин}}$) (РД 52,24,387-2006), после экстракции в ацетоне – растительные пигменты (хлорофилл (**Хл**) “a, b, c”) и феофитин), после экстракции в CCl_4 – нефтяные углеводороды (**НУ**) (ПНДФ 16.1:2.2.22-98). В образцах воздушно-сухого грунта – потери при прокаливании (**ППП**), азот органический ($N_{\text{орг}}$) (метод Кьельдаля) и фосфор общий ($P_{\text{общ}}$), органический углерод ($C_{\text{орг}}$) [1, 33].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Последствия превращения оз. Выгозера в водохранилище очень сильно сказались на формировании ДО. При подъеме уровня произошло затопление берегов, в результате чего в водоем поступила огромная масса растительных остатков и минерального материала. По данным исследований, проведенных в 1970-х гг., наиболее часто встречающиеся грунты Выгозера – мелкоалевритовые илы бурого, коричневого или темно-зеленого цвета (преобладающая фракция – 0.05–0.01 мм, составляющая 24–46% массы сухого осадка). Они занимают центральную часть озера с глубины 9–10 м. Небольшими участками встречаются тонкоструктурированные глинистые илы коричневого цвета (сумма пелитовых фракций достигает 56%).

Прибрежную зону выстилают галечно-песчаные отложения (пески крупно- и среднезернистых фракций, ~1–0.25 мм). На границе песка и ила залегают илисто-песчаные грунты, в которых преобладает мелкий песок с фракцией 0.25–0.05 мм (40%).

По условиям осадкообразования и стратификации ДО Выгозерское водохранилище делится на три района (рис. 1). Первый район – глубоководная центральная часть – дно старого оз. Выгозера. Максимальная мощность илового монолита – 1.15 м, в основании колонки ДО – глина (иногда песок), сверху – ил (бурый – 20–30 см, зеленый – 20–40 см, серый ~50 см). Граница между слоями

четко выражена. Второй район – участки дна, затопленные при создании водохранилища и покрытые сверху слоем жидкого коричневого ила толщиной до 30 см, в основании – торф. Третий район – мелководная прибрежная зона, где на песке залегает бурый ил с растительными остатками мощностью до 20 см [23]. Чередование разных типов отложений характерно для искусственных водоемов, это результат изменения условий осадкообразования. В отличие от водохранилищ, созданных на крупных реках (например, водохранилища Волжского каскада, где взвеси разносятся, прежде всего, постоянно действующим стоковым течением [7]), Выгозерское водохранилище имеет невысокую среднюю скорость водообмена. Поэтому седиментационный режим этого водоема в основном соответствует озерному типу.

Необходимо отметить, что наибольшее количество взвешенного материала поступает с водосбора в северную часть Выгозера с водами р. Сегежи, сток которой составляет 50% общего стока в водохранилище. Воды этой реки играют основную роль в разбавлении сточных вод ЦБК и в формировании в этом районе транзитного стокового течения в северо-западном направлении. Уникальное сочетание в северном Выгозере гидрологических и морфометрических свойств, максимальной естественной нагрузки (~20 г взвешенных веществ/(м² год)) и неравномерной антропогенной нагрузки (10–110 г/(м²/год)) [30] – причина отличия этого района по седиментационному режиму от основной акватории водоема, что отражается на химическом составе ДО.

Выгозерское водохранилище относится к водоемам с повышенным содержанием органического вещества (**ОВ**) в ДО. Его источники: остатки животных и растительных организмов, населяющих водоем, продукты размыва торфянистых сплавин, продукты переработки почвенного слоя и наземной растительности, затопленной при заполнении водоема, **ОВ** речных наносов, а также сточные воды ЦБК. Учитывая тип загрязнения и историю водоема, можно предположить, что основные отличия и изменения в ДО Выгозерского водохранилища связаны с процессами трансформации и накопления **ОВ**, особенно в его северной части, где ДО в основном представлены илами (65% площади дна).

До начала работы станции биологической очистки (**СБО**) в 1976 г. все сточные воды ЦБК поступали в Лайкоручей (вынос взвешенных веществ ~25000 т/год [31, 32]). ДО, загрязненные отходами ЦБК, накапливались в районе устья р. Сегежи и занимали 6 км² площади дна реки.

После введения СБО характер осадконакопления в северном Выгозере изменился. Основной сток был выведен в Мозог губу. Загрязнение постепенно распространилось на районы, прилегающие к выпуску, а именно — на Лейгубу (ст. 8), центральную глубоководную часть (ст. 38) и Майгубу (ст. 52) [21–23]. Скорость осадконакопления в Лайкоручье, по [17], уменьшилась в 6 раз ($5.3 \text{ г}/(\text{м}^2 \text{ сут})$), а в Майгубе — увеличилась в 6 раз и составила в летний период $2.6 \text{ г}/(\text{м}^2 \text{ сут})$. Скорость осадконакопления в Сенной губе осталась на прежнем уровне и равнялась $0.8 \text{ г}/(\text{м}^2 \text{ сут})$.

Изменился и химический состав загрязняющих веществ. В водах северного Выгозера обнаруживались такие специфические ОВ, как лигнин, фенолы, смоляные вещества, кислоты, НУ, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), хиноны и др. [11]. Уже к 1983 г. в районе северного Выгозера [17, 18] выделились 4 зоны ДО, различающихся по количеству и качеству ОВ, биогенных элементов, металлов, по визуальным и физико-химическим характеристикам:

зона 1 — ДО, сформировавшиеся из отходов ЦБК в Лайкоручье (ППП ~ 50%; здесь и далее концентрации компонентов рассчитаны на воздушно-сухой вес осадка);

зона 2 — район Лейгубы: Мозог губа (естественный отстойник сточных вод) и акватория озера, примыкающая к ней в радиусе 500 м; ДО здесь сформированы частицами активного ила, лигнином и целлюлозой (ППП ~ 40%);

зона 3 — трансформации загрязненных вод: глубоководный центральный район северного Выгозера и Майгуба (ППП ~ 30%);

зона 4 — условно чистая: Сенная губа (ППП ~ 20%).

В начале 1980-х гг. осадконакопление наиболее активно происходило в зонах 1 и 2, что было связано с непосредственным поступлением туда сточных вод. Но районы Лейгубы и устье р. Сегежи не являются зоной аккумуляции. ДО, накопленные здесь, при определенной гидрологической ситуации переносятся в глубоководную часть, в результате чего ОВ техногенного происхождения теперь разносятся по всей акватории северного Выгозера, а также выносятся в центральную часть водохранилища. Содержание ОВ в толще воды постепенно увеличивается. Седиментация ОВ преобладает над их выносом. Высокие концентрации $P_{\text{общ}}$ в придонных водах (от 100 до 400 мкг Р/л) по пути распространения сточных вод над самым дном в зимний период — причина роста содержания Р в 2 раза в осадках глубоковод-

ных станций (от 0.15 до 0.3% сухого веса). Невысокие градиенты концентраций фосфатов на границе осадок—вода за счет высокого содержания $P_{\text{мин}}$ как в поровых растворах, так и в надилловой воде (5 см над поверхностью ДО), по-видимому, сдерживали в этот период поступление Р из ДО в воду и способствовали его накоплению в ДО. Так, по данным [18], в период ледостава в 1981 г. содержание $P_{\text{общ}}$ (270 мкг Р/л) в воде над илом на ст. 38 было выше, чем в поровых водах (100 мкг Р/л). В период открытой воды концентрация в поровых водах (110 мкг Р/л) была выше, чем в надилловой воде (10 мкг Р/л). ДО, сформировавшиеся в зоне аккумуляции в северном Выгозере с 1976 по 1994 г. в результате процессов анаэробного разложения серосодержащих органических взвесей сточных вод, имели черный цвет и неприятный запах. Активные микробиологические процессы сопровождалась здесь понижением рН, что, в свою очередь, также увеличивало адсорбционную способность илов по отношению к фосфат-ионам изменением поверхностного заряда твердых частиц ДО [17]. Низкие значения Eh ДО (на станциях: 8 — от -370 до -70 ; 38 — от -300 до -20 мВ, по данным 1994 г.) свидетельствовали о возможном процессе сульфатредукции, при которой бактерии используют кислород сульфат-ионов для окисления ОВ, образуя в качестве побочных продуктов сульфидные формы. Довольно большое содержание взвешенных веществ, ОВ, Fe и сульфатов в сточных водах (взвешенные вещества ~400 мг/л, ХПК ~ 900 мг О/л, Fe ~ 1 мг/л, SO_4^{2-} ~ 200 мг/л [11, 18]) может быть причиной образования FeS в ДО.

Снижение объемов сброса сточных вод ЦБК в 1990-е гг. (в 1985, 2000, 2007 гг. — соответственно ~80, ~24, ~33 млн м³) привело к уменьшению поступления в водоем взвешенных веществ техногенного происхождения (со стоками ЦБК: в 1980-е, 1992–1994, 1998–2003 гг. — соответственно ~4800, 1485, 341 т/год) [27, 28]. Изменение объемов сточных вод ЦБК повлияло на процессы седиментогенеза не только в северном Выгозере. Особенности распространения сточных вод в период ледостава (~6 мес.) — их смешивание с озерными водами до наибольшей плотности и при этом — трехкратное разбавление [21]. Уплотняясь при перемешивании, загрязненные воды опускаются ко дну и распространяются в придонном слое, заполняя все углубления дна до определенного уровня в зависимости от глубины протоки при их перетекании в соседний район. Так, по данным [22], в 1983 г. их верхняя граница в заливах Лейгуба и Лайкоручей заглублялась на 4 м в центре за-

лизов, на 6–6.5 м на выходе из них. В северо-западной части Выгозера они располагались на глубине более 6.5–8.5 м. Следовательно, в результате уменьшения объемов сбросов верхняя граница их распространения зимой не сможет достигнуть уровня протоки, соединяющей северное Выгозеро с центральным районом. В 1980-е гг. во второй половине зимы загрязненные воды из северного Выгозера поступали в центральную часть водохранилища (~10% общего объема сточных вод за весь период ледостава), а в настоящее время, вероятно, это не происходит. В отличие от 1980-х гг., после 1994 г. признаков хронического техногенного загрязнения ДО сточными водами ЦБК в зимний период в Надвоицком зал. и в центральной части Выгозерского водохранилища не наблюдалось [2, 12, 21].

Полное перемешивание водных масс Выгозерского водохранилища происходит после очищения водоема ото льда. В июне – начале июля наблюдается вынос загрязненных вод из водохранилища в р. Нижний Выг. С середины июля до установления ледяного покрова водоем характеризуется самой низкой степенью загрязнения водных масс. Основные (консервативные) показатели распространения сточных вод Сегежского ЦБК – Na^+ и SO_4^{2-} . Кратность разбавления вод в районах выпуска сточных вод по содержанию Na^+ и SO_4^{2-} в летние периоды 1992–1996 гг. составляла 8–15 в районе Лейгубы и 12–21 – в Лайкоручье [21, 30]. В 2007–2010 гг. кратность разбавления была выше (в районе Лейгубы – 42–77 и в зал. Лайкоручей – 36–53). В других районах загрязнение по данным компонентам не фиксировалось.

Анализируя распределение кислорода по акватории и глубине Выгозерского водохранилища в 2007–2010 гг., следует отметить, что, в отличие от 1970–1980-х гг., поступление сточных вод Сегежского промцентра практически не сказывается на кислородном режиме северного Выгозера в период открытой воды. Так, в пределах глубин 0.5–12 м насыщение воды кислородом составляло 87–93%. При мелководности водоема фактически во всей толще воды отмечались весьма благоприятные кислородные условия и только на глубоководной ст. 38 была отмечена стратификация кислорода: 0.5 м (16.5°C) – 91, 15 м (14.3°C) – 79, 21.5 м (11.5°C) – 65%.

Снижение точечной антропогенной нагрузки на водоем повлияло и на ДО. Осадки, отобранные в 2007–2010 гг. в аккумуляционной зоне районов, выделенных по морфометрическому принципу,

представлены илами темно-коричневых и зеленых оттенков. В ДО южной части озера много растительных остатков. Техногенные накопления черного цвета характерны для ДО Лейгубы и центрального района северного Выгозера.

По условиям формирования и химическому составу ДО в Выгозере сохраняется деление акватории на 3 части (таблица; рис. 2). Поверхностный слой (0–5 см) ДО водохранилища можно отнести к слабовосстановленным осадкам, наиболее низкие значения Eh и pH зафиксированы в северной части. Диапазон колебаний физико-химических параметров (pH 3.66 и Eh 245 мВ) указывает на изменчивость процессов разложения ОВ техногенного происхождения, а также на активное развитие анаэробных процессов в ДО северного Выгозера. Действительно, ДО, отобранные по направлению распространения сточных вод ЦБК, имели неприятный запах. Величины потребления кислорода илом здесь максимальные, мощность окисленного слоя непостоянна. Так, например, толщина окисленного слоя осадка на ст. 38 – от 4 см в 2009 г. до 0.1 см в 2007 г. Самые высокие концентрации ОВ ($C_{\text{орг}} = 33\%$) и $N_{\text{орг}}$ (1.4%) обнаружены в районе выпуска сточных вод СБО (Лейгуба, ст. 8). Осадки станций 8 и 38 загрязнены НУ (340 мкг/г). В ДО Майгубы (ст. 52) повышено содержание Fe (~10%). Как уже отмечалось, в отличие от начала 1990-х гг., влияние ЦБК на химический состав ДО Сенной губы и Надвоицкого зал. в настоящее время не прослеживается. Содержание ОВ в ДО этих заливов ($C_{\text{орг}} = 13$, $N_{\text{орг}} = 0.5$, $P_{\text{общ}} = 0.15\%$) не меняется в течение последних 20 лет наблюдений.

Сравнивая результаты многолетних наблюдений за химическим составом ДО в различные периоды функционирования Сегежского ЦБК, можно сделать вывод, что изменение химического состава ДО по основным параметрам в этом районе связано с объемами производства и качественным составом сточных вод. Колонки ДО, отобранные в аккумуляционной зоне (ст. 38), имеют четко выраженные границы между слоями, соответствующими разным режимам осадконакопления. Наиболее глубокий исследованный слой – серый глинистый ил, далее следует слой серо-зеленого ила мощностью 28 см, граница соответствует 1932 г. – моменту превращения озера в водохранилище. Над зеленым илом располагается слой бурого ила (27 см), вероятно, соответствующий периоду работы ЦБК в 1950–1976 гг.

Ввод СБО изменил характер осадконакопления: над бурым илом располагается слой черного ила мощностью 30 см. Средняя скорость осадкона-

копления в аккумуляционной зоне северного Выгозера за 60 лет работы ЦБК составила ~1 см/год. Концентрации биогенных ОВ в ДО меняются синхронно с содержанием ОВ: период резкого падения объема производства (1995–2000 г.) соответствует минимуму концентраций этих веществ (рис. 3а, 3б, 4а, 4б). В эти же годы вследствие изменения процессов седиментогенеза, что связано с уменьшением объема сточных вод ЦБК и стабилизацией кислородного режима Выгозера, в водоеме начинается устойчивый рост содержания Fe в поверхностном слое ДО всех его аккумуляционных зон (рис. 3). В 1995–2000 гг. отмечается увеличение концентрации Fe в поверхностном слое ДО, например в Майгубе его содержание увеличилось с 3 до 5% от сухого веса, в настоящее время ~8% (рис. 3б). Накопление Fe в поверхностном слое ДО происходит не только в результате осаждения мелкодисперсных взвесей гумусовых веществ, поступающих с водосбора с речным стоком, а также за счет миграции восстановленного Fe(II) из более глубоких слоев осадка и его переосаждения в поверхностном окисленном слое ДО. Зимой в связи со значительным уменьшением концентрации растворенного кислорода в придонных горизонтах наблюдается обогащение воды по Fe и Mn, мигрирующим из ДО. Так, в 1998–2003 гг. при средней концентрации Fe в поверхностных слоях – 0.1 мг/л в придонных слоях его концентрация возрастала до 0.6 мг/л, а Mn, соответственно, от 0.03 до 0.08 мг/л [28].

В центральной части Выгозерского водохранилища в 1970-е гг. осаждались преимущественно продукты эрозии затопленных болотных торфяников. Концентрации ОВ достигали здесь 80%. В настоящее время среднее содержание ОВ в поверхностном слое исследованных ДО – 43%, что незначительно превышает концентрацию ОВ в других районах озера. В илах центрального района значительно снизилось содержание N (рис. 4в), значения атомного отношения C/N максимальные и достигают 35. Концентрации Fe увеличились (20 и 4% в слоях 0–1 и 3–5 см). В осадках развиваются процессы рудообразования, особенно на ст. 209, находящейся в зоне седиментации взвешенного стока р. Верхний Выг, где обнаружены рудные гранулы диаметром до 1 см (концентрация Fe и Mn в слое 0–5 см достигает 32 и 1.5% соответственно).

При изменении химических характеристик по вертикали на ст. 220 ДО имеет ярко выраженные минимумы (Fe, Mn, P, Eh) и максимумы (pH, C, N, ПК) в приповерхностном слое на глубине 3–5 см. Тот факт, что в последние двадцать лет в ДО центрального района поступает меньше ОВ (содер-

Химический состав ДО Выгозерского водохранилища

Показатель	Районы озера		
	северный	центральный	юго-восточный
1969–1974 гг.*			
$C_{орг}, \%$	$\frac{2.5-30.4}{21.7}$	$\frac{6.6-30.2}{15.3}$	$\frac{3.2-30.3}{19.2}$
$N_{орг}, \%$	$\frac{0.18-1.73}{0.70}$	$\frac{0.38-1.66}{1.30}$	$\frac{0.66-1.57}{1.18}$
$N-NH_4^+, \%$	$\frac{0.001-0.853}{0.213}$	$\frac{0.009-0.510}{0.140}$	$\frac{0.008-0.185}{0.110}$
$P_{лаб}, \%$	$\frac{0.006-0.138}{0.030}$	$\frac{0.002-0.008}{0.053}$	$\frac{0.003-0.006}{0.047}$
2007–2010 гг.			
Eh, мВ	$\frac{-31...+214}{+42}$	$\frac{+14...+262}{+104}$	$\frac{-8...+371}{+58}$
pH	$\frac{3.38-7.04}{6.13}$	$\frac{4.89-7.03}{6.20}$	$\frac{4.93-7.22}{6.56}$
$C_{орг}, \%$	$\frac{6.9-32.9}{17.3}$	$\frac{9.2-23.9}{18.7}$	$\frac{1.2-20.5}{12.8}$
ППП, %	$\frac{18.2-69.9}{38.3}$	$\frac{33.9-49.0}{42.7}$	$\frac{24.1-44.1}{35.7}$
$N_{орг}, \%$	$\frac{0.30-1.36}{0.69}$	$\frac{0.52-0.82}{0.72}$	$\frac{0.12-0.70}{0.50}$
$N-NH_4^+, \%$	$\frac{0.001-0.014}{0.006}$	$\frac{0.006-0.015}{0.010}$	$\frac{0.001-0.008}{0.005}$
$P_{лаб}, \%$	$\frac{0.10-0.21}{0.15}$	$\frac{0.09-0.29}{0.16}$	$\frac{0.11-0.76}{0.39}$
$P_{общ}, \%$	$\frac{0.11-0.27}{0.19}$	$\frac{0.15-0.30}{0.20}$	$\frac{0.16-0.78}{0.43}$
Fe, %	$\frac{1.1-9.7}{4.1}$	$\frac{2.0-20.1}{6.2}$	$\frac{2.3-32.1}{9.8}$
Mn	$\frac{0.08-0.37}{0.20}$	$\frac{0.32-2.44}{0.79}$	$\frac{0.34-1.47}{0.61}$
Хл "а", мкг/г	$\frac{121-377}{223}$	$\frac{94-530}{237}$	$\frac{52-153}{110}$
Феофитин, мкг/г	$\frac{173-609}{312}$	$\frac{149-987}{398}$	$\frac{71-351}{208}$
НУ, мкг/г	$\frac{150-540}{330}$	$\frac{20-210}{80}$	$\frac{0-40}{20}$
ПК, мг O ₂ /г	$\frac{2.5-11.7}{6.6}$	$\frac{2.8-11.0}{5.1}$	$\frac{1.8-6.1}{3.9}$

*По [5].

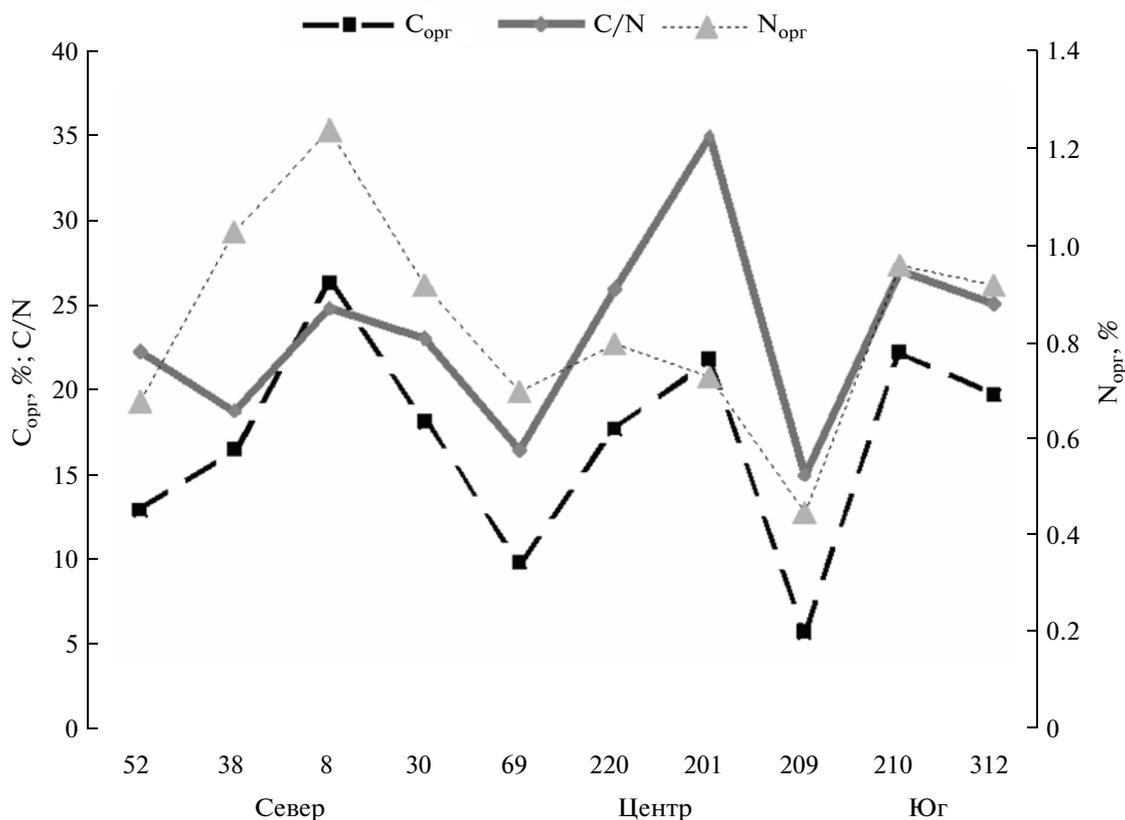


Рис. 2. $C_{орг}$, $N_{орг}$, атомное соотношение C/N ДО Выгозерского водохранилища по разрезу север—юг.

жание $C_{орг}$ в слое 0–1 см – 13.2%, C/N = 19; максимальное содержание в слое 3–5 см – 18%, C/N = 28), также свидетельствует об изменении процессов седиментогенеза в водохранилище. Основные тенденции в процессе формирования ДО этого района – уменьшение техногенных и абразионных взвесей, связанных с переработкой берегов, и увеличение доли взвешенного вещества притоков и биогенной седиментации, определяющейся в настоящее время первичной продукцией. Железородные образования на поверхности ДО центрального района Выгозера – механический барьер, препятствующий транспорту веществ из ДО, что способствует захоронению остатков растительного материала, поступившего на дно в результате превращения озера в водохранилище.

Процесс разложения ОВ в ДО в анаэробных условиях сопровождается образованием токсических органических соединений. Поступление этих продуктов в водную толщу будет зависеть от проницаемости поверхностного слоя ДО, которая в свою очередь зависит от окислительного режима водоема [3]. Дефицит кислорода в зимний период может привести к залповому поступле-

нию Fe, Mn, растворимых ОВ и токсических газов из ДО в водную толщу, что неизбежно будет влиять на химический состав воды и состояние бентосных сообществ.

ДО юго-восточной части озера (станции 213, 214, 209), формирующиеся под влиянием взвешенного стока высокогумусных рек Верхний Выг, Вожма, Тянукса и Ширенджа, отличаются высокими концентрациями Fe, более низкими концентрациями N, растительных пигментов и НУ (таблица). ДО южного района Выгозерского водохранилища (станции 210 и 312, трасса Беломорско-Балтийского водного пути) имеют слабоокисленный характер (рН 6.0–6.4), характеризуются высоким содержанием ОВ (C/N – 25–27), N (1%) и растительных пигментов (до 900 мкг/г), самыми низкими концентрациями P.

ВЫВОДЫ

Выгозерское водохранилище по условиям формирования ДО разделяется на три фациальные части: северную, центральную и юго-восточную. Накопление ДО в северной части происхо-

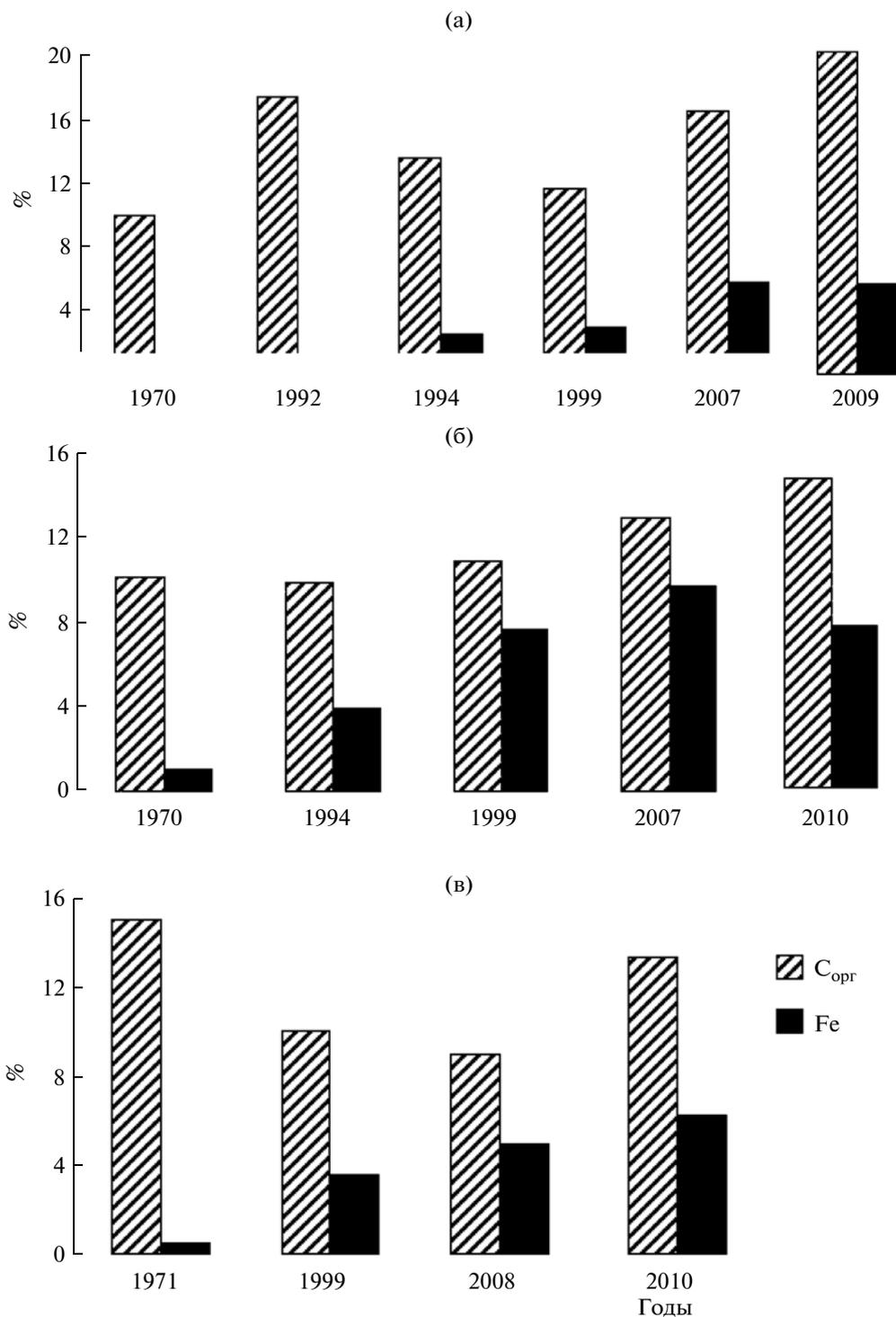


Рис. 3. Изменение концентраций $C_{орг}$ и Fe в ДО (0–2 см) северного Выгозера (а – ст. 38, б – ст. 52) и центрального Выгозера (в – ст. 220).

дит под действием транзитного стокового течения в северо-западном направлении в условиях неравномерной антропогенной нагрузки сточными водами Сегежского ЦБК; седиментационный режим центральной части соответствует озерно-

му типу; юго-восточной – близок к режиму речного плеса.

Изменение условий осадкообразования, связанное с превращением водоема в водохранили-

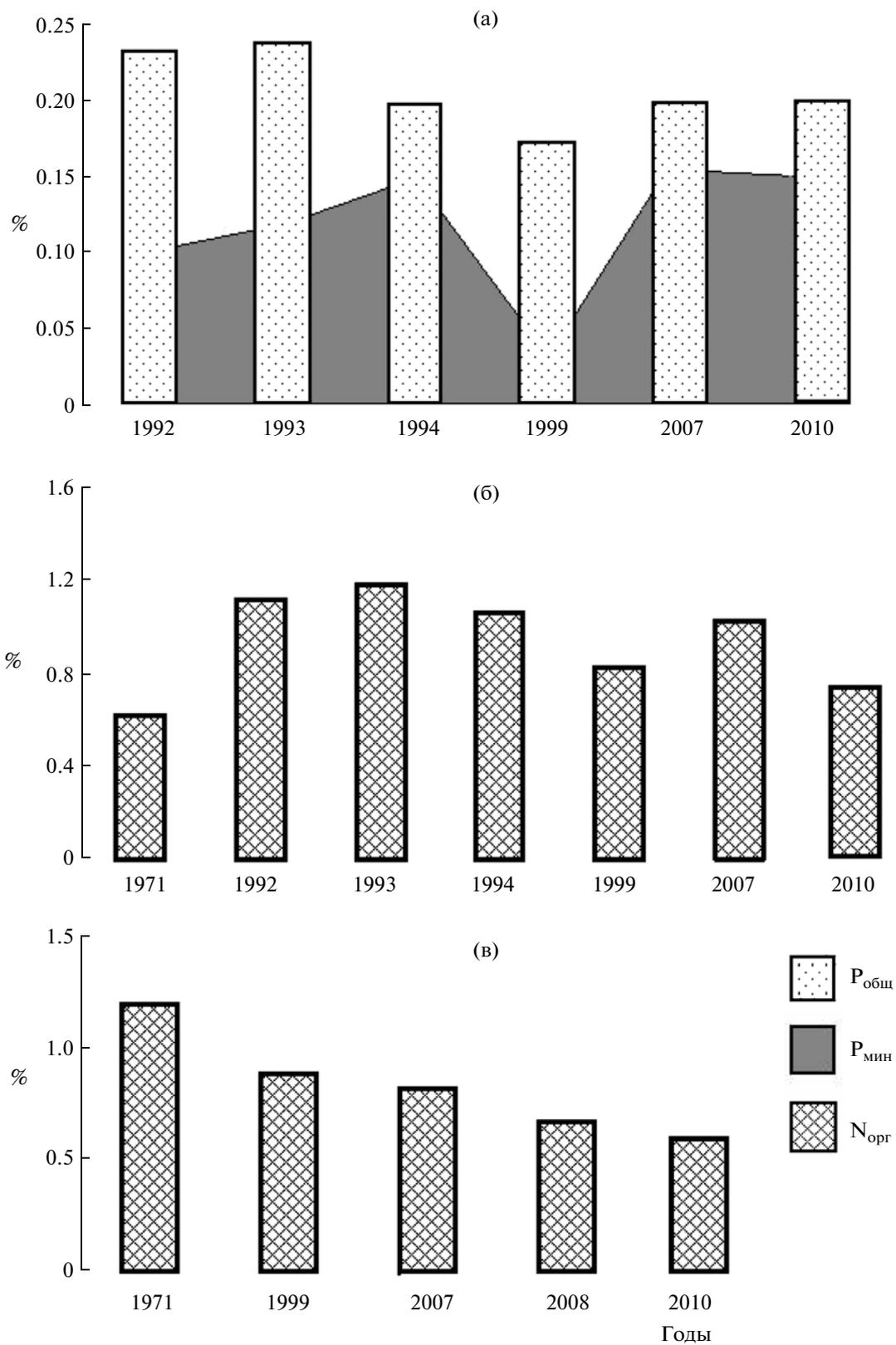


Рис. 4. Изменение концентраций $P_{общ}$, $P_{мин}$, $N_{орг}$ в ДО (0–2 см) Выгозерского водохранилища (а, б – ст. 38; в – ст. 220).

ще, проявляется в чередовании разных типов ДО по глубине колонки. По стратификации ДО на Выгозерском водохранилище выделяются антропогенные осадки северного Выгозера, илы, сформировавшиеся на песках в прибрежной зоне, илы глубоководной центральной части (дно старого Выгозера) и ДО, формирующиеся на затопленных торфяниках в южной части водоема.

Изменение физических и химических характеристик ДО северного Выгозера на протяжении 40 лет исследований связано с объемами производства и качественным составом сточных вод Сегежского ЦБК. Падение объемов производства в 1990-е гг. повлияло на процессы седиментогенеза, в результате чего в поверхностном слое ДО уменьшилось содержание ОВ и биогенных веществ, увеличилась концентрация Fe. Техногенные накопления в северном Выгозере в настоящее время отличаются качественным составом ОВ, трансформация которого требует значительного количества кислорода. ДО вблизи выпуска сточных вод характеризуются нестабильными окислительно-восстановительными условиями, что приводит к значительной изменчивости pH и Eh.

Уменьшение поступления в ДО центрального района Выгозера техногенных и абразионных взвесей привело к увеличению вклада в формирование ДО взвешенного вещества притоков и биогенной седиментации, в результате чего в поверхностном слое ДО этого района снижается содержание ОВ и N и растет концентрация Fe и P. Рудные образования на поверхности ДО – механический барьер, препятствующий транспорту веществ из ДО, он способствует захоронению остатков растительного материала, поступившего на дно в результате превращения озера в водохранилище.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
2. *Белкина Н.А., Калмыков М.В., Васильева Е.П.* Изменение химического состава донных отложений Выгозерского водохранилища, находящихся под воздействием сточных вод ЦБП // Тез. докл. II (XXV) междунар. конф. “Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера”. Петрозаводск: ПетрГУ, 1999. С. 319–321.
3. *Белкина Н.А.* Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Водные проблемы Севера и пути их решения. Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 35–41.
4. *Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Кудрин В.П.* Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 158 с.
5. *Васильева Е.П.* Характеристика химического состава донных отложений Выгозерского водохранилища // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: КФАН СССР, 1978. С. 63–79.
6. *Васильева Е.П.* Химический состав донных отложений Выгозера, загрязненных отходами Сегежского целлюлозно-бумажного комбината // Вопросы гидрологии, озераведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск: Карельское кн. изд-во, 1969. С. 60–65.
7. *Выхристюк Л.А., Варламова О.Е.* Донные отложения и их роль в экосистеме Куйбышевского водохранилища. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 174 с.
8. *Даувальтер В.А.* Влияние воздушных выбросов Воркутинского промышленного района на химический состав озерных донных отложений // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 6. С. 721–725.
9. *Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны:* М.: Наука, 2000. 244 с.
10. *Игнатьева Н.В.* Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 148–156.
11. *Изменение режима Северного Выгозера и реки Нижний Выг под воздействием сточных вод Сегежского ЦБК и допустимый объем их сброса.* Петрозаводск: Изд-во КарНЦ АН СССР, 1989. 36 с.
12. *Калмыков М.В.* Химический состав донных отложений Северного Выгозера // Современное состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга в 1992–1997 гг. / Под. ред. Лозовика П.А. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. С. 109–110.
13. *Каталог озер и рек Карелии /* Под ред. Филатова Н.Н. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2001. 289 с.
14. *Клюева В.А., Долженко Г.П.* Осадконакопление в водохранилищах бассейна Нижнего Дона. Ростов, 1983. 142 с.
15. *Куйбышевское водохранилище.* Л.: Наука, 1983. 213 с.
16. *Лозовик П.А., Шкиперова О.Ф., Зобков М.Б.* Геохимические особенности поверхностных вод Карелии и их классификация по химическим показателям // Тр. КарНЦ РАН, 2006. Вып. 9. С. 130–143.
17. *Лозовик П.А.* Взаимодействие донных отложений Северного Выгозера с водой // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: КФАН СССР, 1985. С. 61–74.
18. *Лозовик П.А.* Органическое вещество и биогенные элементы в поровых растворах донных отложений Выгозерского водохранилища // Комплексное изучение водных ресурсов Карелии. Петрозаводск: Изд-во КФАН СССР, 1982. С. 22–24.

19. *Мартынова М.В.* Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 243 с.
20. *Новиков Б.И.* Донные отложения днепровских водохранилищ. Киев: Наук. думка, 1985. 170 с.
21. *Пальшин Н.И.* Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. 86 с.
22. *Пальшин Н.И.* Условия формирования водных масс Северного Выгозера // Исследования Онежской губы и водоемов бассейна Белого моря. Петрозаводск: Изд-во КФАН СССР, 1984. С. 53–56.
23. *Поляков Ю.К.* Донные отложения Выгозера // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Изд-во КФАН СССР, 1978. С. 57–63.
24. *Россолимо Л.Л.* Антропогенное этрофирование водоемов // Общая экология, биоценология, гидробиология. М.: ВИНТИ, 1975. Т. 2. С. 8–60.
25. *Семенович Н.И.* Донные отложения Ладожского озера. М.; Л.: Наука, 1966. 124 с.
26. *Семенович Н.И.* Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука, 1973. 104 с.
27. Современное состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга в 1992–1997 гг. / Под. ред. Лозовика П.А. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 188 с.
28. Состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга в 1998–2006 гг. / Под. ред. Лозовика П.А. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 210 с.
29. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. М.: АН СССР, 1962. Т. 1. 212 с.; Т. 2. 574 с.; Т. 3. 550 с.
30. *Теканова Е.В., Лозовик П.А., Калинин Н.М. и др.* Современное состояние и трансформация северной части Выгозерского водохранилища // Водные проблемы Севера и пути их решения. Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 50–56.
31. *Харкевич Н.С.* Влияние сточных вод Сегежского целлюлозно-бумажного комбината на химический состав и качество вод р. Сегежа и Выгозера // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск: Изд-во КФАН СССР, 1969. С. 30–59.
32. *Харкевич Н.С.* Характеристика химического состава и качества воды Выгозерского водохранилища // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Изд-во КФАН СССР, 1978. С. 107–145.
33. *Belkina N.A.* Chemical monitoring of sediments // Analytical and sampling methods for environmental monitoring in Lake Ladoga and other large lakes in Russia. Joensuu: Joensuu university, 1999. № 3. P. 18–21.
34. *Dauvalter V.* Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic Lake Kuetsjärvi, Murmansk Region Russia // J. Environ. Monit. 2003. № 5. P. 210–215.
35. *Golterman H.L.* Sediments, modifying and equilibrating factors in chemistry of freshwaters // Verh. intern. Ver. Limnol. 1984. V. 22. P. 23–59.
36. *Hakanson L., Jansson M.* Principles of lake sedimentology. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 316 p.
37. *Hutchinson G.E.* A treatise of limnology. V. 1. Geography, physics, and chemistry. Ch 12. The phosphorus cycle in lakes. N.Y.: John Wiley & Sons, 1957. 1015 p.