Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН)

На правах рукописи

Малов Виктор Игоревич

Геохимия и минералогия компонентов системы Онежского озера

1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
д.г.-м.н. Страховенко Вера Дмитриевна

Новосибирск, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
Глава 1. ОЗЕРНАЯ СИСТЕМА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА 15
1.1 Озерная система как объект изучения 15
1.2 Литогенез в Онежском озере. 17
1.3 История изучения донных отложений Онежского озера 18
Глава 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ 21
2.1 Физико-географическая характеристика Онежского озера и его водосбора 21
2.2 Геологическое строение территории водосбора 23
Глава 3. ПОЛЕВЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 28
3.1 . Полевые методы исследования, отбор фактического материала . 28
3.2 Аналитические методы исследования. 33
Глава 4. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА 38
4.1 Минеральный состав донных отложений Приледникового Онежского озера 40
4.2. Минеральный состав голоценовых донных отложений Онежского озера. 43
4.3 Латеральные различия в минеральном составе. 54
4.4 Латеральное распределение макро- и микроэлементов в донных отложениях Онежского озера 59
4.5 Вертикальное распределение макро- и микроэлементов в донных отложениях Онежского озера. 64
4.6 Геохимические индикаторы 70
ВЫВОДЫ 4 ГЛАВЫ 73
Глава 5. ОСАДОЧНОЕ ВЕЩЕСТВО ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА 75
5.1 Минеральный состав осадочного вещества вод рек, впадающих в Онежское озеро, в их устьях 75

5.2 Минеральный состав осадочного вещества вод Онежского озера 79

5.2.1 Взвешенное вещество в воде Онежского озера 79

5.2.2 Осадочный материал седиментационных ловушек..... 83

5.3 Сравнение минерального состава современных осадков с осадочным веществом экосистемы Онежского озера 85

5.4 Скорости осадконакопления в Онежском Озере 88

5.5 Результаты кластерного анализ. 91

ВЫВОДЫ 5 ГЛАВЫ 94

Глава 6. РТУТЬ В СИСТЕМЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА 96

6.1 Ртуть в системе вода – взвешенное вещество 98

6.2 Ртуть в донных отложениях Онежского озера..... 101

ВЫВОДЫ 6 ГЛАВЫ 107

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 108

Список литературы 111

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований.

Онежское озеро расположено на северо-западе европейской части Российской Федерации и является вторым по площади пресноводным озером Европы.

Четвертичные отложения Онежского озера представлены преимущественно отложениями последнего гляциоседиментационного цикла, включающего отложения оледенения и надледниковые осадки вплоть до современных озерных образований. Актуальность изучения Онежского озера базируется на сохранившейся в донных отложениях информации об эволюции экосистемы озера от плейстоцена (приледникового озера) до современных времен, что позволяет проследить непрерывную картину реагирования экосистемы озера на изменение климата от ледникового периода до антропогена.

В настоящее время Онежское озеро является частью Беломорско-Балтийского водного пути, водохранилищем Верхнесвирской ГЭС и активно используется для нужд водоснабжения населенных пунктов и крупных промузлов, а также имеет высокое рыбохозяйственное и рекреационное значение (Литвиненко и др. 2016).

Рациональный подход в рыбохозяйственной деятельности является ключевым моментом доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации».

Растущая антропогенной нагрузка и изменения климата несут высокие риски для экосистемы Онежского озера. Так, например, в работах предшественников сообщалось об обнаружениях концентраций ртути, превышающих значения ПДК

для вод Онежского озера и его притоков (Игнатьева и др., 2015). Также ряд исследователей отмечают антропогенную нагрузку и изменение климата, как основные факторы увеличения биопродуктивности, что в конечном итоге может привести, как отмечают авторы, к эвтрофикации Онежского озера (Калинкина и др., 2017). Растущую опасность и актуальность исследований в данной области подчеркивает появление государственных программ в нацпроекте «Экология» 2019-2024, «Сохранение уникальных водных объектов». Данный проект направлен на сохранение и восстановление водных объектов, включая Онежское озеро.

Понимание процессов, происходящих в озерных экосистемах, и прогнозирование их возможных изменений в будущем в условиях климатических колебаний и антропогенной нагрузки возможно, в первую очередь, посредством геохимического и вещественного изучения осадочного вещества озера, находящегося как во взвешенном состоянии, так и в осажденном на дне озера. Глубокое изучение факторов, влияющих на формирование системы Онежского озера и понимание механизмов потоков вещества и энергии посредством изучения осадочного вещества, обеспечит формирование детальной модели процесса литогенеза Онежского озера.

Данная модель может быть использована в изучении других уникальных водных объектов, а также может лечь в разработку основ рационального природопользования.

Степень разработанности темы. Геологическое строение и эволюция Онежского озера и его водосборного бассейна обсуждаются во многих публикациях (Бискэ и др., 1971; Бабак и др.,1979; Saarnisto and Saarinen, 2001; Шелехова и др., 2005; Демидов, 2006; Субетто, 2009; Subetto et al., 2017; Hang et.al., 2019 и др.).

Геохимический состав донных отложений Онежского озера детально изучалась с 1960 годов, с создания отдела водных проблем КФАН СССР (ныне Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН). Результатом этих исследований является серия научных статей, материал которых вошел в коллективные

монографии (Экосистема…, 1990; Онежское…, 1999; Биоресурсы…, 2008; Онежская …, 2011; Крупнейшие…, 2015)

В тоже время, знание минералогического состава донных отложений Онежского озера имеет фрагментарный характер и в основном базируется на аналитических данных в основном полученных в 70 – 80 годах, и охватывают лишь горизонты верхнего голоцена и отдельные районы озера (Биске, 1971; Квасов и др., 1976, Демидов, 2006. Семенович, 1973, Поляков, 1973; Поляков и Родькина, 1981; Васильева и Фрейндлинг, 1985 и др.).

Изучение взвеси в воде Онежского озера ограничивалось количественными оценками поступления химических элементов и, в редких случаях, сопровождалось другими аналитическими работами в рамках гидрохимических и экологических исследований (Румянцев, 1972; Помазовский и др., 1981; Пирожкова, 1985; Лифшиц, 1988; Лозовик и Ефремов, 2017; Лозовик и др., 2020).

Современные исследования донных осадков Онежского озера и взвеси проводились в рамках лимнологических исследований, целью которых являлась оценка состояния экосистемы под влиянием антропогенных факторов (Белкина, 2011; Бородулина, 2011; Белкина и др., 2016; Субетто и др., 2016; Игнатов и др., 2017; Лозовик и Ефремов, 2017; Бородулина и др., 2019; Лозовик и др., 2020; и др.).

Таким образом, комплексных работ по совместному изучению минералого-геохимического состава донных отложений и взвеси на всей акватории Онежского озера ранее не проводилось.

Цель работы: комплексная оценка характеристик процесса современного литогенеза Онежского озера на основе геохимических и минералогических исследований.

Достижение цели потребовало решение следующих **задач**:

- определить вещественный состав осадочного вещества в воде и донных отложениях системы Онежского озера;
- определить уровень содержания и характер латерального и вертикального распределения макро- и микроэлементов в донных отложениях Онежского озера;

- определить уровень содержания и характер латерального распределения макро- и микроэлементов в осадочном веществе в воде Онежского озера;
- оценить скорости осадконакопления в разных районах акватории Онежского озера, на базе метода радиометрического датирования с использованием неравновесного $^{210}Pb_{атм}$ в сопоставлении с распределением радионуклида ^{137}Cs в донных осадках по реперным точкам;
- выявить закономерности распределения потенциально токсичных элементов (на примере ртути) в системе вода-взвешенное вещество-донные отложения.

Объектом исследования является Онежское озеро.

Предметом исследования являются абиотические компоненты системы Онежского озера (вода, взвешенное вещество, донные отложения).

Фактический материал. Работа основывается на результатах исследований, которые автор в содействии с сотрудниками Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН, Института водных проблем севера Карельского научного центра РАН, Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, Всероссийского научно-исследовательского института геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. академика И. С. Грамберга проводил в рамках грантов РНФ 24-17-00206, 18-17-00176 и 18-17-00176П и РФФИ 19-05-50014_микромир.

Фактическим материалом для диссертационной работы послужили образцы воды, взвешенного вещества Онежского озера и рек, впадающих в него, донных отложений, отобранных в результате комплексных экспедиционных полевых работ с 2016 по 2022 г. В ходе полевых работ отобрано: отобрано: 2 керна донных отложений длиной до 10 м; 93 колонки донных отложений длиной до 3 м (в сумме 836 проб донных отложений); 24 седиментационных ловушки (которые включали осадочный материал (24 пробы), воду (24 пробы) и фильтры (24 проб)), 36 проб воды Онежского озера и взвеси из нее (36 проб).

Научная новизна. Оригинальность работы базируется на двух исследовательских подходах: 1) на комплексном подходе к изучению процесса литогенеза, которая включала изучение осадочного материала на этапе

поступления в бассейн седиментации, осадочного материала в процессе осаждения и формирования донного осадка, и непосредственно процессов, проходящих в донном осадке; 2) на полном площадном опробовании всей акватории Онежского озера.

Впервые получены данные по минеральному и геохимическому составу всего разреза четвертичных отложений, слагающих котловину Онежского озера.

Установлено, что для голоценовых отложений Онежского озера важную роль в распределении химических элементов играют процессы диагенеза, которые проявляются в перераспределении ряда элементов и формировании аутигенных минералов.

Детальное изучение всех этапов формирования донного осадка из осадочного материала, поступающего из разных источников в озеро, впервые позволило установить факторы, отвечающие за состав минеральных ассоциаций донных отложений, и проследить изменение вещественного состава в процессе осаждения.

Теоретическая значимость работы. Онежское озеро является уникальным объектом, сохранившим в своей «летописи» (донных отложениях) информацию об эволюции экосистемы озера от плейстоцена до современных времен. Это позволяет проследить непрерывную картину реагирования экосистемы озера на изменение климата от ледникового периода до антропогена.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные данные о химическом и минеральном составе донных отложений в совокупности с оценкой возрастных интервалов и факторов, определяющих их вещественный состав и текстурно-структурные свойства, будут использованы для познания механизмов формирования потоков вещества и энергии в системе озеро-водосбор в условиях изменения климата и нарастающей антропогенной нагрузки.

Практическая значимость работы. Новые данные о минералогическом составе донного осадка Онежского озера, особенно о формировании вивианита ($Fe_3(PO_4)_2 \times 8H_2O$) в значительных количествах, как основного «контейнера», изымающего и захороняющего фосфор в них, позволяют в будущем выстроить модели эвтрофикации Онежского озера, что необходимо учитывать при разработке

рационального подхода в рыбохозяйственной деятельности, которая является ключевым моментом доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации.

Показано отсутствие влияния дигенетических изменений на вертикальное распределение ^{210}Pbатм и ^{137}Cs в донных отложениях. Это позволяет другим исследователям уверенно использовать метод радиометрического датирования с использованием неравновесного ^{210}Pbатм в сопоставлении с распределением радионуклида ^{137}Cs в донных осадках по реперным точкам для отложений, подвергающихся диагенетическим изменениям.

Методология и методы исследования. Входе работы были использованы методы полевых работ, которые включали: 1) отбор проб воды (батометры «Limnos» (Limnos Ltd., Финляндия) и Рутера RT (Hydrometpribor, Латвия), 2) фильтрацию проб через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм; 3) отбор донных отложений разными пробоотборниками (стратометр Алексона, трубка «ГОИН ТГ-1». Стратометр «Limnos» (Limnos Ltd., Финляндия), ударная грунтовая трубка, поршневая система для отбора колонок донных отложений (UWITEC, Австрия)); 4) установку и подъем седиментационных ловушек (упрощенный и модернизированный вариант седиментационной ловушки УСЛ–100, изготовлен в лаборатории палеолимнологии ИВПС КарНЦ РАН.).

Пробоотбор материала выполнялся с борта НИС «Эколог», а также посредством бурения со льда.

Отобранный материал изучался аналитическими методами: **метод атомно-абсорбционной спектрометрии** «Solaar M6» (Thermo Electron, США) – макро- и микроэлементный состав; **рентгеноспектральный флуоресцентный анализ** (силикатный) «ARL-9900-XP» (Applied Research Laboratories, США) – макроэлементный состав; **валовое содержание ртути в донных отложениях** «РА-915М» (Люмэкс, Россия) с приставкой «РП-91С» (Люмэкс, Россия); **метод «холодного пара» атомно-адсорбционной спектроскопии** (Perkin Elmer 3030B (США)) – содержание Hg в воде; **метод рентгеновской дифрактометрии** «ARLX’TRA» (излучение CuKα) (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL,

Швейцария) – минеральный состав; **метод рамановской спектроскопии** Horiba LabRamHR800 (Labspec 5) – минеральный состав; **сканирующая электронная микроскопия** «TESCAN MIRA3» (Tescan, Чехия) – изучение морфологии и фазового состава образцов; **метод полупроводниковой гамма-спектрометрии** («EURYSIS MESURES», Франция) – содержание естественных (Th, U, K) и искусственных (^{137}Cs, ^{210}Pb) радионуклидов;

Достоверность результатов работы обеспечена тем, что для проведения аналитических исследований использовался большой объем отобранного материала, при проведении исследований использовалось передовое аналитическое оборудование и стандартные образцы, все аналитические исследования проводились высококвалифицированными аналитиками в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН и в ИВПС КарНЦ РАН

Положения, выносимые на защиту:

1) В результате диагенеза на редокс-границе в голоценовых донных отложениях Онежского озера, выраженного в перераспределении ряда элементов (Fe, Mn, Ba, P, Cd, Ni, Zn, Mo и Hg) образуются аутигенные минералы двух парагенетических ассоциаций: пиролюзит, бернессит, голландит, гетит разной степени кристалличности в окислительном диагенезе; вивианит, родохрозит, сидерит в восстановительном диагенезе.

2) Осадочное вещество Онежского озера достигает дна без существенных изменений и представлено минералами терригенной фракции, биогенной составляющей, а также частицами антропогенного происхождения. Отличия в вещественном составе заключаются в доле биогенной составляющей (в 2-3 раза выше в поступающем осадочном веществе) и в катионном составе иллита и хлорита (в донных отложениях появляются аутигенные Fe-иллиты и хлориты). Скорость седиментации варьирует как по акватории Онежского озера, так и в пределах одного района от 0,03 см/год до 0,14 см/год.

3) Общее содержание ртути в воде Онежского озера в среднем составляет 0,32±0,07 мкг/л. Увеличение содержания ртути в донных отложениях вверх по

разрезу незначительно в среднем от 0,041±0,001 мкг/г до 0,067±0,003 мкг/г обусловлено миграцией Hg и ее переотложением на геохимическом барьере совместно с Fe и Mn и антропогенным загрязнением. Преобладающая форма нахождения ртути в воде - раствор+коллоид.

Апробация результатов и публикации. Полученные результаты были опубликованы в: 1 монографии, 4 статьях, которые вошли в международные реферативные базы данных ВАК, Web of Science и Scopus, 9 материалах конференций. Кроме того, результаты исследований были представлены устными и стендовыми докладами на 6 международных и всероссийских конференциях.

Список публикаций:

Монография:

Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям / Д. А. Субетто., Н. А. Белкина, В. Д. Страховенко, …, **В.И. Малов,** и др.; ответственный редактор Д. А. Субетто; Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. – 320 с. – коллективная монография.

Статьи:

Malov V., Distribution of Mercury in the Water-Suspended Matter-Bottom Sediments System of the Lake Onego Water Area / V. Malov, D. Subetto, V. Strakhovenko,E. Ovdina, N. Belkina // Minerals. — 2022. — Vol. 12, iss. 11. — P. 1410.

Kulik N., Geochemical Features of River Runoff and Their Effect on the State of the Aquatic Environment of Lake Onego/ N. Kulik, N. Efremenko, V. Strakhovenko, N. Belkina, G. Borodulina, E. Gatalskaya, **V. Malov,** I. Tokarev // Water. — 2023. — Vol. 15, iss. 5. — P. 964.

Strakhovenko V.D. The spatio-temporal distribution of elements in the bottom sediments of Lake Onego and small lakes located on the catchment area of Onego Ice Lake / V.D. Strakhovenko, N.A. Belkina, N.A. Efremenko, M.S. Potakhin, D.A. Subetto,

V.I. Malov, E.A. Ovdina // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. — 2023. — Vol. 68, iss. 4.

Malov V. I. Alterations of High-Carbon (Shungite) Rocks by the Lake Onega Waters: Mineralogy and Geochemistry of the Process / V. Malov, V. Strakhovenko, D. Subetto, E. Ovdina, M. Potakhin, N. Belkina, G. Malov // Russian Geology and Geophysics. – 2024. – Vol. 65, iss. 7. –P. 848-858.

Тезисы:

Малов В.И., Страховенко В.Д., Субетто Д.А., Белкина Н.А. Изменение минерального состава шунгитовых пород острова Березовец при выветривании // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. II. – М.: ИО РАН, 2021. – 295 с.

Малов В.И., Страховенко В.Д., Белкина Н.А., Потахин М.С., Овдина Е.А. Сопоставление скоростей осадконакопление донных отложений онежского озера // Пути эволюционной географии. Выпуск 2: Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.А. Величко (Москва, 22–25 ноября 2021 г.).– М.: Институт географии РАН, 2021.

Malov V. I., Strakhovenko V. D., Ovdina E. A.. Vivianite in bottom sediments of Lake Onego // X International Siberian Early Career GeoScientists Conference : Proceedings of the Conference, Novosibirsk, 13–17 июня 2022 года. – Novosibirsk State University: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2022. – P. 29-30..

Malov V.I., Strahovenko V.D., Subetto D.A., Ribalko A.V., Belyaev P.S., Belkina N.A., Potahin M.S. Geochemical and mineral composition of bottom sediments of the complete section of sediments of the last glaciosedimentation cycle, taken from ice in the Petrozavodsk Bay // The 5-th International Conference Paleolimnology of Northern Eurasia and Young Scientists School.

Malov V.I., Strahovenko V.D., Belkina N.A., Kulik N.V. , Efremenko N.A. Distribution of mercury content in the system water-suspended matter-bottom sediments of the water area of Lake Onega // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты.

Страховенко В.Д., Овдина Е.А., **Малов В.И.,** Белкина Н.А., Потахин М.С., Ефременко Н.А. Сопоставление геохимического и минерального состава речной взвеси и осадочного материала седиментационных ловушек различных районов Онежского озера // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. II. – М.: ИО РАН, 2021. – 295 с.

Малов В.И., Страховенко В.Д., Субетто Д.А., Белкина Н.А., Овдина Е.А. Латеральные различия в минеральном и геохимическом составе донных отложений Онежского озера // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. – М.: ИО РАН, 2023. – 228 с.

Малов В.И., Страховенко В.Д., Субетто Д.А., Потахин М.С., Белкина Н.А. Особенности геохимического состава различных пачек ленточных глин Онежского приледникового озера по данным micro-XRF санирования // Материалы Второй Всероссийской научной конференции, посвященной памяти академика РАН Н.Л. Добрецова (18–26 июля 2024 г. Новосибирск-Горный Алтай, Россия) / Програм. и орг. комитет: В.Н. Пармон [и др.]; Отд-ние наук о Земле РАН [и др.]. – Новосибирск: СО РАН, 2024.

Малов В. И., Страховенко В. Д., Субетто Д. А., Потахин М. С, Белкина Н. А. Литохимические характеристики донных отложений Онежского приледникового озера // материалы VII Всерос. молодежной науч.-практ. школы-конф. Геологический полигон «Шира», Республика Хакасия, Россия. 2–8 августа 2024 г. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2024. – 214 с.

Связь работы с научными программами и научно-исследовательскими темами. Исследования, выполнялись в ходе работы по грантам РНФ 24-17-00206, 18-17-00176 и 18-17-00176П и РФФИ 19-05-50014_микромир.

Соответствие результатов работы научным специальностям.

Результаты работы соответствуют пунктам 3, 13,19, 20 и 22 паспорта научной специальности 1.6.4 «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

Личный вклад автора. Автором принято непосредственное участие в экспедиционных работах, которые включали отбор проб донных отложений и вод, установку и снятие седиментационных ловушек, проведение первичной пробоподготовки на борту. Автором проведена дальнейшая пробоподготовка для аналитических методов исследования. Автор самостоятельно изучал материалы на сканирующем электронном микроскопе. Автор принимал активное участие в обработке полученных аналитических данных, интерпретации и сопоставлении новых данных с литературными материалами, подготовке и публикации результатов в научных журналах.

Структура и объем работы. Текст работы представлен на 120 страницах, состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка, включающего 149 наименований. Работа, кроме текста, включает в себя 8 таблиц, 63 рисунка.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность за руководство и поддержку в ходе выполнения исследования своему научному руководителю профессору, доктору геолого-минералогических наук, Вере Дмитриевне Страховенко.

Автор выражает признательность и благодарность преподавателям и сотрудникам Геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета.

Отдельно автор выражает благодарность следующим людям: Овдиной Е.А., Субетто Д.А., Белкиной Н. А., Ефременко Н. А., Кулик Н. В., Орлову А. В., Беляеву П. Ю., Потахину М. С., Рыбалко А. Е., Лазаревой Е.В., Букреевой Л.Н., Лудиной Г.С., Ивановой Л.Д., Мичуриной Л.П., Савиной О.А., Бадмаевой Ж.О., Маликову Ю.И., Густайтис М.А., Мягкой И.Н., Айриянц Е. В., Киселевой О. Н., Белянину Д. К., Жмодику С.М., Мельгунову М.С., Малову Г.И.

Глава 1. ОЗЕРНАЯ СИСТЕМА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

1.1 Озерная система как объект изучения

«Озеро – компонент гидросферы, представляющий собой естественно возникший водоём, заполненный в пределах озёрной чаши (озёрного ложа) водой и не имеющий непосредственного соединения с морем (океаном)» (Доманицкий и др., 1971).

Ключевая черта системы – это то, что все ее компоненты связанны между собой и влияют на функционирование всей системы в целом. Таким образом, озеро является экосистемой, так как оно включает в себя многочисленные взаимосвязанные живые и неживые компоненты.

Среди основных компонентов озёрной экосистемы можно выделить: воду, осадочное вещество, находящееся в воде, донные отложения и биоту.

Вода является одним из наиболее важных компонентов озерной экосистемы и играет важную роль в жизни всех живых организмов, которые живут в озере. Помимо этого, вода осуществляет функцию растворителя веществ, служит средой для осуществления физико-химических процессов и механизмом миграции вещества и энергии.

Воды Онежского озера являются пресными. По катионному и анионному составу воды относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция (табл. 2.1) (Сабылина и др., 2010;), изотопный состав воды Онежского озера варьирует от -11,5 до -9,3‰ для $\delta^{18}O$ и от -85 до -71‰ для $\delta^{2}H$ (Borodulina et al., 2023).

Таблица 1.1. Минерализация и ионный состав воды некоторых районов Онежского оз. (числитель – катионы, знаменатель – анионы; Аорг – сумма анионов органических кислот) по данным *Сабылина и др., 2010.

Район Онежского озера	Минерализация, мг/л	Ионный состав воды, %, экв
Петрозаводская губа*	34	$\frac{Ca45Mg38Na15K3}{HCO_3 68A_{орг}22SO_4 19Cl19}$
Повенецкий залив*	45	$\frac{Ca47Mg34Na16K3}{HCO_3 68SO_4 13Cl11A_{орг}8}$
Центральное Онего*	36	$\frac{Ca43Mg39Na15K3}{HCO_3 54A_{орг}21SO_4 17Cl18}$

Еще одним из основных компонентов озерной системы стоит выделить осадочное вещество. Его образование происходит в процессе выветривания и перемыва пород суши и берегов водных бассейнов, жизнедеятельности организмов, вулканических извержений и материала, поступающего из космоса. Осадочный материал, образующийся на поверхности суши, перемещается водой, ветром и льдом по ее поверхности и в конечном счете попадает в водные бассейны (конечные водоемы стока), видоизменение и отложение частиц, поступивших в водный бассейн.

Согласно опубликованным данным, ежегодно в Онежское озеро поступает 80-90 тыс. т. взвешенных веществ (Крупнейшие…, 2015). Главным поставщиком взвешенных веществ в Онежское озеро являются реки: Водла, Шуя, Суна и Андома, Вытегра, Кумса, Деревянка, Шелтозерка.

Донные осадки интегрируют геохимические характеристики почвенного покрова и ландшафтной структуры водосборов, в том числе накапливают различные поллютанты. В озерах условия механической, физико-химической и биологической миграции взвешенного материала существенно отличаются от условий в реках, впадающих в них. Эти отличия приводят к тому, что озера выполняют роль своего рода геохимических и механических барьеров, препятствующих перемещению элементов и играющих важную роль в передаче вещества и энергии в водных экосистемах (Страхов, 1962; Лисицын, 1994).

Биотический компонент экосистемы озера включает все живые организмы, которые обитают в озере или на его берегах, включая растения, животных и

микроорганизмы. Растения озер играют ключевую роль в процессе фотосинтеза, поглощая углекислый газ и выделяя кислород, и служат источником пищи. Животные влияют на организацию биотического сообщества озера. Микроорганизмы и бактерии в значительной степени определяют биогеохимические циклы в экосистеме озера, регулируя обмен веществ и утилизируя отмершие органические остатки и, таким образом, участвуют в формировании донных отложений (Wetzel, 2001). Сводный список фитопланктона Онежского озера насчитывает более 700 видов. Большая часть представлена видами диатомовых, зеленых, синезеленых и золотистых водорослей (93 % от общего списка) (Чекрыжева, 2012). Численное превосходство среди зоопланктона на протяжении вегетационного сезона в различных районах Онежского озера принадлежит простейшим (в среднем 73-95%), однако уровень биомассы определяют ракообразные (44-73%) (Куликова и др., 1997).

1.2 Литогенез в Онежском озере.

Онежское озеро, как и любое другое озеро является бассейном седиментации, в котором происходят современные процессы осадконакопления, приводящие к формированию осадочных пород. Формирование осадочных пород и их последующее изменение называется литогенезом. В современной учебной и справочной литературе существует большое количество разных подходов в выделении этапов литогенеза. Автор придерживается мнения Н.В. Логвиненко, что литогенез включает в себя следующие стадии: гипергенез; седиментогенез, диагенез, катагенез, метагенез (Логвиненко и Орлов, 1987). Этап седиментогенеза включает в себя формирования осадочного вещества, его транспортировки в бассейн седиментации и осаждение на дно. Образовавшийся на дне водоёма осадок (донные отложения) представляет собой лишь начальную стадию формирования осадочной горной породы. Дальнейшее преобразование осадка в горную породу происходит в результате сложных процессов, включающих комплекс химических и физико-химических явлений, приводящих к минералообразованию и литификации. Данная стадия называется диагенезом. К главным изменениям осадков при диагенезе могут быть отнесены (Логвиненко и Орлов, 1987):

- Физико-химическое уравновешивание донных отложений;

- Перераспределение вещества;

- Растворение неустойчивых и образование новых (аутигенных) устойчивых при диагенезе минералов;

- Переработка осадка микроорганизмами;

- Разложение органики;

- Уплотнение, цементация, литификация осадка;

Названные выше диагенетические изменения реализуются не повсеместно. Возможность реализации каждого из них во многом определяется геохимической обстановкой в осадке и составом последнего. Согласно Н.В. Логвиненко, можно выделить «восстановительный» и «окислительный» диагенез. Различают подстадии раннего диагенеза и позднего диагенеза. При первой в осадках имеют место процессы окисления наиболее верхнего слоя осадка и восстановления в более глубоких слоях, но иногда вплоть до поверхности (например, в условиях сероводородного заражения). При позднем диагенезе происходит дальнейшее перераспределение вещества, в т. ч. и вновь возникших диагенетических минералов, образование цемента и стяжений различного состава и морфологии (линз, конкреций, пластообразных сгущений и т. д.), прогрессирующее уплотнение, частичная дегидратация и перекристаллизация минералов (Логвиненко и Орлов, 1987).

Процессы седиментогенеза и диагенезе, продолжающиеся в Онежском озере в голоцене, можно охарактеризовать получив информацию о: составе осадочного материала, поступающего в систему Онежского озера; скорости седиментации (количество осадочного материала осадившегося на дно озера за определенный промежуток времени); преобразовании осадка в процессе осаждения; характере и степени дигенетических изменений осадка.

1.3 История изучения донных отложений Онежского озера

Начало трехсотлетней истории географических и геологических исследований Озер Карелии связанно с началом промышленной добычи железных

руд. Однако до начала XX века исследования озер имели эпизодический и строго прикладной характер. Первой научной работой стал труд академика Н. Я. Озерецковского по результатам экспедиции в 1785 г., посвященной изучению Онежского озера – «Путешествие по озерам Ладожскому и Онежскому». Также наиболее известными научными работами этого этапа изучения озера являются первые карты распределения донных отложений Ладожского и Онежского озер, составленные Андреевым А.П. (1877) и Дриженко Ф. К. (1895).

В первой половине XX века результаты исследований множества выдающихся ученых, которые изучали озера, позволили выявить основные факторы, формирующие донные отложения. Эти исследования привели к теоретическим выводам о происхождении озерных котловин, сформулированной теории зональности пресноводного осадконакопления и учению о механической и химической дифференциации осадочного материала в конечных водоемах стока. Основными трудами, посвящёнными изучению Онежского озера, являются работы А.А. Иностранцева, Г. Де Геера, В. Рамзайа, К.К. Маркова, К.К. Гильзена, К.А. Волосовича Н.И. Эраси, И.В. Молчанова, В. Ф. Землякова и т.д. Благодаря исследованиям упомянутых ученых, удалось получить информацию о строении озерной котловины, физико-географических, гидрологических, геоморфологических и ландшафтно-геохимических особенностях.

Исследование озер начала второй половины XX было направлено на получение новых, уточнение (за счет усовершенствования методов отбора материала, анализа, и появления новых изотопно-геохимических методов определения возраста донных осадков) и обобществление ранее полученных результатов. Данные исследования позволили сформулировать основные теории, например, теорию осадконакопления озер Россолимо Л. Л (1964), теории литогенеза Страхова Н. М. (1962).

Для Онежского озера одними из фундаментальных трудов стали: работа Н.И. Семеновича, посвященная геологическому строению озёрной котловины (Семенович, 1973) и монография Г.С. Бискэ с соавторами «Строение и история котловины Онежского озера» (Бискэ и др., 1971).

Исследования Онежского озера конца второй половины XX и начала XXI имели более конкретный характер. Работы были направлены на решение задач геохимии, геоэкологии, седиментологии, палеоклимоталогии и региональной геологии. Среди трудов выделяются работы: Н. Н. Давыдовой, Д. Д. Квасова, С. А. Абрамова, Д. А. Субетто, А. Е. Рыбалко, В. И. Хомутова, С. М. Усенкова, В. А. Щербакова, А. В. Амантова, Г. С. Бискэ, Н. В.Белкиной, Э. И Девятовой, Н. Н. Филатова, П.А. Лозовика и др.

Огромный вклад в изучение Онежского озера внес, созданный в 1960 году, отдел водных проблем КФАН СССР (ныне Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН). Результатом этих исследований является серия научных статей, материал которых вошел в коллективные монографии (Экосистема…, 1990; Онежское…, 1999; Биоресурсы…, 2008; Онежская …, 2011; Крупнейшие…, 2015).

Большой вклад в изучение Онежского озера внесли совместные международные работы с Финляндией, особенно профессора Матти Саарнисто (Геологическая служба Финляндии). Благодаря этим работам были разработаны теории эволюции Онежского озера и его водосборного бассейна (Saarnisto et al., 1995; Saarnisto and Saarinen., 2001).

Глава 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является Онежское Озеро.

2.1 Физико-географическая характеристика Онежского озера и его водосбора

Онежское озеро принадлежит к бассейну Балтийского моря, расположено на водосборе р. Свири. Координаты географического центра: 62°42′ с.ш., 33°25′ в.д.; высота над уровнем моря 33,3 м балтийской системы высот (Озера…, 2013). Онежское озеро является вторым по величине пресноводным водоемом Европы, уступая по площади и объему вод лишь Ладожскому (Озера…, 2013, Палеолимнология …, 2022;).

Площадь Онежского озера около 9970 км^2, из которых на водную поверхность приходится 9720 км^2, еще 250 км^2 – на более чем 1500 островов. Озеро вытянуто в субмеридиональном направлении, наибольшая длина – 248 км, ширина – 96 км. Расчленено на ряд больших плесов и заливов. В озере выделяют следующие районы: Большое Онего; Малое Онего; Центральное Онего; Южное Онего Повенецкий залив; Заонежский залив; Уницкая губа; Лижемская губа; Кондопожская губа; Петрозаводская губа (Озера…, 2013, Палеолимнология …, 2022).

Максимальная глубина Онежского озера – 120 м, средняя – 30 м, объем водной массы – 295 км^3. Площадь водосборного бассейна – 53 100 км^2.

Водосборный бассейн Онежского озера располагается в пределах 60°22′ – 63°33′ с.ш., 31°35′ – 38°02′ в.д., имеет вытянутую в субмеридиональном направлении форму, с расширением на север и сужением на юг. Асимметричность бассейна вносит существенный вклад в регулирование водного режима озера за счет того, что наибольший сток вод и основное питание озера находятся под

воздействием гидрометеорологических условий северной части бассейна, расположенной в зоне 62° – 63° с.ш. (Молчанов, 1946, Палеолимнология …, 2022).

Притоками озера являются 1152 реки, из которых 52 имеют длину более 10 км. Более половины бассейна занято водосборами трех главных его притоков: р. Водла (площадь водосбора 13,7 тыс. км^2), р. Шуя (10,1 тыс. км^2), р. Суна (7,7 тыс. км^2). Из озера вытекает одна р. Свирь (Онежское…, 2010, Палеолимнология …, 2022).

Во время последнего (валдайского) оледенения озеро и водосбор находились в юго-восточном (краевом) фланге ледника и были заняты Онежским ледовым потоком Беломорского ледового комплекса (Zobkov et al., 2019). Поэтому толща четвертичных отложений на водосборе сравнительно небольшая; широко представлены гляциальные, флювиогляциальные и лимногляциальные отложения. Рельеф характеризуется значительной расчлененностью, абсолютные отметки меняются от 40 до 300-400 м БС; повсеместно распространены ледниковые и водно-ледниковые формы рельефа (Палеолимнология …, 2022).

Строение озерной котловины зависит от геолого-тектонических и геоморфологических факторов. Котловина озера отчетливо разделяется на две части: северную и южную, каждая из которых характеризуется своими особенностями геофизического, геологического и геоморфологического строения.

Строение северной части котловины Онежского озера обусловлено тем, что она расположена на территории Южно-Онежской мульды. Онежскую мульду слагают среднепротерозойские породы: осадочные, вулканогенные и вулканогенно-осадочные отложения. Внутреннее строение мульды усложнено серией складок, ориентированных большей частью в северо-западном направлении, и крупными разрывными нарушениями, что привело к образованию рельефа с ярко выраженными перепадами высот. Внутреннее строение мульды прекрасно выражено в рельефе в виде котловин малых озер и заливов Онежского озера (Онежская…, 2011, Палеолимнология …, 2022).

В северной части Онежского озера наблюдается фиардово-шхерный тип побережья, преобладают первичные, слабоизмененные, неизмененные, а также

абразионные и абразионно-аккумулятивные морфогенетические типы берегов. Северная часть береговой линии сильно изрезана. Преобладают узкие заливы и губы. Распространены многочисленные острова. Все элементы рельефа направлены по ходу движения ледника и ориентированы в ССЗ – ЮЮВ направлении (Игнатов и др., 2017).

Южная часть онежского озера находится в области опущенного свода Восточно-Онежского поднятия. Грабен, который представляет собой опущенный по разломам свод Восточно-Онежского поднятия, обуславливает строение южной части котловины (Экосистема…, 1990). Береговая линия здесь слаборасчлененная, берега плоские часто заболоченные. Здесь повсеместно представлены абразионно-аккумулятивные и аккумулятивные, а также дельтовые и лагунные морфогенетические типы берегов (Игнатов и др., 2017).

Геолого-геоморфологические особенности региона также отразились на развитии и распределении гидрографической сети водосборного бассейна Онежского озера. Речная сеть в северной части водосборной территории имеет более молодой возраст. Реки часто имеют порожистые участки и водопады. Русла рек образовались в результате тектонических понижений вдоль основных разломов, что привело к невыработанным ступенчатым продольным профилям с большими уклонами, что и стало причиной формирования порожистых участков и водопадов. Реки в южной части водосбора, напротив, имеют более древний возраст и характеризуются хорошо выработанными продольными и поперечными профилями. Южная территория характеризуется меньшей озерностью и большей заболоченностью (Экосистема…, 1990, Палеолимнология …, 2022).

2.2 Геологическое строение территории водосбора

Геология района Онежского озера уникальна, здесь находится серия классических для докембрия России объектов, а также геологических памятников (Макарихин и др., 2006; Геологическое…, 2021).

В геологическом строении водосборной территории и самого Онежского озера можно выделить три комплекса пород (Палеолимнология …, 2022):

I) Северная часть водосборной территории Онежского озера располагается в пределах Карельского архейского кратона, который вместе с Мурманским и Норрботтен кратонами составляют древнее ядро Фенноскандинавского щита.

Карельский кратон сложен архейскими (3,5-2,7 млрд лет) гранитоидами тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации, среди которых залегают зеленокаменные и реже парагнейсовые комплексы (Слабунов и др., 2006; Hölttä et al., 2014).

Гранитоиды ТТГ ассоциации формируют обширные поля и купольные структуры. Зеленокаменные и парагнейсовые комплексы в свою очередь формируют узкие удлиненные пояса. Ассоциация этих пород составляет архейский гранит-зеленокаменный комплекс, который слагает значительную часть территории водосбора Онежского озера и непосредственно его восточный берег (рис. 2.1).

Наиболее древние – палеоархейские (3,5-3,24 млрд лет) ТТГ гнейсы Карельского кратона известны в виде небольших реликтов в его северо-западной (на территории Финляндии) части и в районе Онежского озера в составе кальинско-водлозерского комплекса (Ранний…, 2005; Hölttä et al., 2019). При этом большая часть ТТГ гнейсов и других гранитоидов имеет мезо-неоархейский (2,8-2,7 млрд лет) возраст.

Архейские (3,05-2,7 млрд лет) зеленокаменные комплексы формируют системы поясов в обрамлении Онежского озера: Ведлозерско-Сегозерскую – к западу, Сумозерско-Кенозерскую – к северо-востоку и Маткалахтинский пояс – к востоку (Вулканизм…, 1981; Слабунов и др., 2006; Куликов и др., 2017). Все они содержат коматииты – ультраосновные вулканические породы, а также лавы и туфы базальтов, риолитов, андезитов (в том числе, адакитов), разнообразные осадки, кварциты, колчеданы (Вулканизм…, 1981; Светов, 2009). На восточном берегу озера выходит также неоархейский онежский гранулит-эндербитовый комплекс (Костин, 1991; Слабунов и др., 2015; Лубнина, Слабунов, 2017).

II) Второй комплекс представлен породами палеопротерозойского возраста (2,5-1,65 млрд лет). Этот комплекс пород залегает по отношению к архейским с

угловым несогласием (Геология…, 1987). Палеопротерозойские осадочные, вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования в южной части кратона образуют изометричные структуры: Северо-Онежский (или Онежский) синклинорий и Южно-Онежскую мульду (Онежская…, 2011). Палеопротерозойский разрез Северо-Онежского синклинория начинается с осадочных пород и базальт-андезибазальт-андезитов сумийского надгоризонта (2,5-2,4 млрд лет) (Геология…, 1987; Melezhik et al., 2013). Интрузивные комагматы этого возраста проявлены в данном районе в виде даек и крупнейшей в Европе Бураковской перидотит-габбронoритовой расслоенной интрузии, с которой связаны месторождения хромитов и платиноидов (Лавров и др., 2004, Kulikov et al., 2010; Онежская…, 2011). Стратиграфически выше в разрезе палеопротерозоя залегают полимиктовые конгломераты и сланцы сариолийского надгоризонта (2,5-2,4 млрд лет), среди которых известны древние ледниковые образования. Важную часть рассматриваемого разреза составляют кварцевые конгломераты, песчаники, плато-базальты, карбонатные и карбонатно-терригенные породы ятулийского надгоризонта (2,3-2,1 млрд лет), содержащие следы жизнедеятельности древних цианобактерий – постройки строматолитов и онколитов (Геология…, 1987). В карбонатных породах этого надгоризонта зафиксирована глобальная положительная аномалия тяжелого изотопа углерода – событие ломагунди-ятулий (Prave et al., 2022), связанное, как считают многие, с насыщением атмосферы Земли кислородом. Кроме того, в составе ятулия установлена уникальная для докембрия 200 метровая толща каменной соли (галита) (Морозов и др., 2010), вскрытая самой глубокой (3537 м) в Карелии Онежской параметрической скважиной в районе г. Кондопоги (Онежская…, 2011; Геологическое…, 2021). В этой части синклинория ятулийские горные породы с каменной солью в основании залегают непосредственно на архейских гранитоидах. Выше залегают образования людиковийского надгоризонта (2,1-1,92 млрд лет), представленные шунгитовыми породами (Филиппов, 2002), слюдистыми и карбонатными сланцами, песчаниками, карбонатными породами, базальтами (заонежская свита) (Онежская…, 2011), а также толщей туфосланцев и лав базальтов, пикробазальтов, пикритов (суйсарская

свита) (Svetov et al., 2020). Субвулканические тела, комагматичные с ними, представлены силлами, дайками долеритов, перидотитов (в том числе Пудожгорский интрузив с месторождением титаномагнетитовых руд с медью, золотом и платиноидами) (Трофимов, Голубев, 2008). Завершается разрез палеопротерозоя в Северо-Онежском синклинории осадочными породами (аргиллиты, алевролиты, конгломераты) калевийского надгоризонта (1,92-1.8 млрд лет). Кроме того, здесь установлены древнейшие в мире (1,97 млрд лет) алмазоносные кимберлиты (Кимозерское проявление) (Ушков, 2001; Геологическое…, 2021). Южно-Онежская мульда выполнена полевошпат-кварцевыми песчаниками, алевролитами, конгломератами, красноцветными кварцитопесчаниками вепсийского надгоризонта (1,8-1,65 млрд лет), прорванными силлами габбродолеритов. В составе красноцветных кварцитопесчаников известны уникальные шокшинские малиновые кварциты (Геологическое…, 2021). Северо-восточное крыло мульды формирует дно Онежского озера в юго-западном секторе.

III) Третья часть территории – чехол Русской плиты. Это неопротерозойские (635-542 млн лет) – палеозойские отложения с субгоризональным залеганием, которые в южной части щита налегают с несогласием на все более древние образования. Разрез осадочного чехла Русской плиты, с резким угловым несогласием перекрывающего все раннедокембрийские образования щита, начинается с неопротерозойских осадочных пород вендской системы. Они залегают субгоризонтально и представлены гравелитами, песчаниками, аргиллитами буро-коричневого цвета (редкинский горизонт), которые подстилают значительную часть дна в южной части Онежского озера. Конгломераты, песчаники, аргиллиты и алевролиты девонской системы с несогласием перекрывают как вендские, так другие докембрийские комплексы. Они, как и вендские, выходят в южной части Онежского озера. На рассматриваемой территории известны осадочные породы и бокситы каменноугольной системы, их выходы расположены к юго-востоку от Онежского озера.

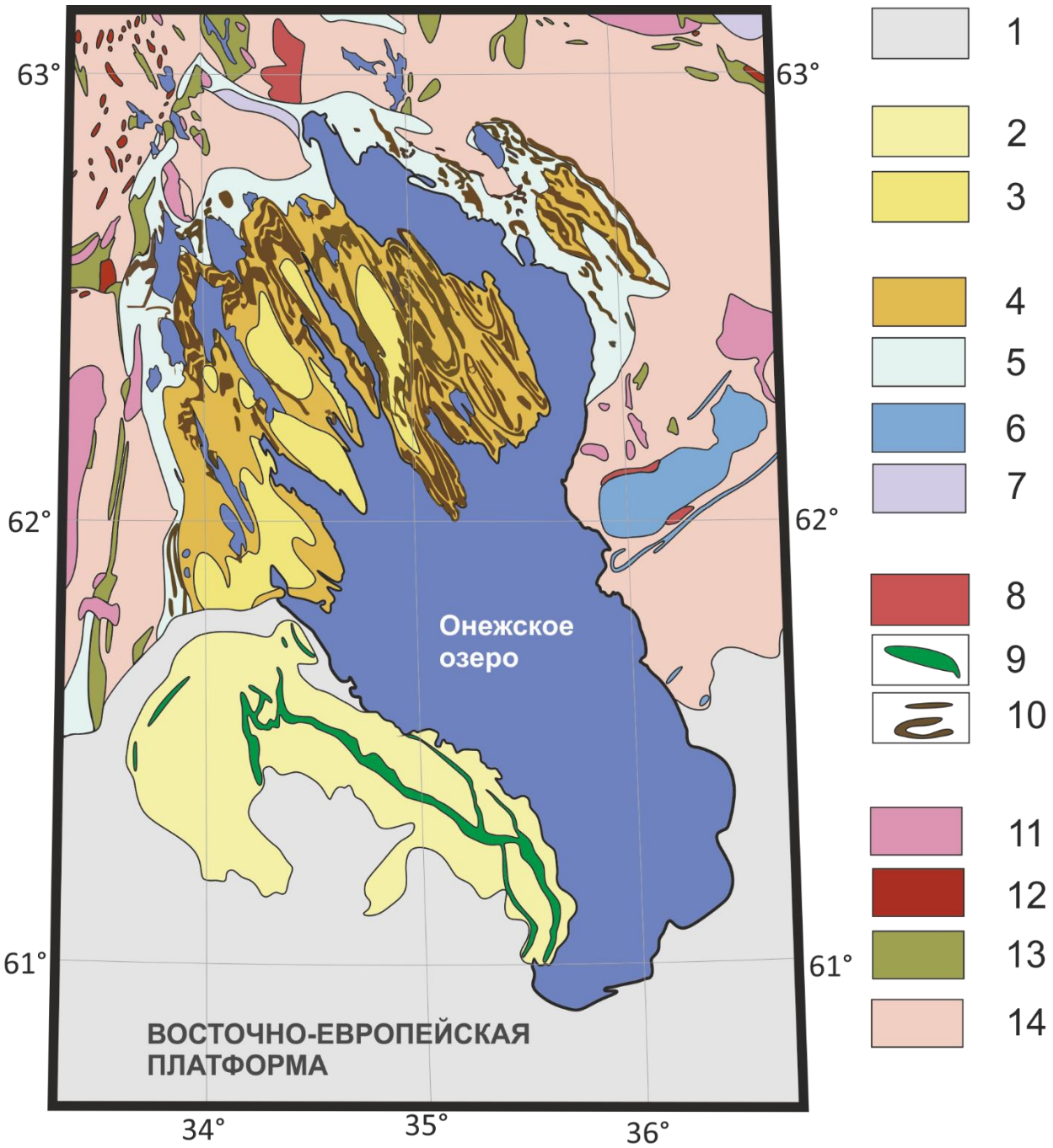


Рисунок 2.1. Схема геологического строения бассейна водосбора Онежского озера (Куликов и др., 2017, 2021): 1) Неопротерозойско-фанерозойские осадки чехла Восточно-европейской платформы; 2) Протерозойские осадочные породы (вепсийский надгоризонт); 3) Протерозойские осадочные породы (калевийский надгоризонт); 4) Протерозойские вулканогенно-осадочные породы (людиковийский надгоризонт); 5) Протерозойские вулканогенно-осадочные породы (ятулийский надгоризонт); 6) Протерозойские вулканогенно-осадочные породы (сариолийский надгоризонт); 7) Протерозойские вулканогенно-осадочные породы (сумийский надгоризонт); 8) Протерозойские граниты; 9,10) Протерозойские интрузии основного состава;11) Архейские граниты; 12) Архейские интрузии основного и ультроосновного состава; 13) Архейские зеленокаменный комплекс;14) Архейские гранитоиды и ТТГ-гнейсы.

Глава 3. ПОЛЕВЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Полевые методы исследования, отбор фактического материала

Отбор фактического материала производился с борта НИС «Эколог». Коллекция отбиралась в период с 2016 по 2022 гг. по всей акватории Онежского озера. Отбор проб осуществлялся в следующих районах Онежского озера: Повенецкий залив, Заонежский залив, Малое Онего, Лижемская губа, Уницкая губа, Кондопожская губа, Петрозаводская губа, Большое Онего, Центральное Онего, Южное Онего (рис. 3.1) (Озера…, 2013).

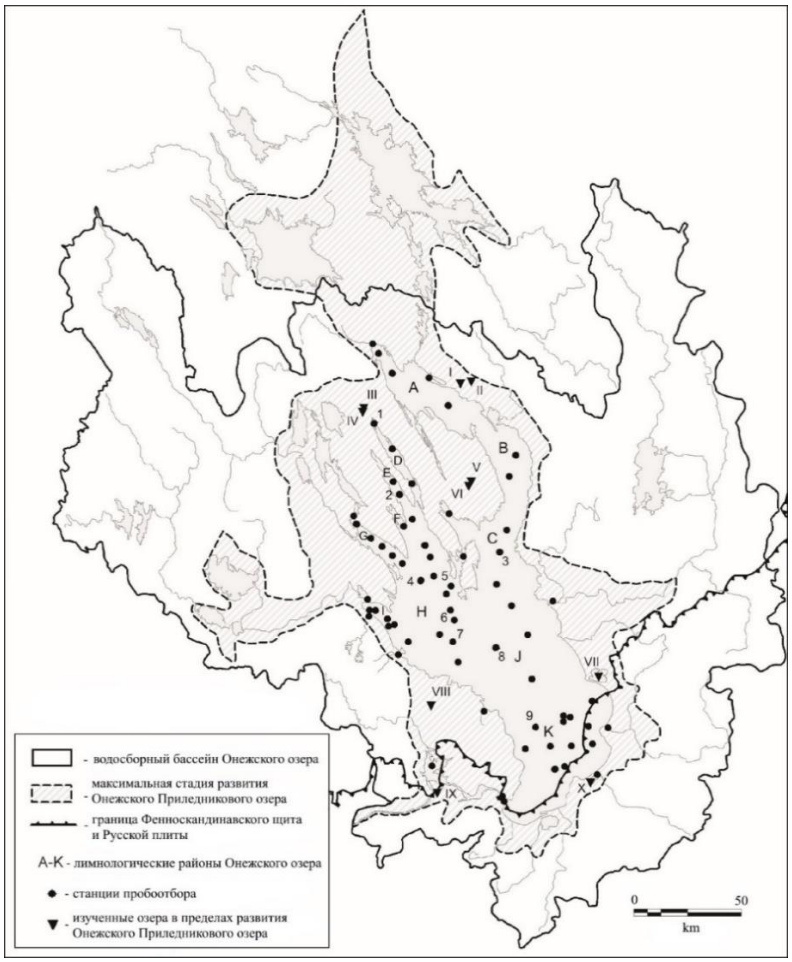


Рисунок 3.1. Карта отбора фактического материала. Лимнологические районы: A – Повенецкий залив; B – Заонежский залив; C – Малое Онего; D – Уницкая губа; E – Лижемская губа; F – Горская; G – Кондопожский залив; I – Петрозаводский залив; H – Большое Онего; J – Центральное Онего; K – Южное Онего.

Полевые исследования на Онежском озере включали следующие этапы: 1) выбор района работ в соответствии с батиметрической картой озера, результатами геофизических исследований; 2) отбор проб воды и донных отложений разными пробоотборниками; 3) установка и подъем седиментационных ловушек; 4) камеральные и измерительные работы на борту судна; 5) транспортировка проб к месту хранения.

В ходе экспедиции произведен комплексный отбор компонентов озерной системы. Отобраны пробы воды во взаимосвязи со взвешенным веществом, осадочный материал из седиментационных ловушек, образцы донных отложений.

Отбор проб воды проводился с помощью батометров «Limnos» (Limnos Ltd., Финляндия) и Рутера RT (Hydrometpribor, Латвия), скорость погружения которых контролировалась кормовой лебедкой. Глубина погружения батометра фиксировалась по эхолоту «Garmin echo MAP 50» и длине лебёдки. Отбор проб воды производился в различные емкости (из полипропилена высокой плотности и полиэтилентерефталата) в зависимости от необходимого для анализа компонента объема. Для проб воды, предназначенных для определения ртути, использовалась стеклянная тара.

Отделение взвешенного вещества в воде осуществлялось вакуумной фильтрацией на специально подготовленных предварительно взвешенных мембранных фильтрах с диаметром пор 0,45 мкм. Выбор мембранных фильтров обусловлен тем, что при аналитическом определении металлов растворенными формами считаются те, которые проходят через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм, а взвешенными – те, которые остаются на фильтре. Водные фильтраты консервировали концентрированной $HNO_{3(осч)}$ из расчета 1 мл кислоты на 100 мл пробы. Так как взвешенное вещество из озерной воды, поступающее в донные отложения, представляет собой сложную, полидисперсную, многокомпонентную систему из терригенного, биогенного и хемогенного материала, для его изучения использованы седиментационные ловушки (упрощённый вариант УСЛ–100 (СЛ)) (Lukashin et. al., 2011), изготовленные в

лаборатории палеолимнологии ИВПС КарНЦ РАН (рис. 3.2.). Время экспозиции седиментационной ловушки составляло 1 год. Установка седиментационных ловушек проводилась коллегами из ИВПС КарНЦ РАН, при эпизодическом участии автора диссертационной работы.

Рисунок 3.2. Седиментационные ловушки (изготовлены ИВПС КарНЦ РАН).

Установка седиментационных ловушек производилась в соответствии с принятыми правилами (Lukashin et. al., 2011).

Верхняя часть донных отложений (от 0 до 1 м) отбиралась при помощи пробоотборников «Limnos», стратометра Алексона, трубка «ГОИН ТГ-1». Стратометр «Limnos» (Limnos Ltd., Финляндия) состоит из набора колец высотой 1 см, которые дают возможность разделить осадок на слои за счет сдвига кольца и сохранить границу вода – дно ненарушенной (рис. 3.3.). Модифицированный лабораторией палеолимнологии ИВПС КарНЦ РАН вариант стратометра Алексона (Германия) представляет собой цилиндрическую трубку. Деление керна при его использовании на слои производилась за счет выдавливания грунта поршнем снизу. Каждый керн донных отложений фотографировался в трубке пробоотборника и кратко описывался в полевом дневнике. Пробы донных

отложений, разделенные на слои, нумеровались по порядку (сверху вниз) и упаковывались в полиэтиленовые пакеты.

Рисунок 3.3. Стратометр «Limnos» (Limnos Ltd., Финляндия).

В процессе исследований также использовался пробоотборник – трубка «ГОИН ТГ-1» (производство Россия). Он состоит из стальной трубы с внутренним вкладышем, который разделен на две половинки. Вкладыш фиксируется в трубе наконечником на ее нижнем конце, который имеет острую кромку для врезки в грунт. На верхний конец трубки навинчивается груз со стабилизатором, который облегчает врезку трубки в грунт и удерживает ее в вертикальном положении. При опускании трубки в воду в верхней части груза находится клапан, закрывающийся при подъеме трубки и открывающийся при давлении воды.

Отобранный керн выкладывался на клеенку на палубе, описывался, фотографировался, делился на слои ножом. Слои осадка также упаковывались в полиэтиленовые пакеты.

Геологический пробоотбор длинных кернов (до 3 метров) проводился с помощью ударной грунтовой трубки длиной 3 м и диаметром 127 мм общим весом

200-300 кг (рис. 3.4.). После установки судна на якорь труба выводилась краном выше кормового среза и под двигателем спускалась на грунт. Скорость лебедки составляла 5 м/с. При касании грунта вытравливание прекращалось и происходило выбирание трубки. После подъема на борт, керн переносился на бак и выдавливался из трубы, где и производилось описание керна и его фотографирование.

Рисунок 3.4. Геологический пробоотбор длинных кернов (до 3 метров).

Наиболее полные разрезы (до 11 метров) получены бурением со льда. Это позволило впервые для региона получить керн всего надледникового разреза с вхождением в плотные слои ледниковых отложений. Работы проводились в марте-апреле 2019 года с использованием поршневой системы отбора донных отложений производства UWITEC (Австрия), принадлежащей Санкт-Петербургскому государственному университету. Данная система позволяет отбирать керны длиной до 20-25 м при глубине воды до 140 м. Она состоит из треноги, трех ручных лебедок с подъемным кабелем длиной 310 м (диаметр 8 мм, материал кевлар), кабеля поршневого керноулавливателя длиной 170 м (диаметр 5 мм, покрытие из

стали) и кабеля ударного молота длиной 160 м (диаметр 3 мм, нержавеющая сталь). Вес системы составляет 200 кг, а грузоподъемность – 3200 кг (рис. 3.5.).

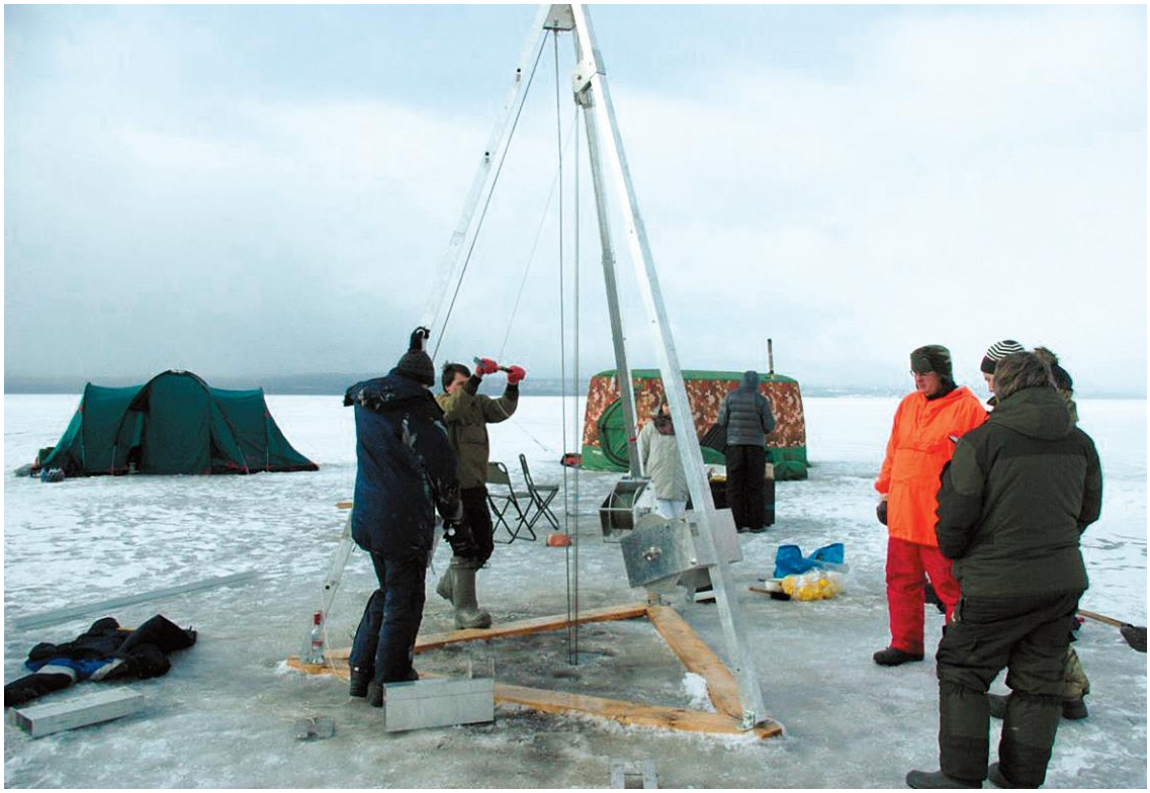


Рисунок 3.5. Общий вид буровой установки. Момент ручного забивания бурового снаряда.

Отбор керна производился вручную с помощью ударного молота весом 20 кг. Керн отбирался в ПВХ-трубки диаметром 60 мм, которые в свою очередь размещались в пробоотборной трубе. Полученные керны транспортировались в депозитарий ИВПС КарНЦ РАН при температуре 4 °С, где проводилась их обработка: трубки распиливались вдоль их оси, производилось описание кернов и отбор образцов для дальнейших исследований.

3.2 Аналитические методы исследования.

Аналитические работы проводились в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН и включали использование целого ряда методов.

Валовые концентрации макроэлементов (K, Na, Ca, Al, Fe, Mn, Mg) и микроэлементов (Sr, Sb, Ba, Be, Cd, Ni, Co, Pb Cr, Zn, и тд.) в пробах воды и донных отложений определялись методом атомно-абсорбционной спектрометрии на

спектрометре «Solaar M6» (Thermo Electron, США), снабженном зеемановским и дейтериевым корректором фона (аналитики Л. Д. Иванова, Л. Н. Букреева, О. А. Савина). Применялась пламенная (пламя – ацетилен-воздух или закись азота-ацетилен) или электротермическая атомизация (выбор был обусловлен концентрациями элемента в пробе). Разложение проб при определении валового содержания элементов в пробах донных отложений осуществляли в соответствии с аттестованной методикой (М-МВИ-80-2008, 2008). Холостой раствор готовили, используя те же реактивы и материалы, что и для подготовки анализируемых проб. Для проверки точности результатов анализа использовались государственные стандартные образцы (ГСО), в случае донных отложений был использован стандарт БИЛ-1. Относительное отклонение значения массовой доли элемента в стандарте от аттестованного значения составляло ±0,84 δ.

Ртуть в воде определялась методом «холодного пара» с применением техники амальгамирования на атомно-абсорбционном спектрометре Perkin Elmer 3030 с ртутно-гидридной приставкой MHS-20. Валовое содержание ртути в пробах осадочного материала седиментационных ловушек и донных отложений определялась на анализаторе «РА-915М» (Люмэкс, Россия) с приставкой «РП-91С» (Люмэкс, Россия) в соответствии с аккредитованной методикой М 03-09-2013 (ПНД Ф 16.1:2:2.2.80-2013, 2013) (аналитики Ж. О. Бадмаева, М. А. Густайтис). Предел обнаружения 1,0 мкг/кг.

Определение содержания естественных и техногенных (^{137}Cs, ^{210}Pb) радионуклидов проводилось гамма-спектрометрическим методом на колодезном коаксиальном детекторе из сверхчистого германия (HPGe) с предусилителем и низкофоновым криостатом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA («EurysisMesures», Франция) (аналитики М. С. Мельгунов, И. А. Никитин, Н. И. Чернакова). Объем пробы для анализа составляет 300-330 см^3. Предел обнаружения ^{137}Cs 0,01-0,03 Бк/кг, достигнут использованием камеры низкого фона (КАНИФЕР) (Бобров, Гофман, 1971). Точность и воспроизводимость анализов обусловлена использованием эталонных образцов СА-1, СИ-1 и БИЛ-1. Правильность определения естественных радионуклидов оценивалась в сравнении с данными для

стандартных образцов МАГАТЭ. Для оценки воспроизводимости при анализе донных отложений каждый 10-й образец дублировался и анализировался в строгом соответствии с методикой.

Для исследования морфологии, фазового и химического составов образцов применялся сканирующий электронный микроскоп MIRA 3 TESCAN (Tescan, Чехия), который оснащен энергетическим спектрометром «Oxford» (Oxford Instruments, Великобритания) с использованием Si (Li) энергетического детектора «Oxford», позволяющего определять элементный состав микровключений и микрочастиц, а также проводить количественный химический анализ. Для проведения количественного химического анализа по эталонам используется программа INCA Energy300.

Анализ минерального состава проб донных отложений осуществлялся с помощью метода рентгеновской дифрактометрии (XRD), используя дифрактометр ARLX'TRA (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария) и излучение CuKα. Работы по рентгеновским исследованиям проводились аналитиками Э.П. Солотчиным и А.Н. Ждановой.

Для определения химического состава: Na_2O, MgO, Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, SO_3, K_2O, CaO, V_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3, MnO, Fe_2O_3, NiO, BaO и ППП (потери при прокаливании) – использовался рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (силикатный). Пробоподготовка сводилась к: 1) высушиванию пробы при 105 °С в течение 1,5 часов (для определения гигроскопической влажности); 2) прокаливанию при 960 °С в течение 2,5 часов для определения потерь массы при прокаливании; 3) смешиванию с флюсом в соотношении 1:9 (общий вес смеси составляет 5 г). Состав флюса 66,67 % тетрабората лития; 32,83 % метабората лития и 0,5 % лития бромистого.

Получаемая смесь плавилась в индукционной печи Lifumat-2,0-Ox (Германия), материал тигля – патина. Измерения выполнялись на рентгеновском спектрометре «ARL-9900-XP» (Applied Research Laboratories, США) (аналитик Н. Г. Карманова). Для построения градуировочных зависимостей и контроля правильности анализа используются следующие государственные стандартные

образцы состава горных пород: МУ-4, МУ-3, МУ-1, СЧТ-1, СЧТ-2, СА-1, СДО-1, СДУ-1, СГ-1А, СГ-2, СГ-3. СГД-1, СГД-2, СГХ-1, СГХ- 5, СГХМ-2, СГХМ-3, СИ-1, СИ-2, СНС-1, СНС-2, СОП-1, СТ-1 и искусственные смеси на основе MgO, SiO_2, Al_2O_3, TiO_2, CaO, $CaSO_4$, Cr_2O_3, Fe_2O_3. Определяемые компоненты: Na_2O, MgO, Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, SO_3, K_2O, CaO, V_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3, MnO, Fe_2O_3, NiO, BaO и ППП. Погрешность определения не превышает таковую для второй категории точности по (ОСТ 41-08-205-99, 1999).

Для определения элементного состава образцов был использован метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (FinniganMAT), с применением пневматического концентрического распылителя Майнхарда. Работы по анализу проводились аналитиками И.В. Николаевой и С.В. Палесским. Для подготовки проб были применены как метод кислотного разложения, так и метод сплавления. Определение концентраций элементов производилось с использованием внешней градуировки с использованием многоэлементных растворов фирмы Inorganic Ventures. Для учета матричного влияния и инструментального дрейфа был использован внутренний стандарт In, добавляемый в анализируемые и градуировочные растворы с концентрацией 1 мкг/л после необходимого разведения и непосредственно перед измерением. Правильность используемой методики подтверждена на основе анализа стандартных образцов (BIL-1 и т.д.). Погрешность анализа оценивается на уровне 5-7%.

Обработка аналитических данных. Все полученные аналитические данные объединены в общий реестр в MS Excel. Статистическая обработка аналитических данных производилась при помощи программного продукта Statistica, MS Excel и включала оценку параметров распределения, проверку гипотез о виде распределения, расчет коэффициентов корреляции. Статистическая оценка значимости коэффициентов корреляции, проверка гипотез о виде распределения, проводились программой Statistica по критерию Пирсона, p-уровень 0,05.

Значения концентраций химических элементов подвергались иерархическому кластерному анализу. На основании индексов коэффициентов

корреляции связаны сходные парные группы химических элементов, затем следующие наиболее похожие парные группы и так далее, пока все химические элементы не были сгруппированы на дендрограмме методом усреднения (Davis et al., 1986).

Работа по созданию иллюстративного материала проводилась, используя программное обеспечение для работы с векторной и растровой графикой – CorelDRAW и MS Excel.

Глава 4. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

В соответствии с исследованием (Subetto et al., 2020) дно озера слагают (снизу в верх): 1) ледниковые и флювиогляциальные отложения верхнего плейстоцена. Они состоят из крупного песка с галькой, глин с валунами и валунных суглинков (обозначение gIII; fIII,); 2) выше находятся верхнеплейстоценовые лимногляциальные отложения Онежского Приледникового озера, представленные ленточными глинами, которые постепенно переходят в гомогенные глины (обозначение lgIII); 3) выше с несогласием залегают современные голоценовые отложения Онежского озера (обозначение lH) (рис. 4.1.).

В лимногляциальных отложениях выделяются три пачки. Нижняя, представленная, циклично переслаивающимися глинами коричневого цвета, серыми песками и песчано-глинистыми-алевритами Средняя – ленточными глинами серо-коричневыми и буровато-серыми, а также песчаными алевритами серого и тёмно-серого цвета. Верхняя – микрослоистыми глинами серого, светло-бурого, коричнево-серого цвета,

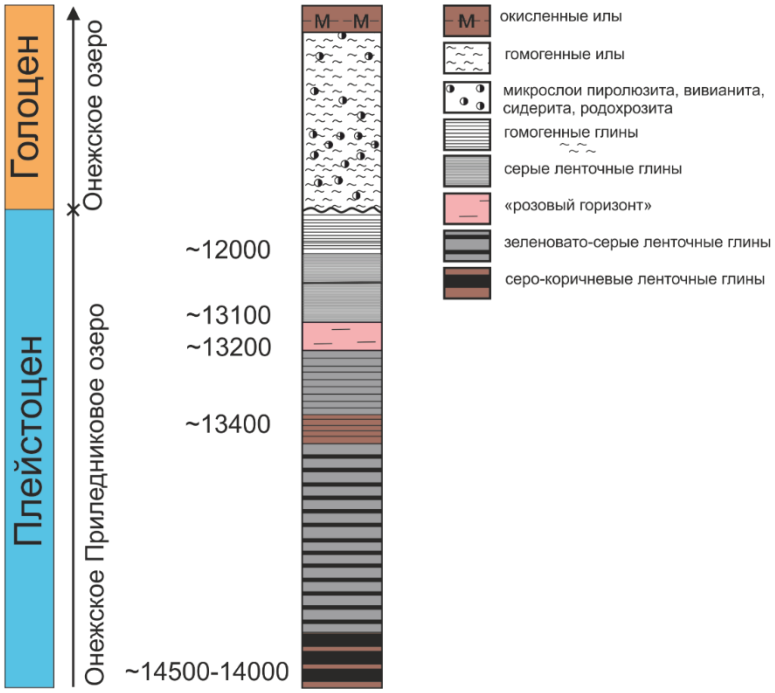


Рисунок 4.1. Сводное литологическое описание разреза донных отложений Онежского озера по данным (Saarnisto and Saarinen, 2001; Hang et al., 2019; Subetto et al., 2020.)

которые переходят в однородные светло-серые глины. Часто голоценовые отложения залегают на третьей пачке с угловым несогласием, при этом горизонт гомогенных глин отсутствует (Subetto et al., 2020; Беляев и др., 2021; Беляев, 2021).

Геофизические и комплексные работы по изучению литологического состава, проведённые коллегами (автор диссертации, также принимал участие в этих работах), позволили дать исчерпывающею характеристику строения дна Онежского озера и составить карту четвертичных отложений дна озера (рис. 4.2). Данные результаты представлены в ряде статей (Subetto et al., 2020, Беляев и др., 2021) и по итогу защищена кандидатская диссертация (Беляев, 2021). Детальная изученность литологического строения дна Онежского озера выступила фундаментом, на котором строилась данная диссертационная работа.

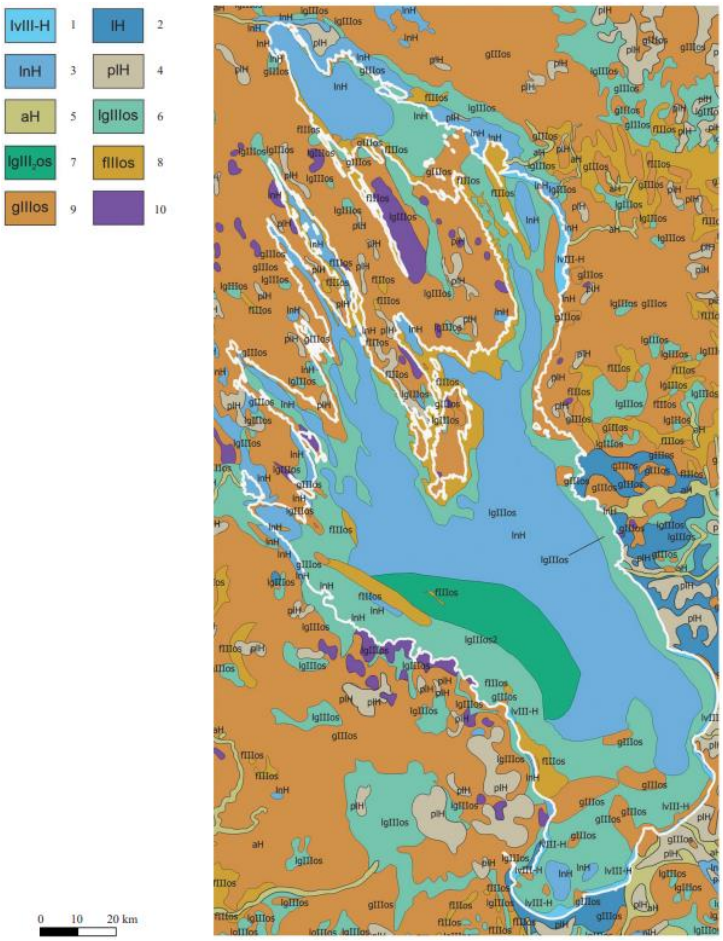


Рисунок 4.2. Схема четвертичных отложений котловины Онежского озера и прилегающих берегов (Беляев, 2021):
1 – ундаллювиальные отложения; 2 – озерные отложения нерасчлененные; 3 – озерные нефелоидные отложения; 4 – палюстринные отложения; 5 – аллювиальные отложения; 6 – нижний горизонт лимногляциальных отложений; 7 – верхний горизонт лимногляциальных отложений; 8 – флювиогляциальные отложения; 9 – морены; 10 – выходы коренных пород

4.1 Минеральный состав донных отложений Приледникового Онежского озера

Древнейшими из вскрытых бурением со льда отложений являются отложения позднего валдая, представленные ледниковыми и флювиогляциальными отложениями. Они представлены очень плотными серыми супесями, которые содержат большое количество несортированного грубообломочного материала. Основными минералами, которые составляют данные отложения, являются: кварц, полевые шпаты, мусковит, иногда хлорит, биотит, эпидот (рис. 4.3.). Среди акцессорных минералов можно выделить преобладание магнетита, гетита, титанита, рутила и циркона (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al., 2018; Strakhovenko et al., 2020а Strakhovenko et al., 2020б).

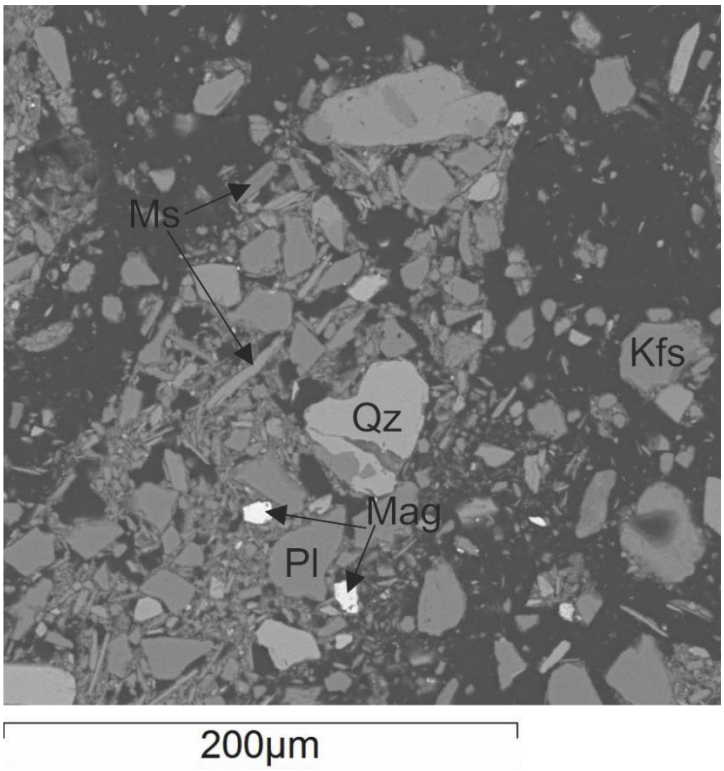


Рисунок 4.3. Минеральный состав мореных отложений, залегающих в основании разреза четвертичных отложений Онежского озера (фото выполнены с помощью электронного микроскопа MIRA-3). Ms – мусковит, Qz – кварц, Pl –плагиоклаз, Kfs – К-полевой шпат, Mag – магнетит.

Как уже было выше отмечено, на гляциальных и флювиогляциальных отложениях залегают отложения Приледникового Онежского озера, которые, согласно (Subetto et al., 2020) представлены тремя обособленными пачками ленточных глин, отличающимися мощностью варвов в пачках, цветом и

литологическим составом. Пачки последовательно сменяют друг друга в разрезе и отвечают различным стадиям существования приледникового водоёма.

Наблюдаемая слоистость ленточных глин (варвы) является отражением цикличности осадконакопления в условиях приледникового озера. Варвы – двухслойные ленты, формирующиеся в течение года в ледниковых озерах. Двухслойность варв выражается в поступлении более грубообломочного материала в весенне-летний период и более тонкого, в осенне-зимний период (De Geer, 1910).

Минеральный состав внутри слойков, слагающих варв подобен. Отличия заключаются в морфологии зерен и размерности, что хорошо наблюдается на отдельном варве, снятом при помощи электронного микроскопа (рис. 4.4.). Мощность варва около 1 мм. Он состоит из грубообломочного (весенне-летний период) и более тонкого, алевро-пелитового, пелитового (осенне-зимний период) материала сходного минерального состава (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al., 2018; Strakhovenko et al., 2020а Strakhovenko et al., 2020б).

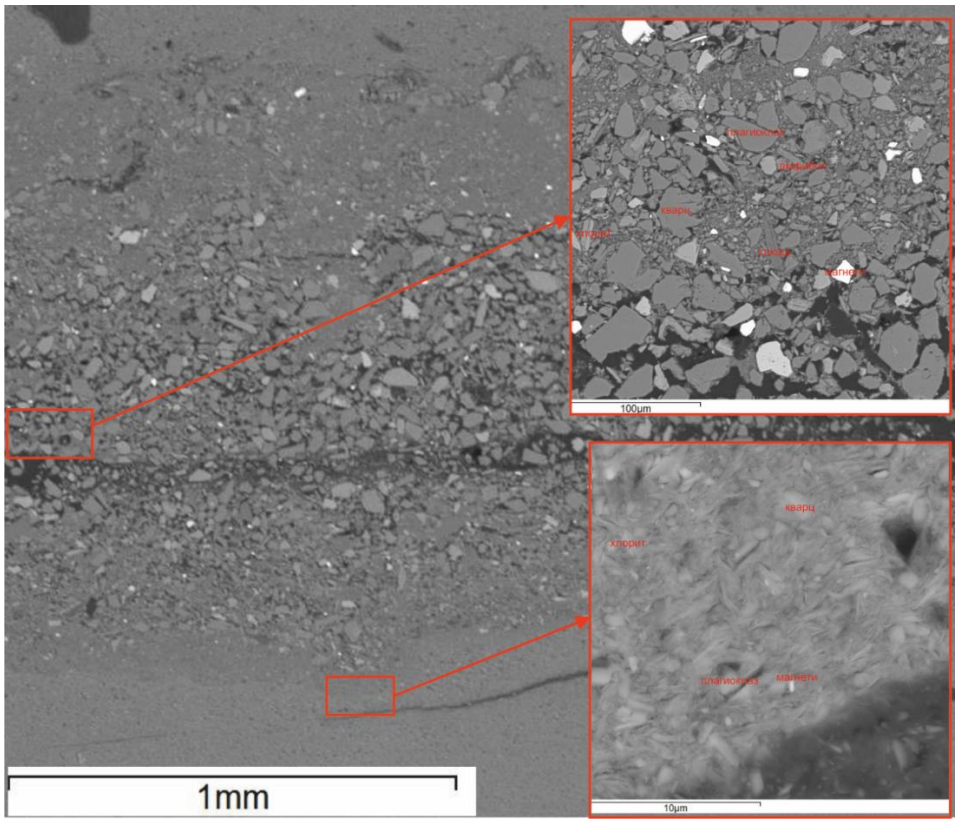


Рисунок 4.4. Серо-зеленый слой варв мощностью 10–15 мм грубообломочного и тонкого, алевро-пелитового материала (фото выполнены с помощью электронного микроскопа MIRA-3)

Изучение минерального состава ленточных глин показало, что зерна кварца, полевых шпатов (преимущественно плагиоклазов Ab_{70-100}, K-полевой шпат) разной размерности, степени окатанности, морфологии преобладают среди терригенных минералов (рис. 4.5.).

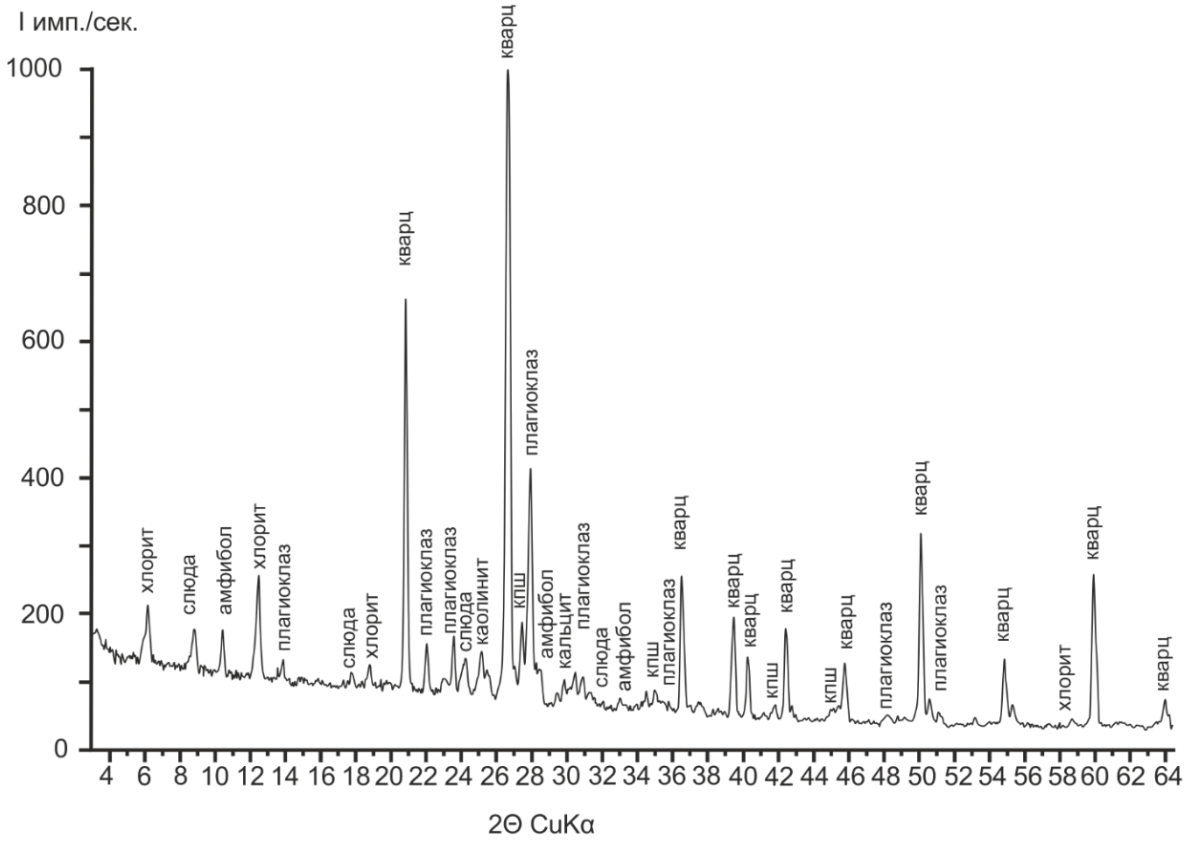


Рисунок 4.5 Рентгенограмма лимногляциальных отложений Онежского Приледникового озера (нижняя пачка).

Также постоянно присутствуют пластинки мусковита, крупные и мелкие чешуйки хлорита, иллита, биотита, актинолита, эпидота, хотя и выявлены в меньших количествах. В микроколичествах установлен диопсид, эгирин, альмандин, каолинит (рис. 4.4., 4.5.).

Состав акцессорных минералов тяжелой фракции постоянен: преобладают магнетит, титанит, циркон, апатит, монацит, ильменит, рутил; наряду с которыми редко присутствуют гематит, торит, пирит, ильменорутил, халькопирит, сфалерит (Палеолимнология …, 2022).

4.2. Минеральный состав голоценовых донных отложений Онежского озера.

Лимногляциальные отложения постепенно переходят в современные озерные отложения, нижняя часть которых представлена гомогенными илами.

Гомогенные илы – коричневато-серый глинистый алеврит, гомогенный. По всей длине керна гомогенных илов во всех скважинах отбора постоянно присутствуют тонкие слойки (0,5 мм – 1 см) и стяжения зеленого, черного и кремового цветов (рис 4.8.). Они характеризуются неравномерным распределением по глубине керна. Количество и распределение тонких слойков сильно отличается от керна к керну независимо от района акватории озера, глубины отбора керна (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al., 2018; Strakhovenko et al., 2020а Strakhovenko et al., 2020б).

Анализ минеральных ассоциаций донных отложений Онежского озера с использованием методов рентгеновской дифрактометрии (XRD), инфракрасной (ИК) спектроскопии, а также при детальном изучении текстурно-структурных особенностей осадка, морфологических особенностей минералов, химического состава и структурных данных на уровне отдельных зерен, сростков и пседоморфоз с использованием СЭМ показало следующее:

Основными компонентами гомогенных илов являются минералы терригенной фракции (кварц, плагиоклаз Ab_{70-100}, K-полевой шпат) пелитовой размерности, диатомовые водоросли, Fe-иллит и Fe-хлорит, мусковит, биотит. Пироксены, амфиболы, эпидот и акцессорные минералы, такие как рутил, ильменит, магнетит, титанит, циркон и гематит встречаются в микроколичествах (рис. 4.6*)*.

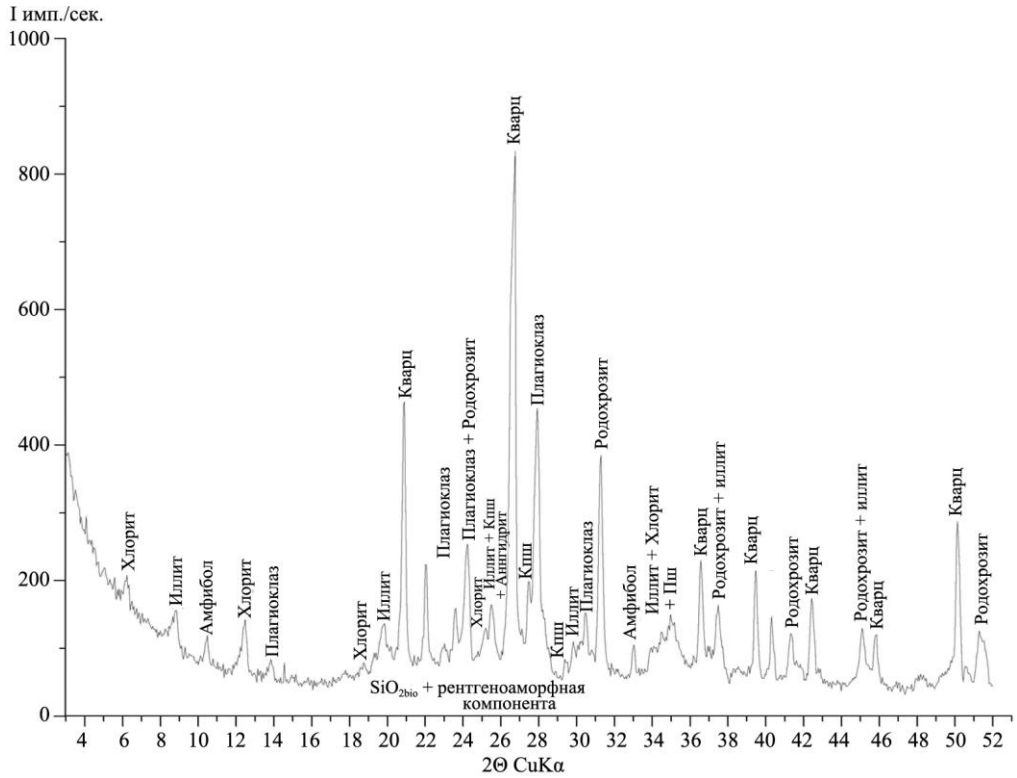


Рисунок 4.6. Рентгенограмма голоценовых озерных отложений Онежского озера (гомогенных илов)

Ассоциация слоистых силикатов (например, в образце из Петрозаводской губы) представлена слюдами (мусковит, иллит), хлоритами, а также смешанными слоистыми хлорит-смектитами. В соответствии с рекомендациями Номенклатурного комитета (Bailey et al., 1984) мы используем термин «иллит» в качестве названия группы для всех высокодисперсных слюдистых минералов, в которых количество набухающих смектитовых прослоек не превышает 15 % (Дриц, Коссовская, 1991). Химический состав данных минеральных фаз приблизительно соответствует теоретическим составам Fe-иллита и Fe-хлорита (табл. 4.1.).

Таблица 4.1. Химический состав смешаннослоистых и слоистых минералов в пробах донных отложений Онежского озера по результатам СЭМ, масс. %

Минерал	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	K_2O
Иллит	41,2–56,4	2,6–5,2	9,1–18,1	0,5–1,6	0,3–0,9	4,1–6,7
Хлорит	25,1–30,2	4,8–20,6	11,2–51,2	0,1–11,2	н.п.	н.п.

Фазы Fe-иллита и Fe-хлорита преимущественно имеют спутанноволокнистую и/или микрочешуйчатую морфологию, но иногда можно наблюдать сферические выделения (рис.4.7.).

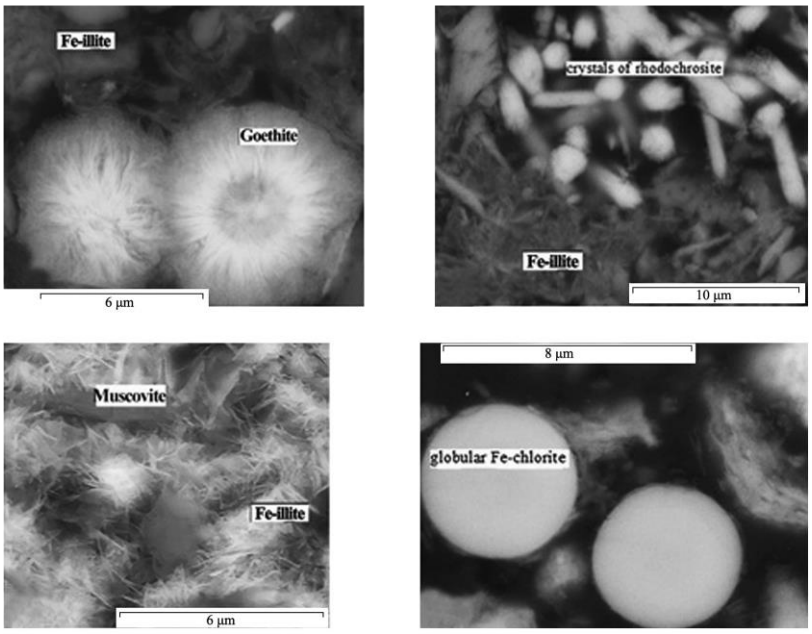


Рисунок 4.7. Агрегаты Fe-иллита и Fe-хлорита, распространенные по всей глубине кернов донных отложений Онежского озера (фотографии выполнены с помощью электронного микроскопа MIRA-3).

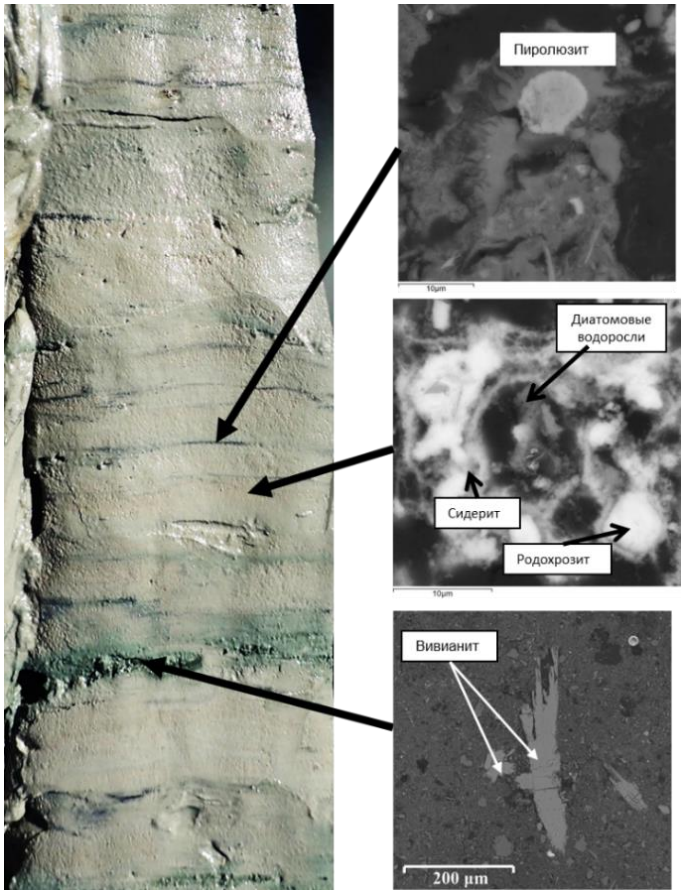


Рисунок 4.8. Прослои и стяжения аутигенных минералов в серо-зеленых гомогенных илах и фотографии аутигенных минералов, выполненных с помощью электронного микроскопа.

Детальное изучение минерального состава отдельных слойков и стяжений позволило установить, что зеленые прослои состоят из вивианита; черные из пиролюзита, кремовые из родохрозита и сидерита (Рис. 4.8.; 4.9.).

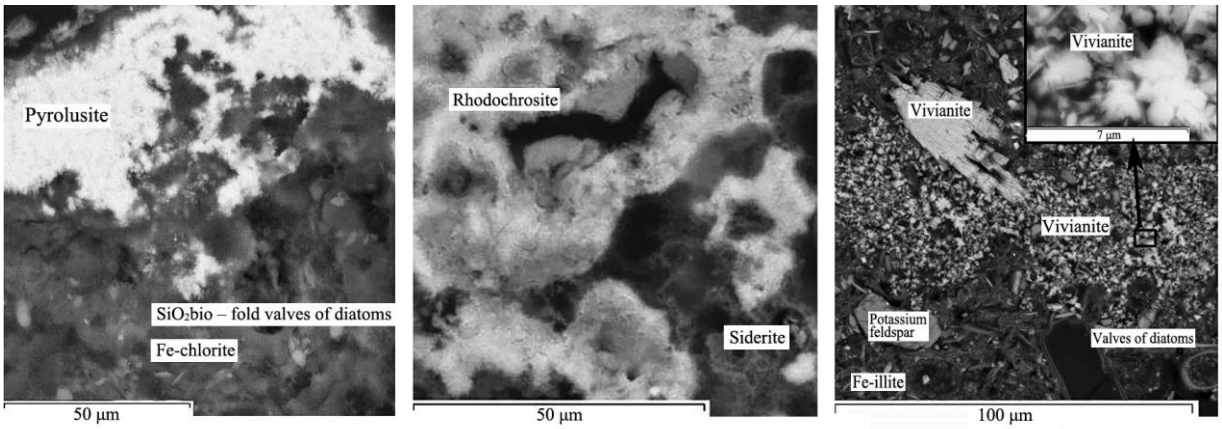


Рисунок 4.9. Мелкодисперсный агрегат пиролюзита с участками субпараллельных образований, связанных с присутствием створок диатомовых водорослей (опал) и микрочешуйчатых агрегатов Fe-иллита (черный горизонт) (А); зонально-концентрические образования с отчетливыми микрослоями родохрозита и сидерита (кремовый горизонт) (Б); отдельные кристаллы и их микроагрегаты фосфата железа (вивианита) (зеленый горизонт) (В) (фотографии выполнены с помощью электронного микроскопа MIRA-3)

Согласно 69 анализам (полученных с помощь детектора EDS на СЭМ) радиально-шестоватых кристаллов вивианита, в различных кернах донных отложений состав этой минеральной фазы варьирует следующим образом (%): Fe 26,3-30,0; Mn 3,9-6,6; P 10,9-12,6 и O 40,2-47,0 при разбросе сумм анализов от 86,1 до 92,2.

Отдельные крупные кристаллы фосфата железа изучены с помощью микроскопа Olympus BHSM и с помощью рамановской спектроскопии. Диапазон от 200 до 1300 см $^{-1}$ спектра комбинационного рассеяния этой минеральной фазы показывает сложный профиль с полосами компонентов, характер которых имеет очевидное сходство со спектральной характеристикой комбинационного рассеяния вивианита (рис. 4.10.) (Палеолимнология …, 2022; Malov et al., 2022).

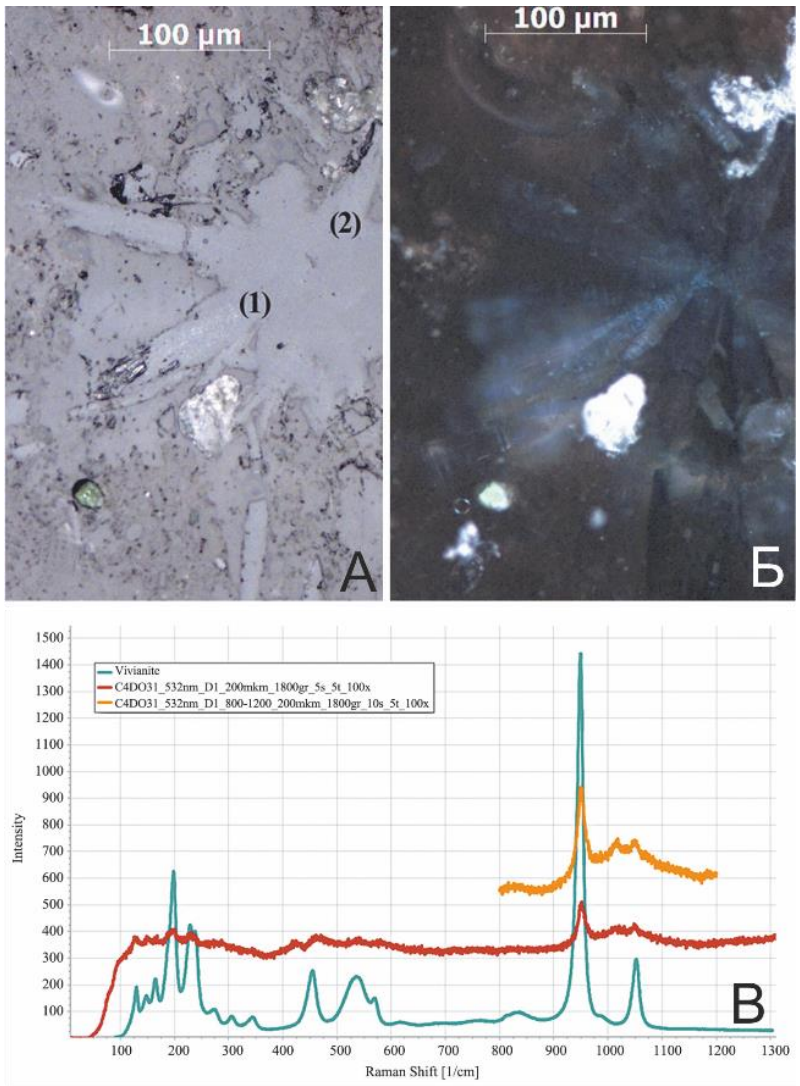


Рисунок 4.10. Минеральная фаза вивианита (фотографии выполнены с использованием микроскопа Olympus BHSM): А – проходящий свет; Б – скрещенные николи; В – рамановский спектр минеральной фазы вивианита.

Методом порошковой рентгеновской дифрактометрии было подтверждено, что обнаруженная фаза фосфата железа является вивианитом (рис. 4.11.).

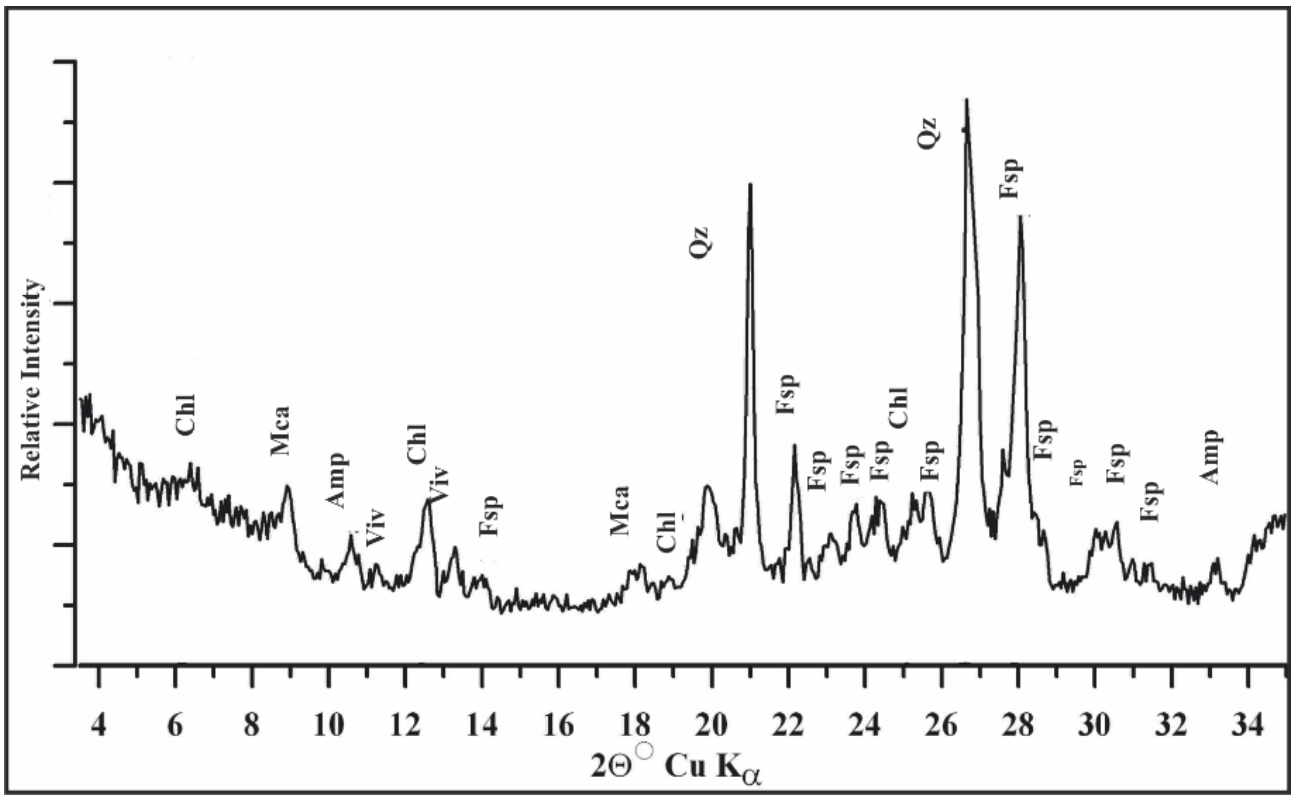


Рисунок 4.11. Рентгенограмма материала зеленых прослоев из гомогенных илов содержащего вивианит. Chl – хлорит, Mca – сслюда, Amp – амфибол, Viv – вивианит, Fsp – K-полевой шпат, Qz – кварц.

Фосфор (P) является важным питательным веществом, контролирующим первичную продукцию в водных системах. Баланс поступления и захоронения фосфора и его биодоступность и стабильность в захороненном виде, являются ключевыми факторами, регулирующими процесс эвтрофикации водоема. Основными формами захоронения фосфора являются: органическое вещество, гидроксиды Fe (в сорбируемой форме), аутигенные минералы (апатит, вивианит, карбонаты). Предполагается, что в глобальном масштабе в аутигенном апатите содержит ~50% всего P, захороненного в морских отложениях, в то время как P связанный с Fe и органический P содержит по ~25%. Однако для пресноводной системы вивианит играет большую роль в захоронении фосфора (Rothe et al., 2016).

Гидрооксиды Fe играют важную роль в образовании вивианита и соответственно в захоронении фосфора. Гидроксиды Fe эффективно удаляют ортофосфат из воды сорбируя его на себя (рис. 4.12.), и, подвергаясь микробному и химическому восстановлению в донных отложениях, они служат источником Fe^{2+} и ортофосфата необходимых для формирования вивианита (Melton et al., 2014).

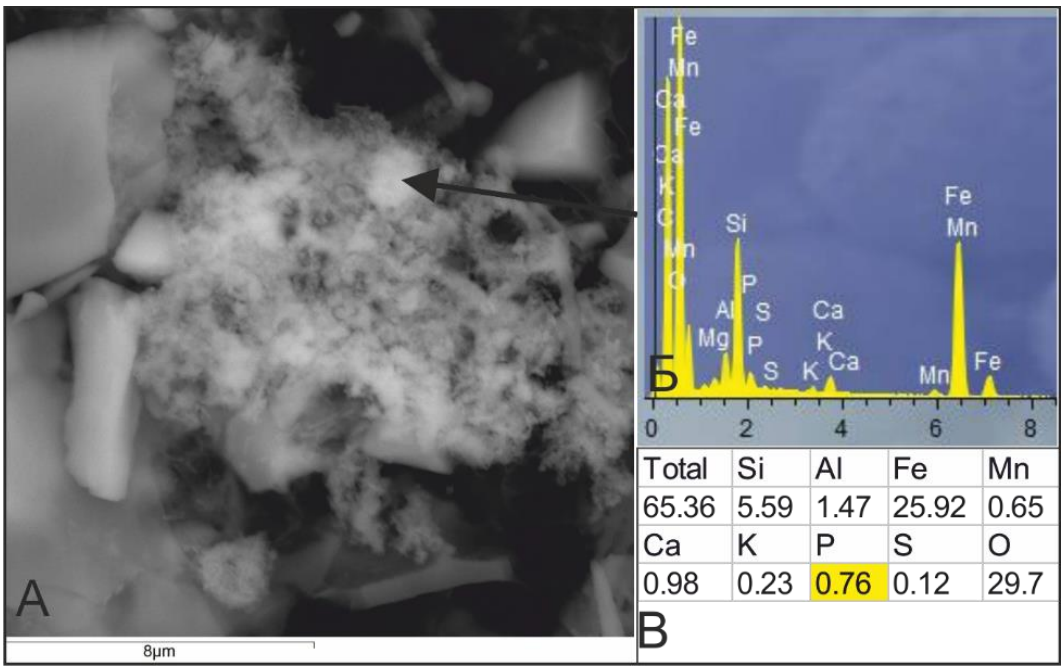


Рисунок 4.12. Гидроксиды Fe во взвеси воды Онежского озера. А) творожестые выделения гидроксидов железа (фотография выполнены с помощью электронного микроскопа MIRA-3); Б, В) Химический состав гидроксидов железа.

В более ранних работах научного руководителя диссертанта установлено, что в верхней части современных донных отложений Онежского озера существуют два типа стратификации, которые обусловлены глубиной нахождения редокс-границы в донных отложениях (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al., 2018; Strakhovenko et al., 2020а Strakhovenko et al., 2020б). Первый тип стратификации донных отложений характеризуется наличием мощной зоны (20-35 см), сложенной окисленным илом. Во втором типе окисленная часть представлена наилком, состоящим из частиц охристого или коричнево-красного цвета толщиной от 1 до 4-5 мм. Наилок – верхний флоккулированный слой над осадками представляет собой свежеосажденное взвешенное вещество. Его толщина редко превышает 1-2 см, влажность составляет более 99 % (Strakhovenko et al., 2020а, б) (рис. 4.13.). Ниже окисленной части в обоих типах разрезов залегает гомогенный ил, который был описан выше.

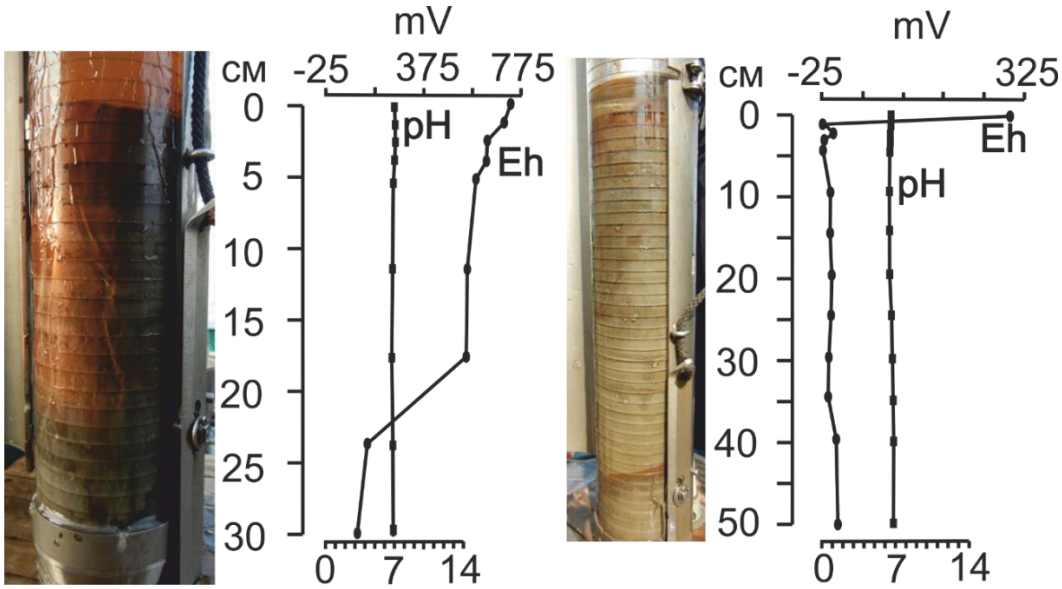


Рисунок 4.13. Два типа колонок донных отложений.

Изучение вещественного состава показало, что окисленная часть преимущественно состоит из аморфного кремнезема, слагающие панцири диатомовых водорослей, кварца, плагиоклаза, калиевого полевого шпата, иллита, хлорита, гидрокислов Fe и Mn (рис. 4.14.).

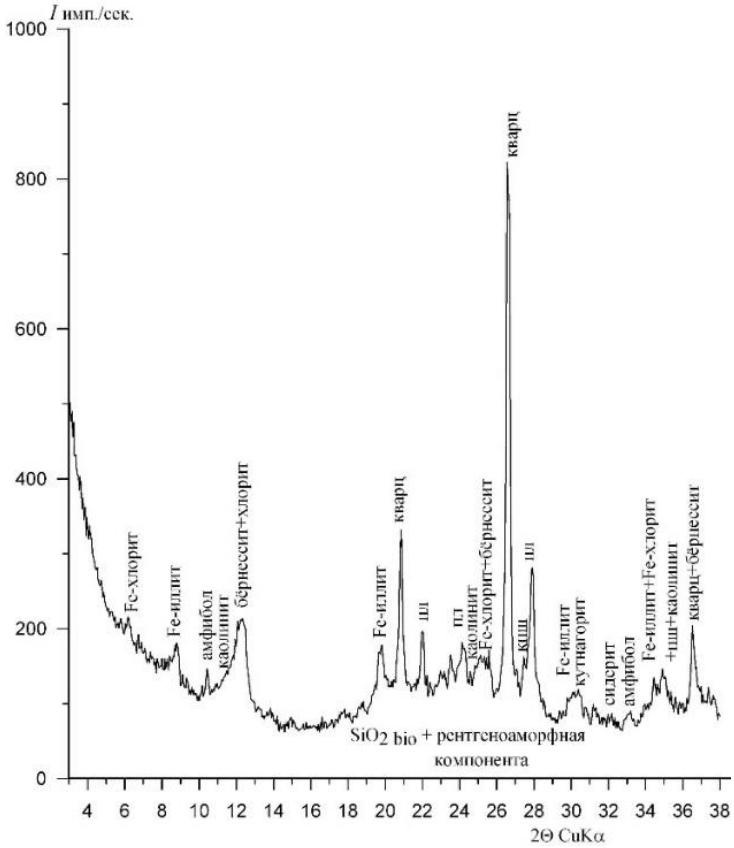


Рисунок 4.14. Рентгенограмма голоценовых озерных отложений Онежского озера (окисленных илов)

В нижней части окисленного донного осадка в первом типе разрезов, располагается зональный рудный слой, который состоит из черной и бурой части. Зональное строение рудной корки проявлено во всех кернах и имеет следующее строение: верхний тончайший (<3 мм) марганцевый слоёк, ниже более мощный (до 2 см) слой железистый (рис. 4.15.).

Рисунок 4.15. Керн голоценовых донных отложений Онежского озера, I тип

Марганцевый слоёк сложен обособленными микроконкрециями Mn в ассоциации со створками диатомей, Fe-иллитом или Fe-хлоритом и зернами терригенных минералов (рис. 4.16.). Все микроконкреции Mn независимо от размера имеют сферическую форму, радиально-лучистое строение, осложненное внутренней, иногда несимметричной структурой, состоят из ядра и облекающих его оболочек (часто рентгеноаморфных) (рис. 4.16.).

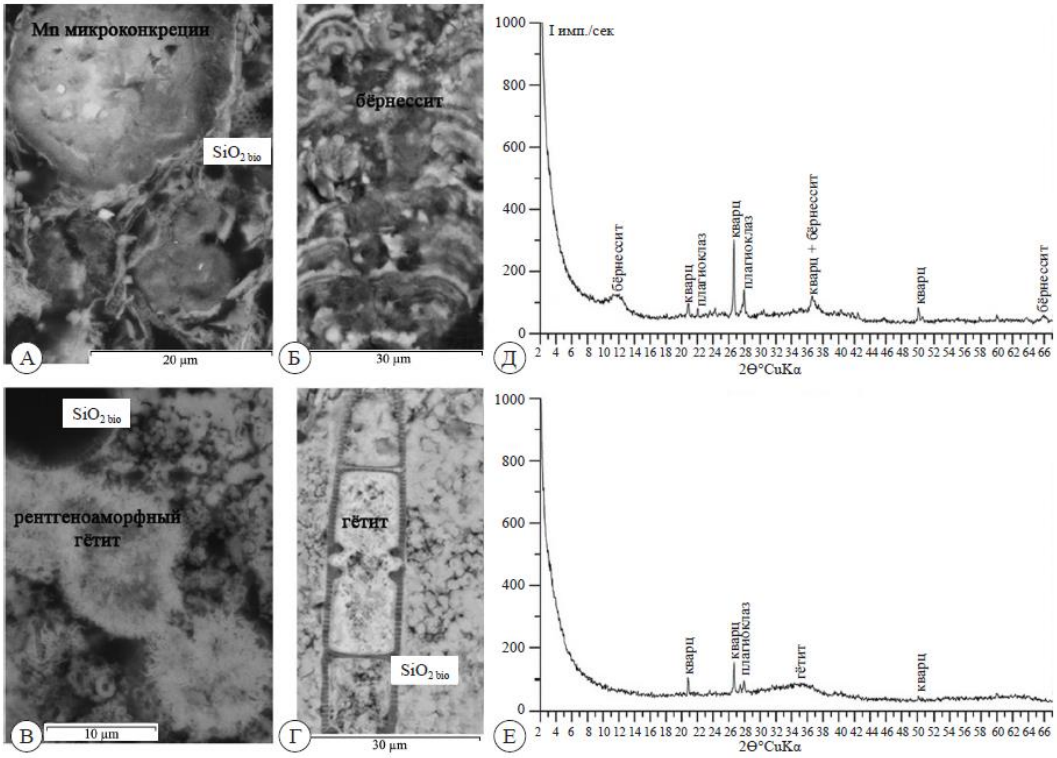


Рисунок 4.16. Микрофотографии минералов, составляющих рудный слой в кернах донных отложений первого типа Онежского озера (А-Г), и дифрактограммы донных отложений в кернах с Mn слоем (Д) и в кернах с Fe слоем (Е). Mn слой в кернах: А – микроконкреции, сложенные пиролюзитом, связанным со створками диатомовых водорослей, Fe-иллит; Б – микроконкреции, сложенные бернесситом и Fe-иллитом; Fe слой в кернах: В – рентгеноаморфный гетит, связанный с SiO_2bio – створки диатомовых водорослей (опал); Г – зерна гетита со створками диатомовых водорослей.

Марганцевые микроконкреции по сравнению со вмещающими отложениями слегка обогащены Ba. Ниже марганцевого микрослоя образуется микрослой, сложенный гидроксидами железа, колломорфными образованиями с различной морфологией и степенью кристалличности выделений от микроконкреций до тонкоигольчатых, листоватых кристаллов и псевдоморфоз по органическим остаткам в ассоциации с терригенными минералами, фрагментами диатомовых водорослей, слоистых силикатов (Fe-иллитом или Fe-хлоритом) (рис. 4.17.).

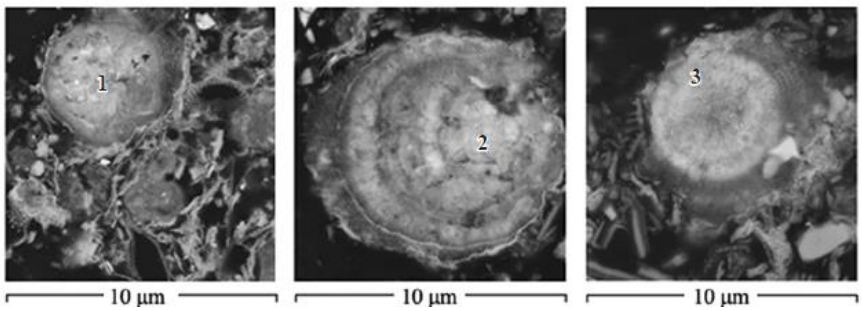


Рисунок 4.17. Микроконкреции марганца из разных районов Онежского озера

Железистые микроконкреции, сфероподобные с зонально-концентрическим строением, чаще всего имеют неправильную форму (рис. 4.18. А–Б). Сложены данные образования преимущественно гетитом, который иногда образует псевдоморфозы по различным субстратам (диатомовые, чешуйки хлорита и растительные остатки) (рис. 4.18. В) или творожистую массу, сложенную мельчайшими зернами (~1 мкм)

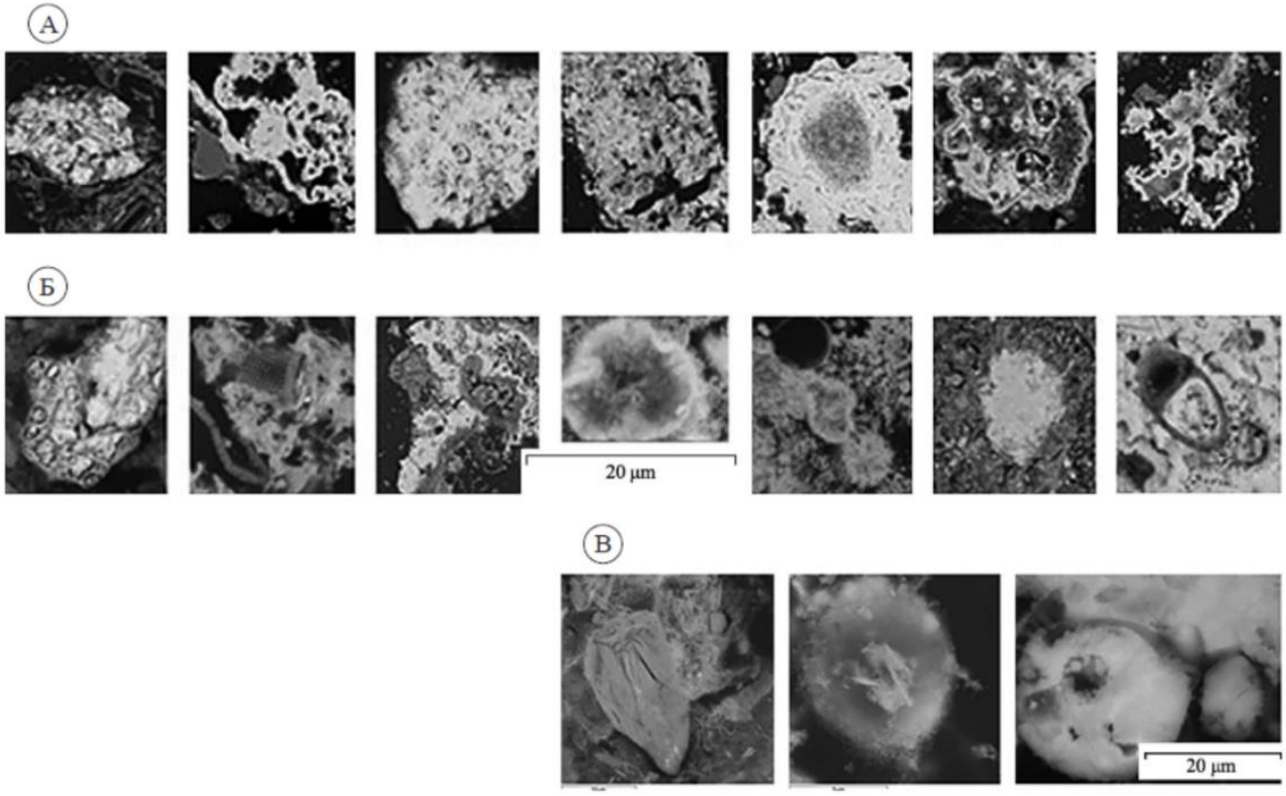


Рисунок 4.18. Микроконкреции железа из разных районов Онежского озера (А); микроконкреции, сфероподобные, с зонально-концентрическим строением, имеющие преимущественно неправильную форму (Б); псевдоморфозы гетита по различным субстратам (диатомовые, чешуйки хлорита и растительные остатки) (В) (фотографии выполнены с использованием электронного микроскопа MIRA-3)

При определении минерального состава марганцевых микроконкреций методом рентгеноструктурного анализа в образцах данного микрослоя диагностированы бёрнессит и пиролюзит (рис. 4.16.). Микроанализ химического состава различных слоев микроконкреций Mn, а также их анализ рамановской микрозондовой спектроскопией показал наличие в их составе переслаивания различных Mn минеральных фаз: кроме названных минералов, также присутствуют

пирохроит, тодорокит, вернадит. По данным 189 анализов варьирование элементов в них (%): Fe (0,2-12,6); Mn (10,4-52,6); Ba (1,9-12,6); O (30,2-46,0); Na (0,0-1,2); Al (0,2-6,6); Ca (0,0-6,0); сумма (56,1-98,2) (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al.,2020б).

Определение минеральных фаз Fe в микроконкрециях довольно сложно из-за наличия большого количества псевдоморфоз гидроксидов Fe по органическим остаткам, а также наличия плохо кристаллизованных и рентгеноаморфных фаз. Часть микроконкреций состоит из кристаллического гетита. Согласно данным 154 фаз Fe, варьирование элементов выглядит следующим образом (%): Fe (23-65), Mn (0-19), Ba (0-0,6), O (26,2-47,0), P (0,4-4,2) и всего (55,1-100,2).

4.3 Латеральные различия в минеральном составе.

Сопоставление минерального состава донных отложений из разных районов Онежского озера показало, что кварц, полевые шпаты (альбит – олигоклаз, а в меньшей степени – калиевый полевой шпат) и мусковит преобладают среди терригенных минералов во всех образцах донных отложений вне зависимости от района Онежского озера. Это связано с широким распространением в северной части водосбора озера гранитоидов тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации, в составе которых превалирует кварц, полевые шпаты.

Темноцветными минералами являются эпидот, биотит, пироксены и амфиболы, в меньших количествах встречаются акцессорные минералы – рутил, апатит, ильменит, магнетит, титанит, циркон, монацит, ксенотим, гематит.

Некоторые темноцветные и акцессорные минералы встречаются только в определенных заливах и районах Онежского озера (табл. 4.2.) или имеют определенный состав характерный для определенного района.

Таблица 4.2. Встречаемость темноцветных и акцессорных минералов в донных отложениях разных лимнологических районов Онежского озера.

	темноцветные минералы					акцессорные минералы							
	Bt	Aeg-Aug	Di	Hbl	Ep	Rt	Ilm	Mag	Ttn	Zrn	Mnz	Xtm	Hem
Повенецкий залив				+		+	+		+				
Заонежский залив			+			+							
Малое Онего	+		+	+	+				+	+		+	
Уницкая губа			+	+			+	+	+				
Лижемская губа			+	+	+	+	+	+	+				
Кондопожский залив	+		+	+		+	+	+					
Петрозаводская губа	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+
Большое Онего		+	+	+		+	+	+	+	+			
Центральное Онего	+		+		+	+	+	+	+		+		
Южное Онего	+		+			+	+	+	+				

* – символьные обозначение минералов (Warr, 2021)
Bt – биотит; Aeg-Aug – эгирин-авгит; Di – диопсид; Hbl – роговая обманка; Ep – эпидот; Rt – рутил; Ilm – ильменит; Mag – магнетит; Ttn – титанит; Zrn – циркон; Xtm – ксенотим; Hem – гематит.

Например, эгирин-авгит (рис. 4.19. А) встречаются только в Петрозаводской губе и Большом Онего в отличии от диопсида (рис. 4.19. Б, В), который был найден почти во всех районах озера.

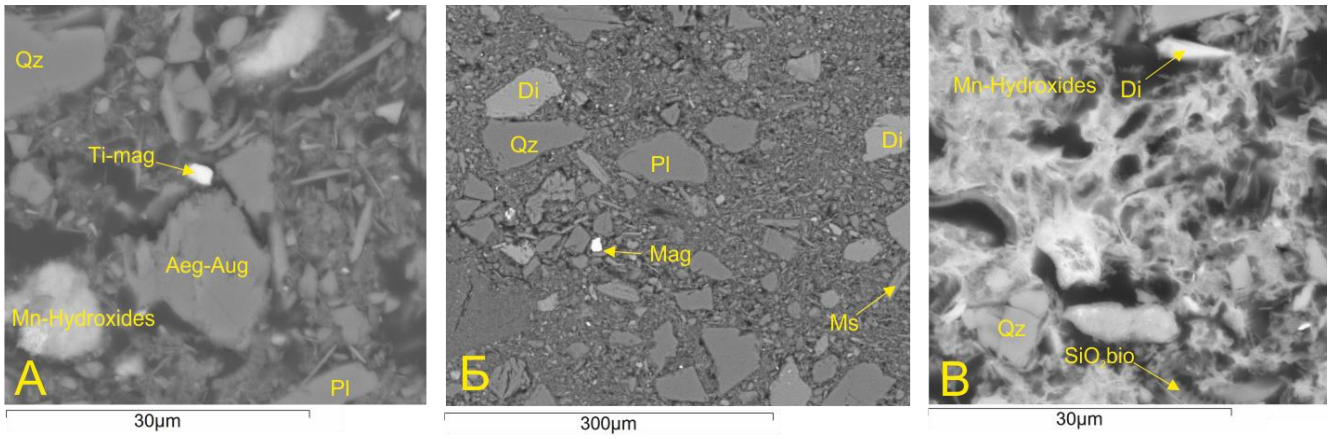


Рисунок 4.19. Акцессорные минералы в донных отложениях А) Петрозаводской губы, Б) Заонежский залив, В) Уницкой губы (фотографии выполнены с использованием электронного микроскопа MIRA-3). Qz – кварц; Pl – плагиоклаз; Aeg-Aug – эгирин-авгит; Di – диопсид; Mag – магнетит; Ti -mag – Ti-магнетит Ms – мусковит.

Амфиболы в основном представлены роговой обманкой (рис. 4.20.) и встречаются во всех районах кроме Заонежского залива, Цетрального и Южного Онего. В Кондопожской губе были найдены тонкоигольчатые клубкообразные

выделения тремолита, источником которого предположительно может служить Кондопожский ЦБК, который использует тремолит асбест.

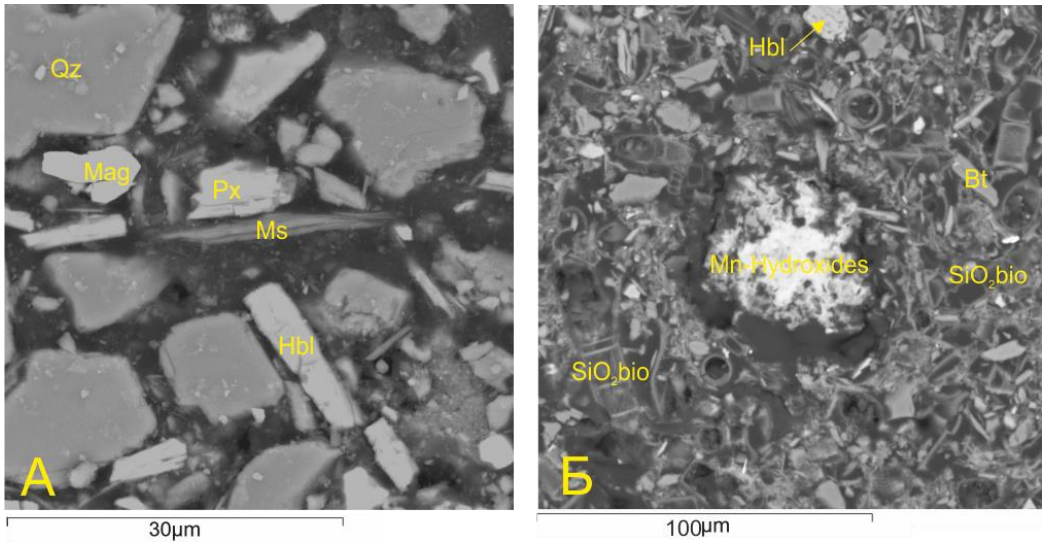


Рисунок 4.20. Донные отложения А) Большого Онего, Б) Петрозаводской губы (фотографии выполнены с использованием электронного микроскопа MIRA-3). Qz – кварц; Bt – биотит; Hbl – роговая обманка; Px – пироксен; Ms – мусковит.

Эпидот встречается почти везде (рис. 4.22.), но наибольшее его количество наблюдается в Центральном и Южном Онего, Петрозаводской губе, что может быть связано с выходами эффузивных пород в районе Петрозаводской губы и выходами среднепротерозойских ультраосновных и основных пород в районе водосбора р. Водла, впадающей в Онежское озеро в районе Центрального Онего. Также стоит отметить, что в Центральном Онего и Петрозаводском заливе найдены Ce разности эпидота (рис. 4.22.), что может быть связанно с выходами гранитоидов на водосборной территории.

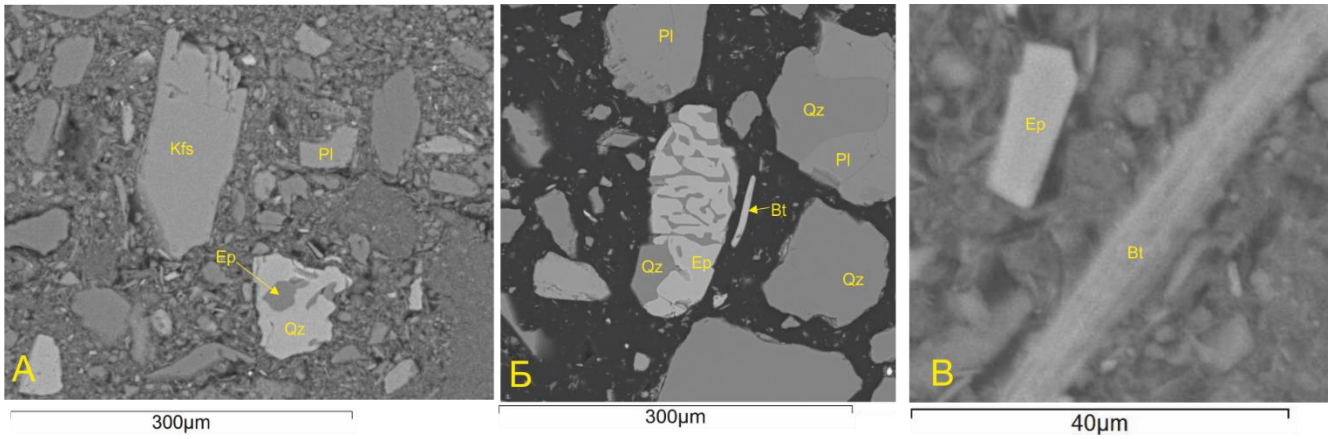


Рисунок 4.21. Эпидот из донных отложений А) Заонежского залива, Б) Петрозаводской губы, В) Центрального Онего (фотографии выполнены с использованием электронного микроскопа MIRA-3). Qz – кварц; Kfs – К-полевой шпат; Pl – плагиоклаз; Bt – биотит; Ep – эпидот.

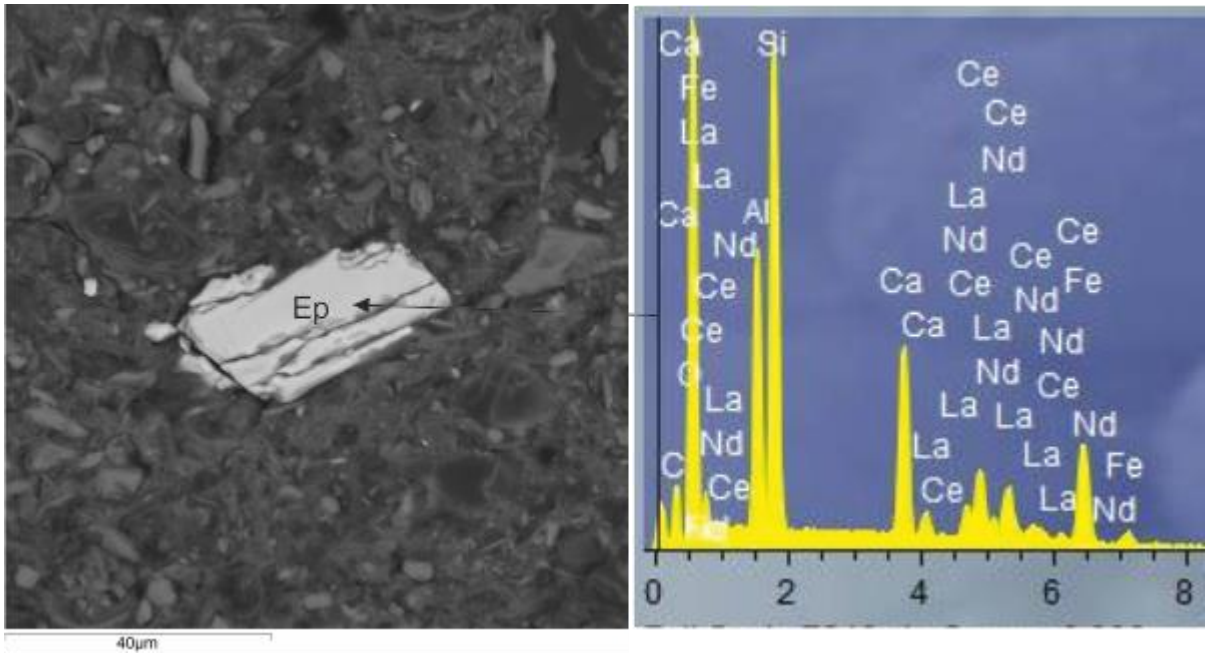


Рисунок 4.22. Ce содержащий эпидот из донных отложений Центрального Онего (фотографии выполнены с использованием электронного микроскопа MIRA-3). Ep – эпидот.

Среди акцессорных минералов преобладают рутил, ильменит, титанит, магнетит. Эти акцессорные минералы обнаружены в большинстве районов озера за исключением некоторых заливов и губ. По составу в Петрозаводской губе и Южном Онего помимо «чистых» рутила, ильменита, титанита, магнетита были обнаружены их ванадий содержащие разности (рис. 4.23.).

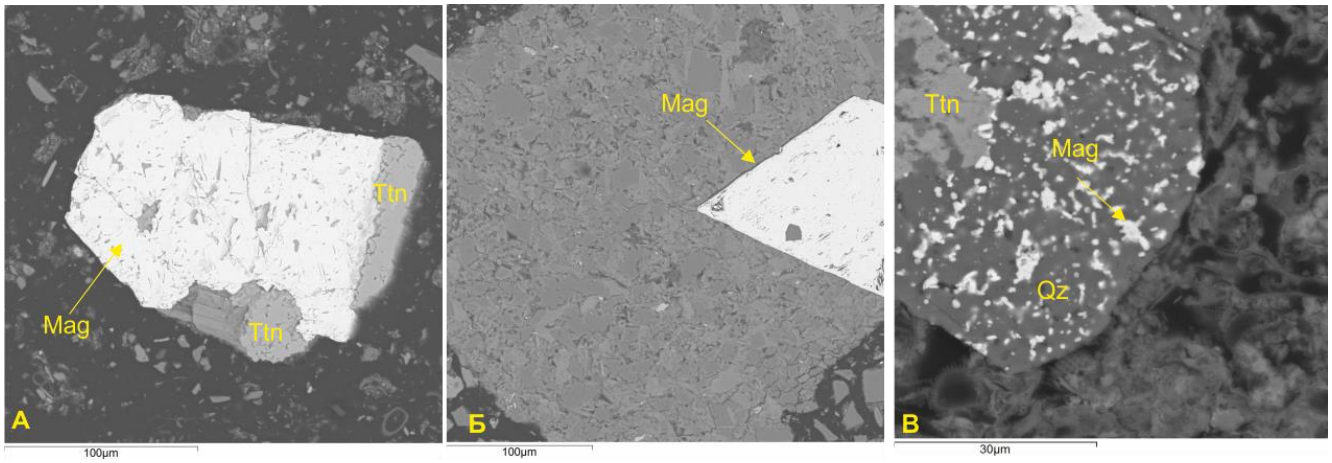


Рисунок 4.23. Акцессорные минералы в донных отложениях А) V-содержащщий магнетит с каймой титанита в донных отложениях Петрозаводской губы; Б) «чистый» магнетит в донных отложениях Петрозаводской губы; В) титанит в донных отложениях Кондопожской губы; (фотографии выполнены с использованием электронного микроскопа MIRA-3). Qz – кварц; Mag – магнетит; Ttn – титанит.

Распространение циркона, ксенотима и моноцита имеет более локальный характер. Циркон встречен лишь в донных отложениях Малого и Большого Онего и в Петрозаводской губе. Монацит в Петрозаводской губе и в Центральном Онего. Ксенотим встречен лишь в губе Великая, находящейся рядом с Малым Онего. Источником ксенотима по всей видимости могут являются метасоматиты уран-ванадиевых месторождений Заонежского полуострова (месторождения Падма, Космозеро, Великая губа, Рудная Горка).

Гематит встречается только вблизи западного берега, и связан с выходами кварцитов Шокшинского месторождения.

Из редких находок можно отметить пирит, фрагменты зерен терригенного облика, а также фрамбоэдры пирита (рис. 4.24.). Все находки имеют единичный характер и встречаются только в Петрозаводской и Кондопожской губах. Образование фрамбоэдров пирита в донных отложениях в Кондопожской губе объясняется воздействием Кондопожского целлюлозного комбината, проявленного в понижении величин pH и Eh в донных отложениях (Калинкина и Белкина, 2018). Образование фрамбоэдального пирита в Петрозаводской губе может быть связанно с выходами газов. На это указывают свидетельства о находках покмарок (Алешин и др., 2017). По данным сейсморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР) и гидролокации бокового обзора (ГЛБО) авторы предполагают, что выходы газов могут быть объяснены: 1) деструкцией органического вещества при его диагенетическом преобразовании; 2) проникновением глубинных флюидов в толщу осадков по гляциоизостатически активизированным в настоящее время тектоническим нарушениям (Алешин и др., 2017).

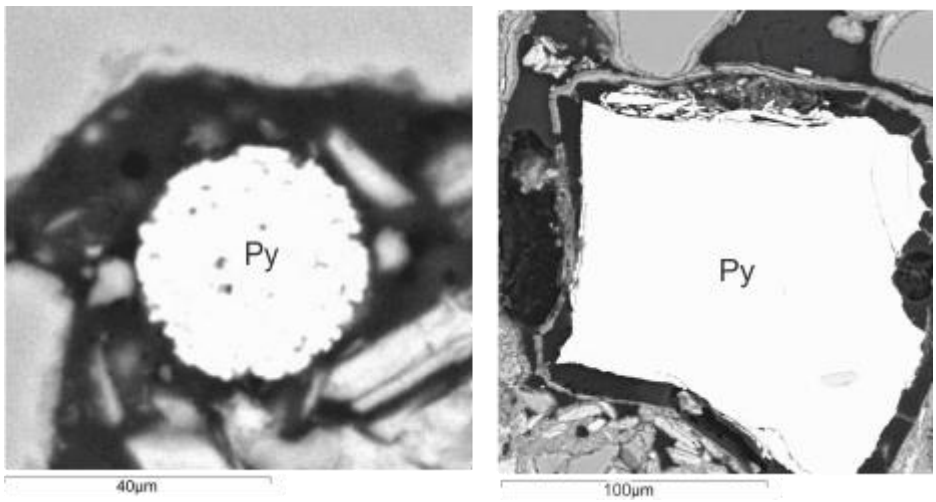


Рисунок 4.24. Фрамбоэдальный и терригенный пирит в донных отложениях Петрозаводской губы (фотографии выполнены с использованием электронного микроскопа MIRA-3). Py – пирит.

4.4 Латеральное распределение макро- и микроэлементов в донных отложениях Онежского озера

Аналитические данные по макро- и микроэлементному составу донных отложений для разных районов Онежского озера сгруппированы и усреднены по трем основным литостратиграфическим горизонтам для Онежского озера (ленточные глины, гомогенные илы, окисленные илы) (табл. 4.3.).

Для сопоставления полученных аналитических данных в таблицах приведены средние значения элементов для основных горных пород, слагающих водосборную территорию Онежского озера по литературным источникам (Ронов, Мигдисов, 1996; Ромашкин и др., 2014; Филиппов, 2002) и для современных океанических илов (Ярошевский, 2004) (табл. 4.3.).

Таблица 4.3а. Средние содержания элементов в стратифицированных горизонтах донных осадков разных районов Онежского озера.

район	**Na**	**Mg**	**Al**	**K**	**Ca**	**Si**	**Fe**	**Mn**	**Sr**	**Ba**
	%								**мг/кг**	
Ленточные глины (среднее арифметическое ± стандартное отклонение)										
Заливы+губы	2,1±0,4	2,2±0,7	9,0±3,2	3,2±0,9	1,7±0,3	39±9	5,1±2,1	0,11±0,02	200±99	821±212
Петрозаводский	1,9±0,5	1,5±0,2	6,9±1,8	2,2±0,6	1,4±0,2	36±7	3,7±0,9	0,07±0,02	159±85	524±156
Малое Онего	1,8±0,4	1,0±0,1	7,0±3,8	3,0±1,1	1,8±0,6	38±9	4,2±1,1	0,08±0,03	173±91	750±302
Большое Онего	1,8±0,3	1,1±0,1	7,0±2,8	3,0±0,5	1,8±0,5	37±5	4,0±2,1	0,08±0,02	168±79	790±317
Центральное	1,9±0,5	2,2±0,3	9,5±3,9	2,9±1,0	1,5±0,3	38±7	5,5±2,1	0,09±0,03	193±98	655±112
Южное Онего	1,6±0,3	1,8±0,2	8,4±2,7	2,7±0,7	1,5±0,3	37±6	5,1±1,9	0,08±0,02	180±85	700±234
Гомогенные илы (среднее арифметическое ± стандартное отклонение)										
Заливы+губы	2,0±1,2	1,5±0,7	7,6±1,9	2,0±0,3	1,3±0,3	28±5	5,0±1,5	0,15±0,06	185±59	700±247
Петрозаводский	1,8±0,5	1,2±0,5	8,0±1,8	3,5±0,9	1,2±0,6	27±3	5,6±0,9	0,37±0,05	179±65	620±256
Малое Онего	1,6±0,3	1,0±0,3	5,9±1,8	1,8±0,2	1,2±0,1	28±4	4,4±1,1	0,12±0,03	176±51	600±112
Большое Онего	1,0±0,3	1,2±0,4	5,9±0,5	1,8±0,3	0,8±0,1	28±5	6,4±1,1	0,26±0,04	102±49	582±102
Центральное	1,2±0,3	1,3±0,3	7,3±1,2	1,9±0,2	0,9±0,2	29±7	7,1±1,6	0,26±0,03	115±58	766±312
Южное Онего	2,2±0,6	0,8±0,2	6,0±1,2	1,9±0,2	1,5±0,4	27±6	4,6±1,2	0,15±0,02	124±66	578±340

район	Na	Mg	Al	K	Ca	Si	Fe	Mn	Sr	Ba
	%								мг/кг	
Окисленные илы (среднее арифметическое ± стандартное отклонение**)**										
Заливы+губы	1,3±0,8	1,0±0,2	5,2±2,1	1,3±0,5	1,2±0,2	25±7	11,7±4,5	2,5±0,6	136±39	1042±511
Петрозаводский	1,4±0,7	0,7±0,5	4,5±0,8	1,3±0,5	1,2±0,4	23±6	8,2±6,9	4,6±1,9	164±59	2267±556
Малое Онего	1,8±0,5	1,2±0,5	6,4±1,9	1,9±0,3	1,3±0,3	24±6	5,7±4,1	0,7±0,1	180±47	763±324
Большое Онего	0,8±0,4	0,8±0,4	4,6±1,9	1,3±0,3	0,9±0,2	25±5	16,1±9	2,4±0,6	115±41	1058±436
Центральное	0,9±0,3	0,8±0,4	5,1±1,4	1,4±0,3	1,1±0,3	26±6	11,4±6	1,6±0,3	106±28	670±259
Южное Онего	0,9±0,2	0,6±0,2	4,6±1,1	1,7±0,3	0,7±0,3	25±7	4,1±1,8	1,1±0,5	106±31	833±254
Горные породы по литературным данным										
*Шунгиты***	1,4±0,8	0,4	0,2	1,2±0,4	*0,2*	*29±11*	2,3±1,5	0,8	*60*	*364*
*Осад. породы Русской плиты**	*0,6*	*1,8*	*8,1*	*3,2*	*4,0*	*20*	*4,5*	*0,07*	*236*	*415*
*Крист. породы Балтийского щита**	*2,2*	*1,5*	*7,9*	*2,4*	*2,4*	*31*	*4,3*	*0,10*	*346*	*426*
*Средние значения в современных илах океанов****	*1,8*	*1,4*	*5,2*	*1,3*	*13,2*	*20*	*3,7*	*0,28*	*755*	*740*

Таблица 4.3б. Средние содержания микроэлементов в стратифицированных горизонтах донных осадков разных районов Онежского озера.

район	Cd	Pb	Cu	Zn	V	Ni	U	Hg	Sb	Mo
Ленточные глины (среднее арифметическое ± стандартное отклонение)										
Заливы+губы	0,20±0,1	13±4	54±16	111±30	132±20	52±10	3,1±0,5	0,02±0,005	0,21±0,05	1,9±0,5
Петрозаводский залив	0,11±0,1	11±2	41±14	76±20	112±27	43±4	2,0±0,6	0,03±0,003	0,27±0,06	1,0±0,1
Малое Онего	0,17±0,05	13±2	56±19	100±35	125±28	59±6	2,5±1,0	0,05±0,009	0,40±0,04	1,2±0,2
Большое Онего	0,17±0,06	14±2	47±11	86±24	110±41	38±7	2,3±0,4	0,03±0,004	0,38±0,03	0,8±0,08
Центральное	0,09±0,02	14±2	57±16	116±35	144±36	60±10	4,3±1,9	0,03±0,004	0,16±0,04	0,8±0,09
Южное Онего	0,10±0,1	14±4	48±8	110±30	120±31	50±2	2,4±1,2	0,03±0,003	0,27±0,02	0,1±0,02
Гомогенные илы (среднее арифметическое ± стандартное отклонение)										
Заливы+губы	0,32±0,14	10±2	102±24	185±42	87±13	42±9	2,7±0,3	0,03±0,008	0,32±0,03	1,2±0,04
Петрозаводский залив	0,34±0,15	9±1	112±18	176±51	80±18	37±19	2,3±0,6	0,04±0,009	0,34±0,05	1,1±0,02
Малое Онего	0,29±0,09	9±2	82±12	176±38	72±25	27±7	2,6±0,7	0,04±0,007	0,29±0,04	3,4±0,4
Большое Онего	0,41±0,14	12±1	122±16	102±26	86±27	40±7	2,7±0,4	0,06±0,01	0,41±0,05	3,0±0,8
Центральное	0,19±0,08	12±1	118±18	115±21	87±25	40±14	2,7±0,9	0,05±0,005	0,19±0,04	2,5±0,2
Южное Онего	0,17±0,05	12±1	95±21	124±38	61±14	29±9	2,2±0,6	0,05±0,007	0,18±0,05	3,0±0,7
Окисленные илы (среднее арифметическое ± стандартное отклонение)										
Заливы+губы	0,74±0,26	21±9	40±13	138±41	102±39	49±18	2,6±0,8	0,074±0,031	0,61±0,21	15,2±4,1
Петрозаводский залив	1,86±0,75	17±8	34±13	215±63	79±27	88±36	4,5±1,5	0,051±0,039	0,44±0,15	13,5±3,7
Малое Онего	0,39±0,19	19±5	33±12	109±37	106±41	37±12	2,4±0,9	0,038±0,014	0,79±0,35	4,1±1,4
Большое Онего	0,37±0,19	21±8	33±16	109±36	88±24	39±17	2,2±0,9	0,14±0,049	0,41±0,21	6,0±2,6
Центральное	0,51±0,28	18±5	32±11	117±29	98±31	45±16	2,5±1,2	0,069±0,027	0,49±0,23	3,5±1,4
Южное Онего	0,59±0,21	20±6	22±8	80±33	69±27	45±19	2,4±0,9	0,078±0,031	0,28±0,11	3,5±1,6
Горные породы водосборной площади Онежского озера по литературным данным										
*Шунгиты***	**1,7**	**17**	**129**	**432**	**334**	**234**	**20**	**0,79**	**3,9**	**20**
*Осад, породы Русской плиты**	**0,09**	**18**	**30**	**74**	**95**	**44**	**3,8**	---	**1,1**	**1,4**
*Крист, породы Балтийского щита**	**0,11**	**17**	**54**	**63**	**98**	**74**	**1,6**	---	**0,7**	**1,3**
*Средние значения в современных илах океанов****	**0,28**	**52**	**237**	**130**	**96**	**97**	**2,2**	---	**1,6**	**4,2**

Примечание: * - Ронов, Мигдисов. 1996. ** - Ромашкин и др., 2014; Филиппов, 2002. *** - Ярошевский, 2004.

Сравнение концентраций химических элементов в донных отложениях Онежского озера, со средними значениями концентраций химических элементов в породах водосбора и PAAS позволило установить, что положительными аномалиями стоит считать аномалии по Mn (0,8 масс.% в донных отложениях

Онежского озера, 0,11 масс.% в PAAS, 0,07 масс.% в осадочных породах Русской плиты, 0,10 масс.% в кристаллических породах Балтийского щита) и Cd (0,4 ppm в донных отложениях Онежского озера, 0,03 ppm в PAAS, 0,09 ppm в осадочных породах Русской плиты, 0,11 ppm в кристаллических породах Балтийского щита), а отрицательными – Sb (0,4 ppm в донных отложениях Онежском озере, 1,4 ppm в PAAS, в 1,1 ppm в осадочных породах Русской плиты, 0,7 ppm в кристаллических породах Балтийского щита). Данные по содержанию элементов в осадочных породах Русской плиты и кристаллических породах Балтийского щита взяты по данным (Ронов иМигдисов, 1996); а PAAS по данным (Тейлор и МакЛеннан, 1988). В сравнении с концентрациями химических элементов в современных илах океанов (по данным (Ярошевский, 2004)) в Онежском озере наблюдаются более высокие концентрации Mn и более низкие Ca, Sr, Pb, Cu и Sb (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al., 2022; Малов и др., 2023).

Практически для всех изученных элементов средневзвешенные значения содержаний в однотипном литостратифицированном горизонте донных отложений разных районов Онежского озера близки к усредненному составу горных пород водосборной территории, а вариации содержаний изученных элементов не превышают величину среднего арифметического ± 2σ (два стандартных отклонения), за исключением Mn. Хоть вариации значений большинства элементов для разных районов не превышают среднее арифметическое ± 2σ (два стандартных отклонения), все же для северной части Онежского озера (заливы и губы) характерны более высокие концентрации Na, Mg, Al, K, Ca, Sr, Ba, Cd, Zn, Ni, Mo. Для центральной части и южной части Онежского озера характерны более высокие концентрации Pb.

Проведя сравнение концентраций элементов в различных горизонтах донных отложений разных районов Онежского озера, можно утверждать, что для всех горизонтов усредненные содержания либо одинаковы, либо отличаются в пределах двух стандартных отклонений, в независимости от района.

Наибольшие отличия в средних концентрациях элементов в ленточных глинах наблюдаются для Mn, Sb, Hg, U, Mo (рис 4.25.).

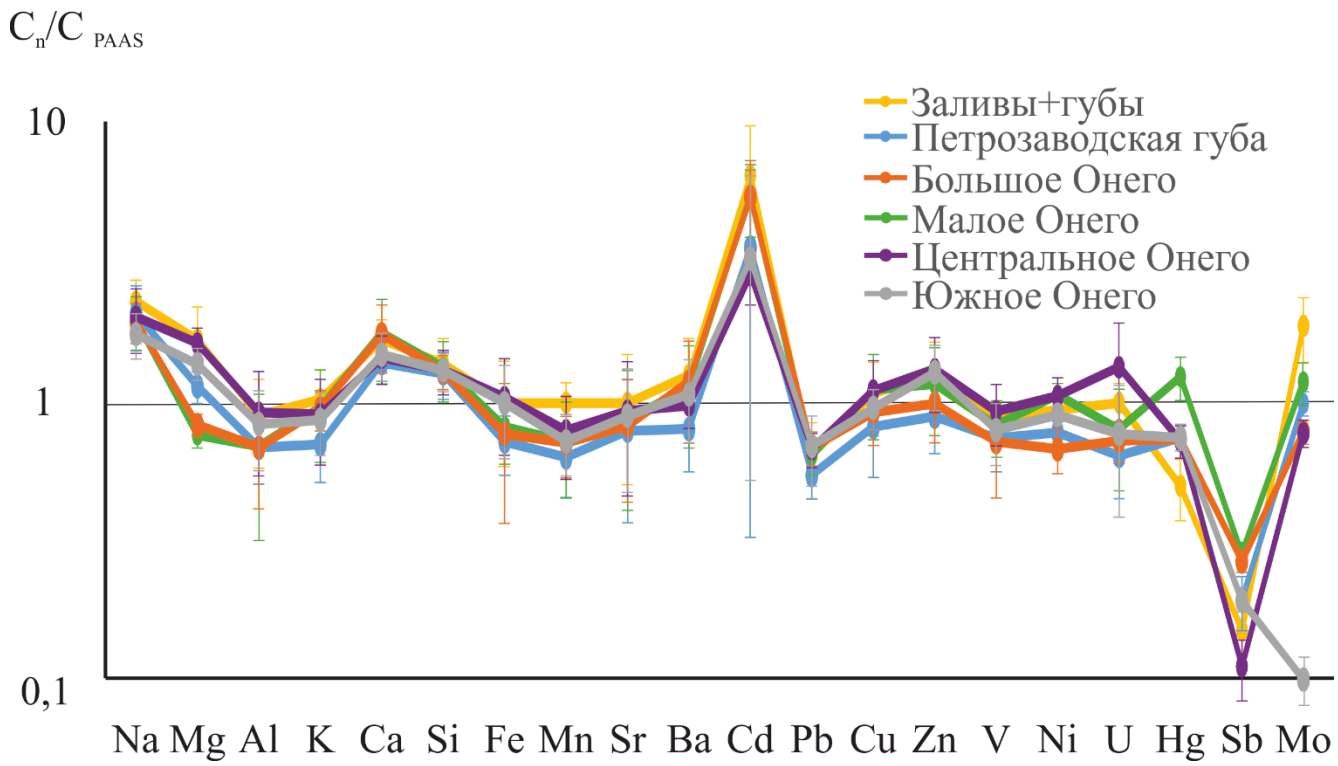


Рисунок 4.25. Распределение содержаний элементов в ленточных глинах для разных районов Онежского озера, нормированные на PAAS (Тейлор и МакЛеннан. 1988).

Для гомогенных и окисленных илов наблюдается больший спектр элементов, для которых вариация значений от района к району озера отличается. Так, наибольшие вариации характерны для Na, Mn, Sr, Cd, Hg, Pb для гомогенных илов (рис. 4.26.) и для Na, Mg, Mn, Sr, Sb, Cd, Co, Ni, Ba, Hg, Pb для окисленных илов (рис. 4.27.). Меньший спектр элементов, чьи концентрации различаются по акватории для ленточных глин, объясняется тем, что во время формирования ленточных глин снос материала для всей территории озера приходился преимущественно с юга, в то время как с севера водосборная территория бронировалась ледником (Strakhovenko et al., 2023).

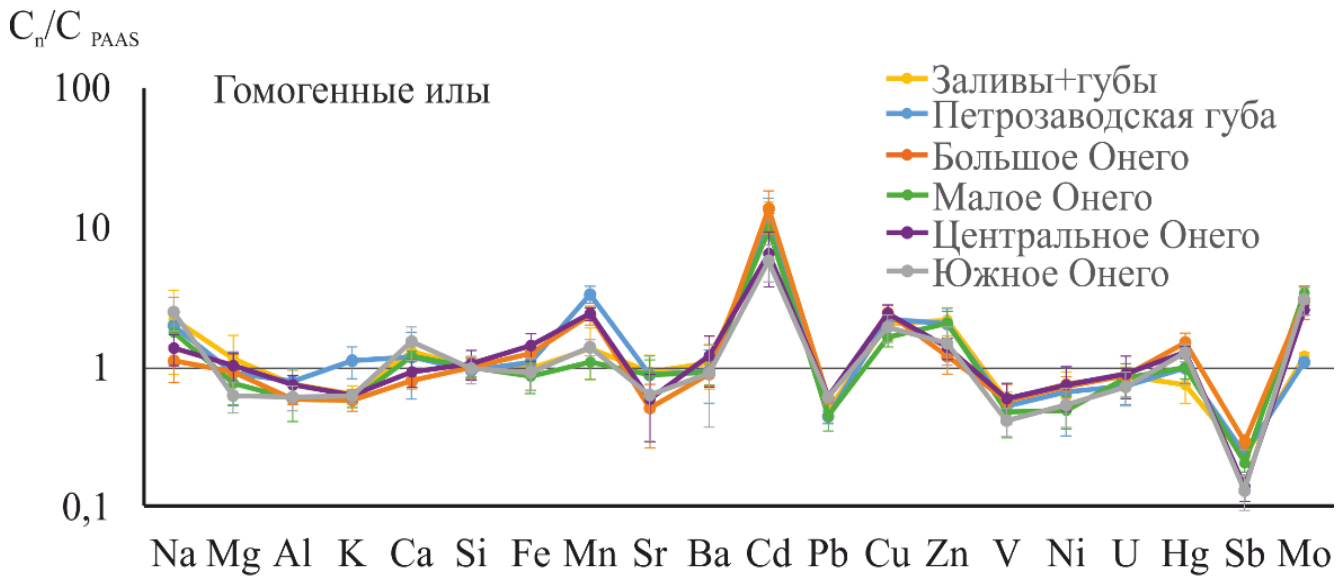


Рисунок 4.26. Распределение содержаний элементов в гомогенных илах для разных районов Онежского озера, нормированные на PAAS (Тейлор и МакЛеннан, 1988).

Отличия в средних концентрациях элементов для разных районов Онежского озера объясняется различием в геологическом строении водосборной территории. Так, например, для северной части Онежского озера характерны более высокие концентрации Na, что согласуется с тем, что северная часть водосборной территории слагается ТТГ (для которых характерны Ca-Na полевые шпаты), в то время как южная часть водосборной территории слагается породами осадочного чехла русской платформы (для которой доля Ca-Na полевых шпатов меньше).

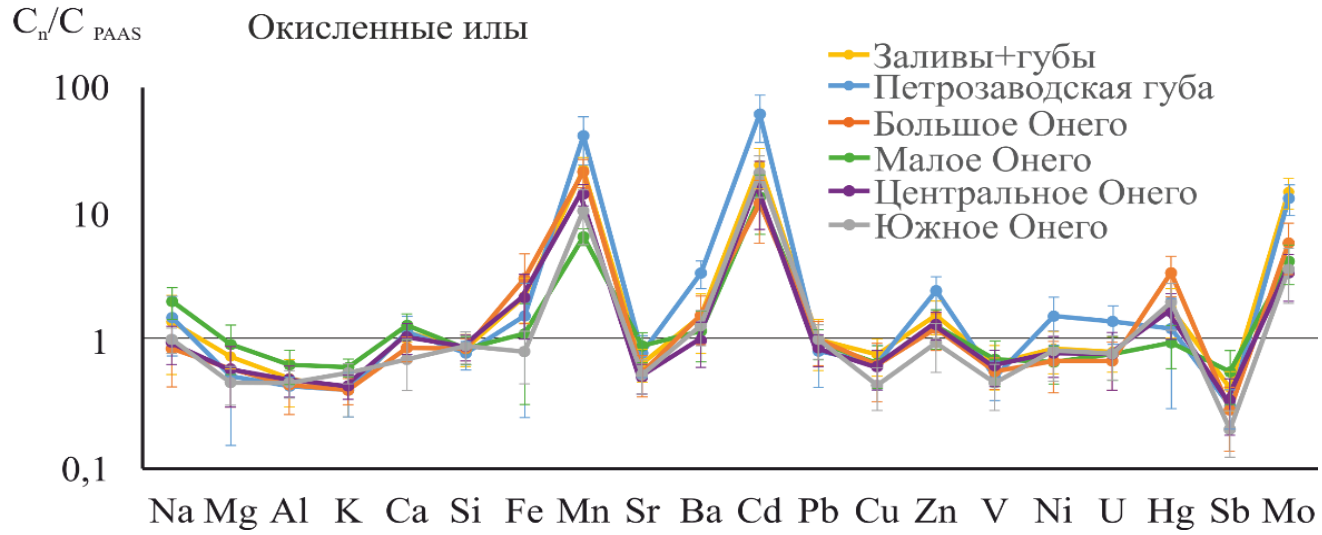


Рисунок 4.27. Распределение содержаний элементов в окисленных илах для разных районов Онежского озера, нормированные на PAAS (Тейлор и МакЛеннан, 1988).

4.5 Вертикальное распределение макро- и микроэлементов в донных отложениях Онежского озера.

В основу изучения особенностей химического состава исследуемых отложений положены различные петрохимические модули, широко применяемые в литохимической практике и используемые в генетических и классификационных целях. Данные модули характеризуют тенденции химического преобразования исходных материала в процессе седиментогенеза. А также указывают на климатические условия формирования осадочных пород. Гидролизатный модуль (ГМ) по (Юдович, 1981; Юдович и Кетрис, 2000) в основе своей отражает гипергенные процессы дифференциации вещества (выщелачивание и гидролиз). Железный модуль (ЖМ) косвенно могжет свидетельствовать о наличии или отсутствии пирокластики в осадках (Юдович и Кетрис, 2000) и о климатических условиях их формирования.

Изучение литохимических состава донных отложений Приледникового Онежского озера показало, что они характеризуются значениями гидролизатного модуля (ГМ) в диапазоне от 0,05 до 0,49 и значениями железного модуля (ЖМ) от 0,27 до 0,47 (Рис 4.28). Данные значения сходны с значениями для наиболее встречающихся осадочных пород континента – глинистых сланцев и песчаников (Химическое строение земной…,1990). Согласно (Юдович и Кетрис, 2000) по значениям ГМ и ЖМ донные отложения стоит относить к силитам и сиаллитам.

Голоценовые донные отложения отличаются более высокими значениями ГМ и ЖМ. Значения ГМ варьируют от 0,27 до 1,47, ЖМ варьируют от 0,38 до 5,73, что позволяет относить голоценовые донные отложения к сиферлитам и гидролизатом.

Различие литохимических характеристик плейстоценовых и голоценовых донных отложений объясняется различием в условиях формирования. Так плейстоценовые донные отложения формировались в нивальном типе седиментогенеза, для которого характерно преобладание механического выветривания. Формирование голоценовых донных отложений происходила с

увеличением доли химического выветривания, что позволяет предполагать гумидизацию климата.

Об увеличении доли химического выветривания свидетельствует значения индекса химического выветривания CIA и формирующийся тренд на диаграмме A-CN-K (Nesbitt and Young, 1982) (Рис. 4.28). Значения CIA для плейстоценовых в среднем равны 70, для голоценовых в среднем равны 66.

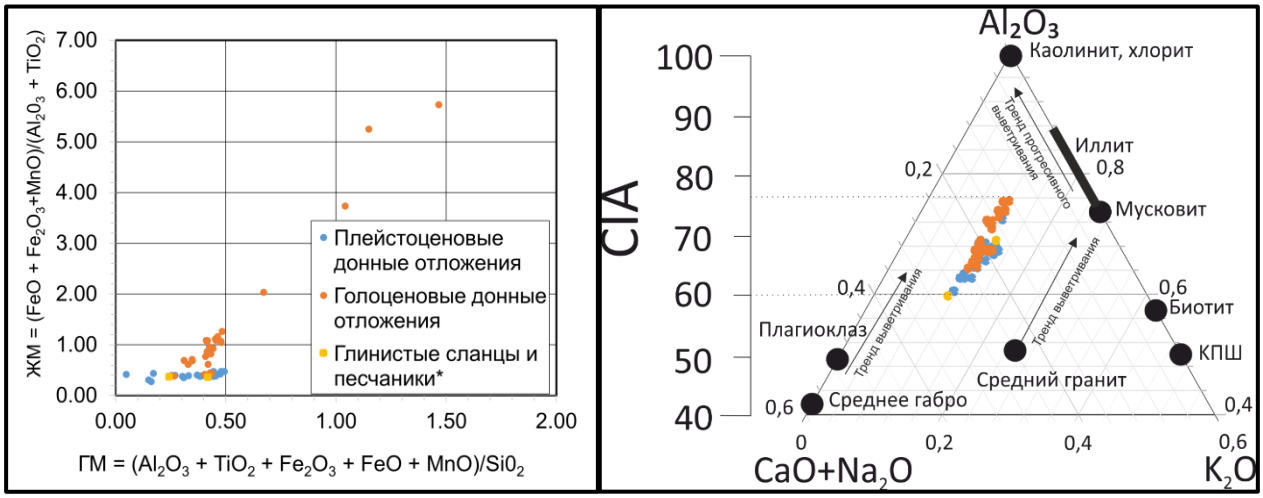


Рисунок 4.28. а) модульная диаграмма по (Юдович и Кетрис, 2000); б) диаграмма A-CN-K (Nesbitt and Young, 1982). *по данным (Химическое строение земной…,1990)

Изучение геохимического состава донных отложений по горизонтам показало, что все плейстоценовые отложения имеют одинаковые спектры распределения элементов с одним лишь условием, что для гляциальных – флювиогляциальных отложений характерны более низкие содержания всех элементов за счет большого количества кварца и соответственно пропорционально для более низких абсолютных концентраций остальных элементов (эффект разубоживания) (рис. 4.29.).

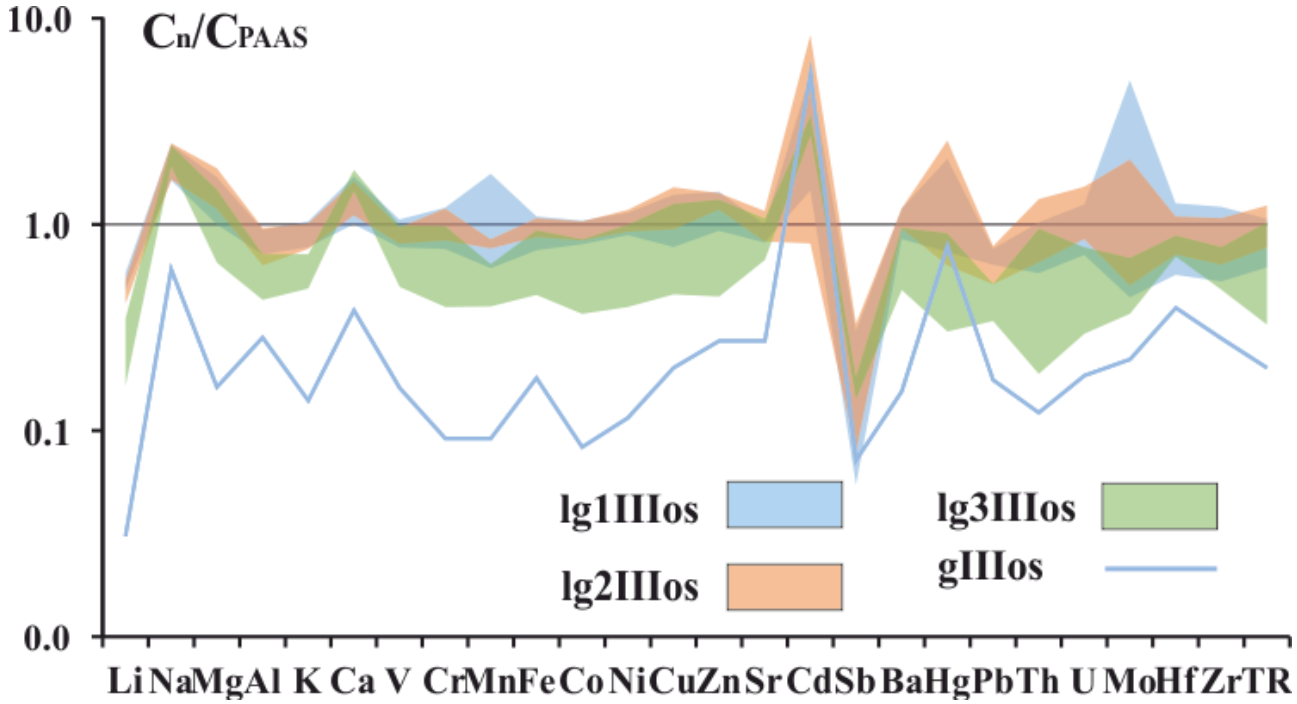


Рисунок 4.29. Распределение содержаний элементов в плейстоценовых донных отложениях, нормированное на PAAS (Тейлор и МакЛеннан, 1988).

Спектры распределения элементов для голоценовых отложениях хоть и имеют схожий характер распределения, характеризуются более высокими концентрациями ряда элементов, таких как Mn, Fe, Hg, P, Mo, Cd, относительно плейстоценовых отложений (рис. 4.30.).

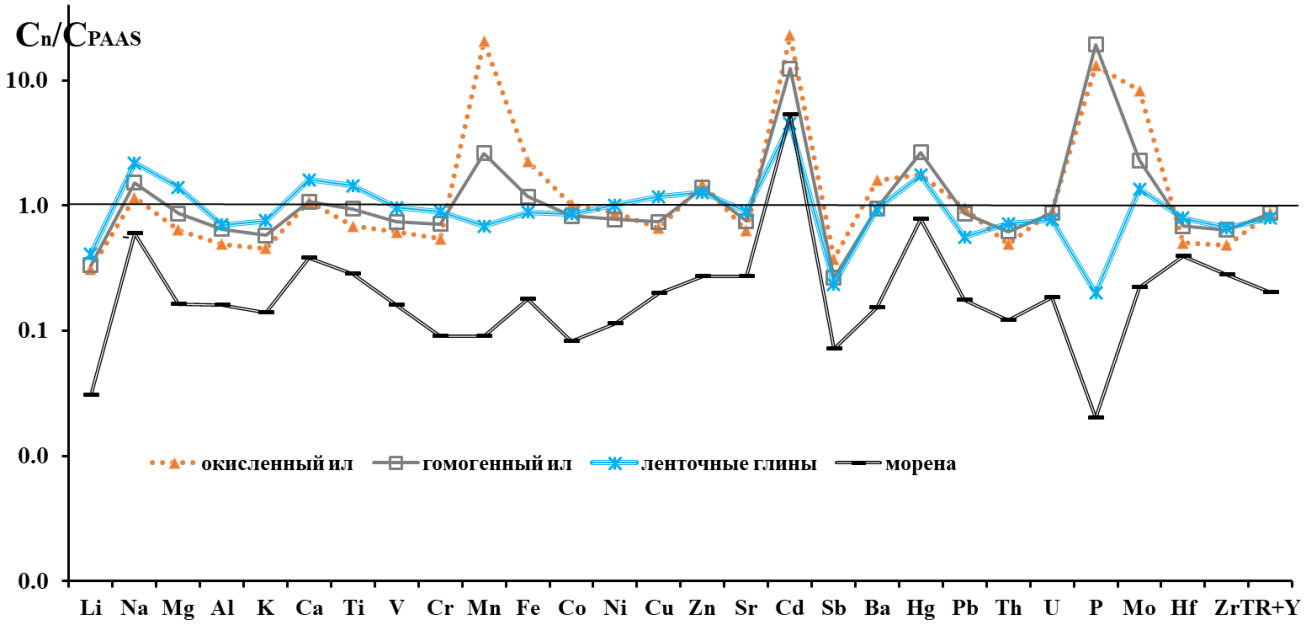


Рисунок 4.30. Распределение содержаний элементов в донных отложениях, нормированное на PAAS (Тейлор и МакЛеннан, 1988).

Отступление ледника и изменение за счет этого водосборной территории должно было бы привести к изменению спектров распределения (Strakhovenko.et al., 2023). Однако для голоценовых отложений наблюдаются отличия только по Mn, Fe, Hg, P, Mo, Cd. Более высокие абсолютные содержания для данного набора элементов возможно объяснить гумидизацией климата и переход к гумидному типу литогенеза (Страхов, 1962). Для гумидного типа литогенеза, в отличии от нивального характерно то, что осадочный материал образуется не только в результате механического выветривания, но и за счет химического разложения и жизнедеятельности организмов (Страхов, 1962).

Отсутствие изменений в потоке поступления в озеро большинства элементов хорошо наблюдается в вертикальных спектрах их распределения (рис. 4.31.). На графиках видно равномерное распределение для большинства макро и микроэлементов на глубину 3 метров, лишь для Fe, Mn, Hg характерны пики в верхней части разреза (голоценовые донные отложения).

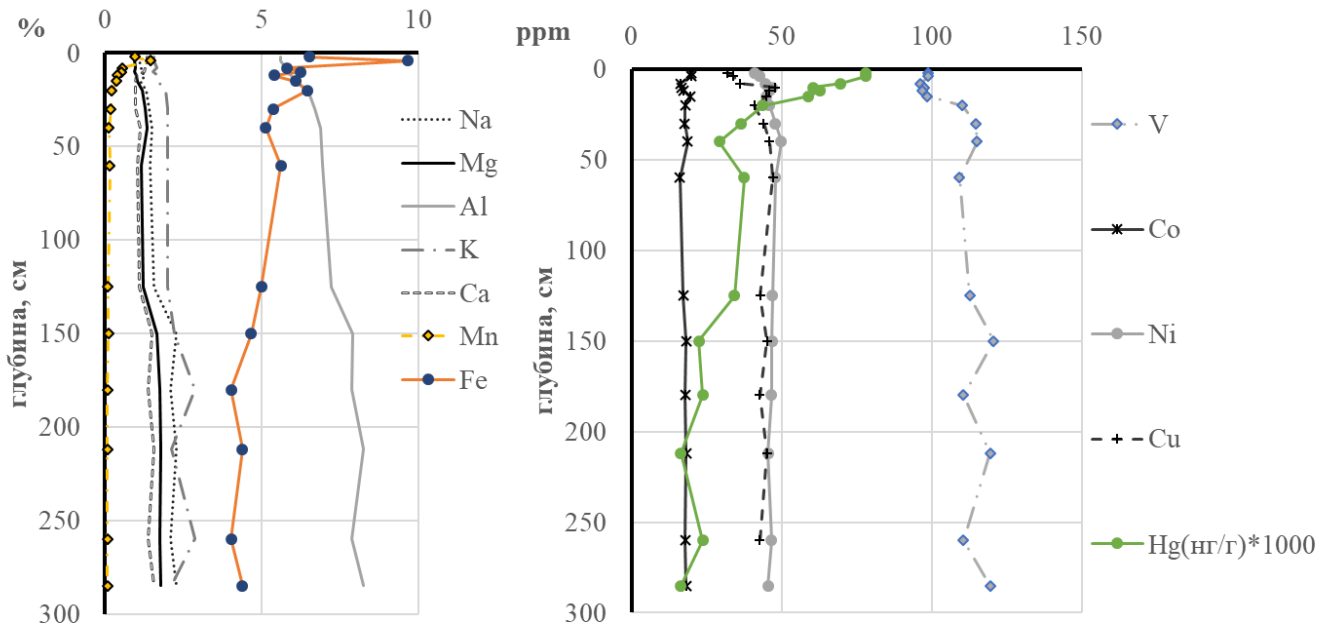


Рисунок 4.31. Вертикальное распределение элементов в обобщенной колонке донных отложений из Онежского озера.

Схожесть спектров для голоценовых и плейстоценовых отложений по всем остальным элементам объясняется тем, что хоть водосборная территория

изменилась, поступающий материал сохранил тот же вещественный состав, что подтверждается минералогическими исследованиями данной работы.

Схожесть минерального состава, поступающего в голоцене и в плейстоцене, объясняется следующим. Большая часть водосборного бассейна приледникового Онежского озера в плейстоцене располагалась южнее от современной границы бассейна Онежского озера и включала в себя территории, сложенные осадочными породами Русской платформы. В настоящее время основная часть водосбора Онежского озера расположена к северо-западу и к северо-востоку от озера и включает в себя территории сложенные породами Фенноскандинавского щита (Strakhovenko et. al., 2023). Поскольку материал северной части Русской платформы (Северная часть Московской синеклизы) сформирован преимущественно материалом, сносимым с Фенноскандинавского щита, смещение водосборной территории на север (на породы Фенноскандинавского щита) не повлекло существенного изменения состава сносимого материала.

Детальный минералого-геохимический анализ верхней части голоценовых донных отложений (0-60 см) для двух типов стратификации показал, что химические элементы можно разделить на две группы по характеру вертикального распределения (рис. 4.32.).

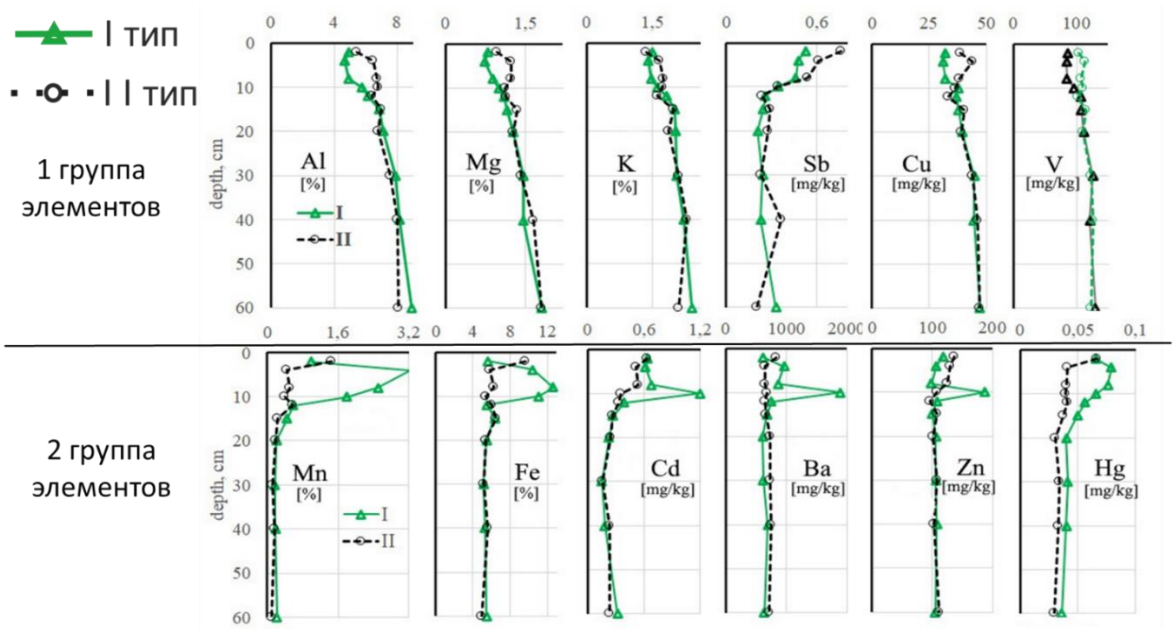


Рисунок 4.32. Вертикальное распределение элементов в колонках двух типов стратификации кернов донных отложений из Онежского озера (треугольный маркер – 1-й тип, круг – 2-й тип).

Первую группу элементов образуют Fe, Mn, формирующие рудные слои, а к ним добавляются Ba, P, Cd, Ni, Zn, Mo. Эти элементы в зоне формирования железомарганцевых микроконкреций имеют максимальные пиковые содержания. Такое распределение можно объяснить процессами сорбции данной группы элементов железомарганцевыми минеральными фазами, что хорошо подтверждается исследованиями СЭМ (рис. 4.33.).

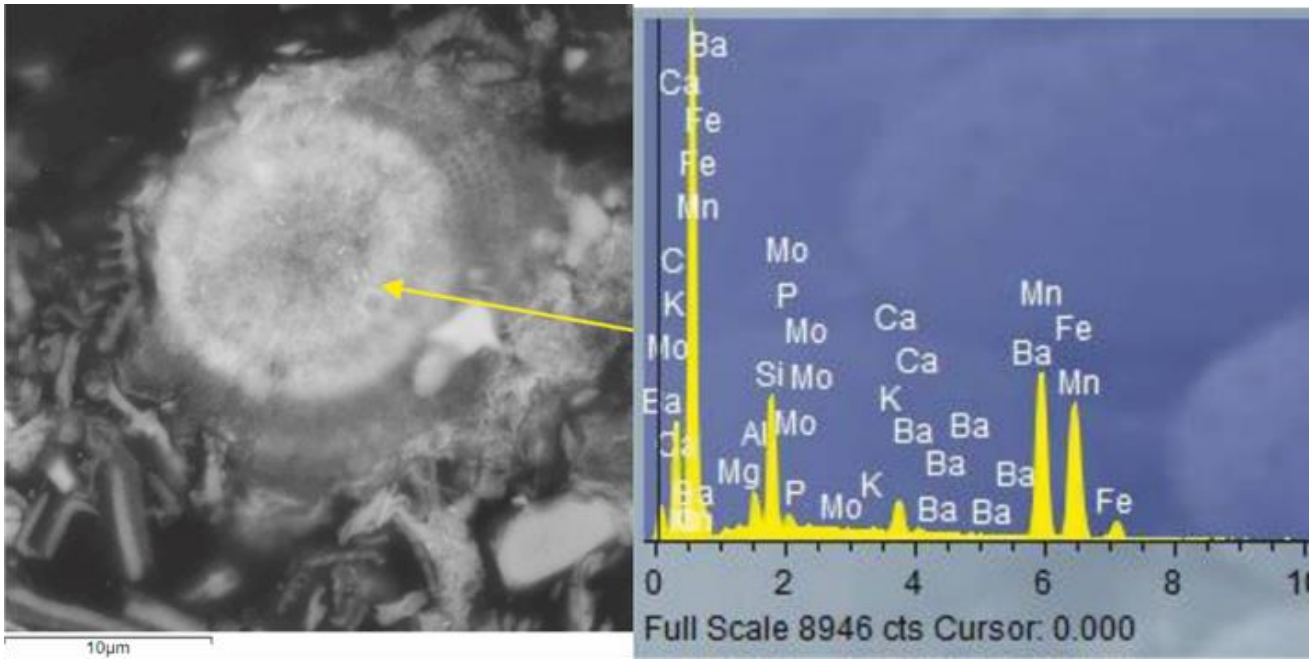


Рисунок 4.33. Маргенцевая микроконкреция и её состав.

Для остальных изученных элементов сравнение вертикального распределения в стратифицированных колонках 1 и 2 типа показало, что оно значимо не отличается.

Таким образом, характер вертикального распределения элементов регулируется двумя факторами: 1) гумидизацией климата, что приводит к увеличению поступления таких элементов, как Mn, Fe, Hg, P, Mo, Cd в Онежское озеро в голоцене 2) диагенетическим преобразованием в голоценовых отложениях, что приводит к перераспределению ряда элементов (Fe. Mn, Ba, P, Cd, Ni, Zn, Mo и Hg) на окислительно-восстановительной границе в донных отложениях и формированию аутигенных минералов на данной границе.

4.6 Геохимические индикаторы

Проведено сопоставление вертикального (вдоль профилей керна – весь голоцен) и горизонтального (между отдельными участками акватории озера) распределений различных геохимических индикаторов поверхностных природных процессов – Th/U, Ni/Co, V/Cr, Mo/Mn.

Анализ распределения Th/U-отношения (табл. 4.4.; рис. 4.34.) свидетельствует о достаточно узком диапазоне варьирования этой величины для большинства стратиграфических подразделений донного осадка и взвеси, не выходящего за пределы 2,5-4 для всех районов Онежского озера и типичного для горных пород его водосборной территории. Заметные отклонения от среднего значения Th/U выявлены только для всех ленточных глин за исключением самых нижних слоев с шунгитовыми слойками и района Южного Онего, а также для гомогенных илов Повенецкого залива. Повышенные значения Th/U-отношения определяются высокими содержаниями тория в ленточных глинах и гомогенных илах Повенецкого залива, что, возможно, связано с ведущей ролью в их формировании не только кристаллических пород ТТГ – Водлозерского террейна, но и неоархейских двуполевошпатовых гранитов (Арестова и др., 2015; Чекулаев и Арестова, 2020). Высокая корреляция между содержаниями Th и K означает их принадлежность к одному носителю – обломочному материалу в озерной системе (табл. 4.4.; рис. 4.34.). Значения K/Th отношений во всех компонентах Онежского озера соответствуют кристаллическим горным породам Балтийского щита и указывают на небольшой дефицит калия относительно генетических типов осадочных пород Русской плиты. Исходя из выше приведенного материала, можно утверждать, что для естественных радионуклидов в основном преобладает механическая миграция в форме взвесей и обломочного материала (Страховенко, 2021).

Таблица 4.4. Средние содержания естественных радионуклидов и удельная активность ^{137}Cs в осадочном материале на фильтрах из седиментационных ловушек и донных отложений из различных районов Онежского озера

Районы Онежского озера	**Th,мг/кг**	**U,мг/кг**	**K,%**	**^{137}Cs, Mku/km^2**
Осадочное вещество на фильтре				
Повенецкий залив	0,0047	0,0032	0,02	
Заонеж+М.Онего	0,006	0,0022	0,03	
Б.Онего+заливы	0,0038	0,0013	0,06	
Кондопожская губа	0,0267	0,0096	0,06	
Петрозаводский залив	0,0080	0,0028	0,07	
Центральное Онего	0,0023	0,0007	0,09	
Южное Онего	0,0040	0,0012	0,02	
Осадочное вещество седиментационных ловушек				
Повенецкий залив	7,6	3,0	1,80	
Заонеж+М.Онего	7,8	2,3	1,60	
Б.Онего+заливы	8,5	2,5	1,50	
Кондопожская губа	6,7	2,3	1,30	
Петрозаводский залив	7,3	2,2	1,65	
Южное Онего	8,3	2,4	1,70	
Донный осадок (окисленный слой)				
Повенецкий залив	8,8	2,8	2,10	52
Заонеж+М.Онего	8,5	2,6	1,75	112
Б.Онего+заливы	9,2	3,4	1,55	54
Кондопожская губа	7,8	2,7	1,49	76
Петрозаводский залив	6,1	1,6	1,38	82
Центральное Онего	8,5	2,5	1,47	51
Южное Онего	8,2	2,4	1,75	58
Донный осадок ЖМО				
Повенецкий залив	6,7	1,1	1,40	
Б.Онего+заливы	5,4	2,2	0,88	
Петрозаводский залив	7,4	0,2	0,92	
Центральное Онего	8,6	2,6	1,14	
Южное Онего	4,4	0,8	1,10	
Донный осадок (гомогенные илы)				
Повенецкий залив	9,4	1,9	2,05	56
Заонеж+М.Онего	9,6	2,5	1,82	258
Б.Онего+заливы	8,9	2,7	1,71	211
Кондопожская губа	6,6	3,1	1,73	169
Петрозаводский залив	6,1	3,3	1,76	175
Центральное Онего	10,5	3,0	1,88	238
Южное Онего	9,8	2,8	1,91	148
Донный осадок (ленточные глины)				
Повенецкий залив	12,9	2,7	2,31	
Заонеж+М.Онего	19,2	3,7	2,88	
Б.Онего+заливы	11,7	3,1	2,89	
Петрозаводский залив	14,9	3,6	2,67	
Центральное Онего	15,8	4,3	3,06	
Южное Онего	11,6	2,5	2,47	
Горные породы водосборной площади Онежского озера (по литературным данным)				
гранит AR-PR [Онежская палеопротерозойская, 2011]	10,1	2,9	1,32	
ТТГ- Водлозерского террейна Балтийского щита (Арестова и др., 2015)	6,9	1,6	1,12	
неоархейские гранодиориты (Чекулаев и Арестова., 2020)	24,2	Н.о.	3,37	
Шунгиты (Онежская палеопротерозойская, 2011)	0,1	2,9	0,27	
осадочно-вулканогенные (Онежская палеопротерозойская, 2011)	1,3	0,3	1,12	
Русская плита(алевропесчаниках) (Ронов , Мигдисов, 1996)	8,5	2,1	2,15	
Русская плита(глинистые) (Ронов , Мигдисов, 1996)	11,5	3,8	3,23	
Балтийский щит (Ронов , Мигдисов, 1996)	10,1	2,9	2,38	

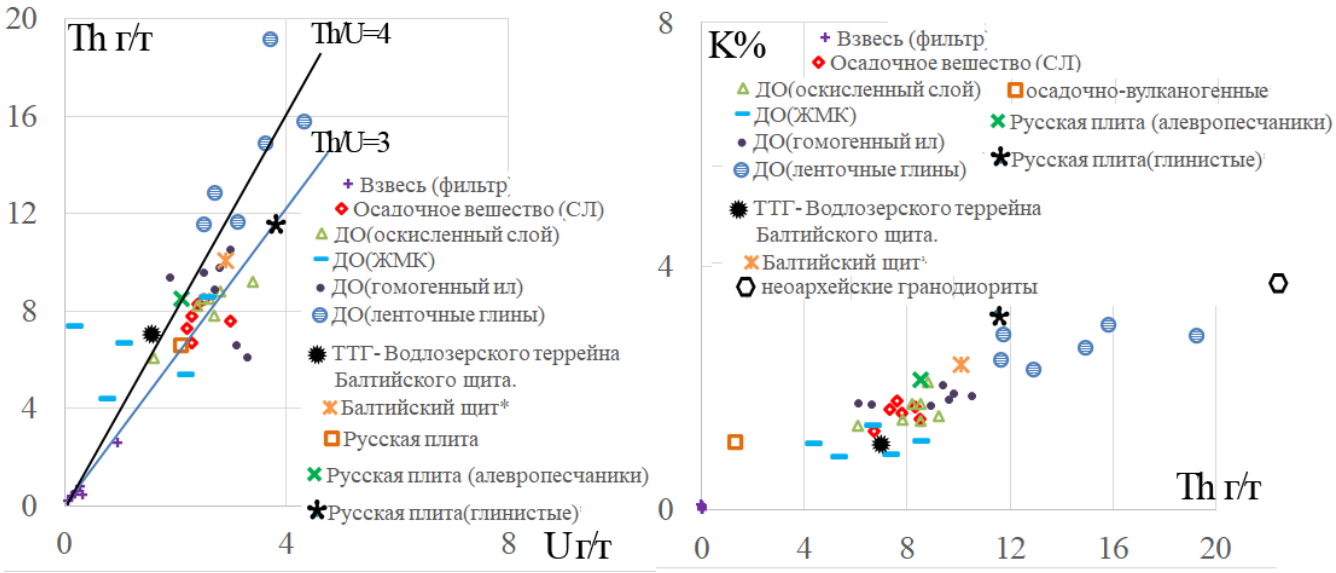


Рисунок 4.34. Отношения Th/U и K/Th в осадочном материале на фильтрах из седиментационных ловушек (СЛ) и из стратифицированных слоев донных отложений (ДО) (окисленный слой, ЖМК, гомогенный ил, ленточные глины) из разных районов Онежского озера, в сопоставлении с различными горными породами его водосборной площади (по литературным данным): граниты AR-PR и осадочно-вулканогенные (Онежская палеопротерозойская, 2011); ТТГ – Водлозерского террейна (Арестова и др., 2015); кристаллические породы Балтийского щита и осадочные породы Русской плиты (Ронов , Мигдисов, 1996); неоархейские двуполевошпатовые граниты (Чекулаев и Арестова., 2020).

На основании элементного химического состава нами рассчитаны геохимические индикаторы (Mo/Mn, V/V+Ni, V/Cr, Ni/Co), которые используются для определения окислительно-восстановительных условий седиментогенеза для окисленной части донных отложений, гомогенных илов, ленточных глин, вещества седиментационных ловушек (таб. 4.5.).

Таблица 4.5. Значения геохимических индикаторов для донных отложений, гомогенных илов, ленточных глин, вещества седиментационных ловушек акватории Онежского озера. Данные представлены в формате $\frac{\text{мин. знач-макс.знач}}{\text{ср.знач}}$

Вещество	Mo/Mn	V/V+Ni	V/Cr	Ni/Co
Материал седиментационных ловушек	0,275-18 3,042	0,638-0,916 0,714	0,756-2,083 1,256	0,852-3,364 2,330
Окисленый ил	0,053-43,333 5,794	0,149-0,892 0,667	0,902-2,783 1,558	0,545-3,941 2,150
Гомогенные илы	0,766-70 12,237	0,55-0,804 0,716	0,638-2,857 1,424	1-4,211 2,432
Ленточные глины	0,588-280 18,056	0,577-0,8 0,717	0,6-3,03 1,458	2,1-3,643 2,762

Сравнение полученных значений геохимических индикаторов статистическими методами (t-критерий Стьюдента) показало отсутствие статистически значимых различий (α=0,05) в средних значениях геохимических индикаторов между разными типами донных отложений и осадочного материала седиментационных ловушек. Согласно литературным данным для окислительных условий осадконакопления характерны значения Mo/Mn > 3; V/V+Ni < 0,63; V/Cr < 2; Ni/Co < 5 (Юдович, Кетрис, 2016; Маслов, 2005). Согласно полученным результатам для одних и тех же проб значения Mo/Mn, V/Cr и Ni/Co характерны для окислительных условий, а значения V/V+Ni - для восстановительных. В разрезе донных отложений выделяются отложения как с окисленным, так и с восстановительным типом осадконакопления, что фиксируется непосредственными замерами Eh, а также минеральным составом (наличием фосфата Fe, корок гидрооксидов Fe, Mn). Противоречие фактических наблюдений со значениями геохимических индикаторов (Mo/Mn, V/V+Ni, V/Cr, Ni/Co), позволяют сделать вывод, что использование этих геохимических индикаторов для определения окислительно-восстановительных условий невозможно для донных отложений акватории Онежского озера.

ВЫВОДЫ 4 ГЛАВЫ

Изучение вещественного состава осадочного материала и донных отложений, а также вертикального и латерального распределений химических элементов позволило установить следующее.

Практически для всех изученных элементов средневзвешенные значения содержаний в донных отложениях близки к усредненному составу горных пород водосборной территории и не превышают величину среднего арифметического ± 2σ (два стандартных отклонения), за исключением Mn, Cd, Sb.

Хоть вариация содержаний изученных элементов в однотипном литостратифицированном горизонте донных отложений разных районов Онежского озера не превышают величину среднего арифметического ± 2σ (два стандартных отклонения), для северной части Онежского озера (заливы и губы) характерны более высокие концентрации Na, Mg, Al, K, Ca, Sr, Ba, Cd, Zn, Ni, Mo. Для центральной части и южной части Онежского озера характерны более высокие концентрации Pb.

Состав терригенной составляющей донных отложений отражает состав горных пород на площади его водосбора в целом, из каждого залива в частности. Преимущественно состоит из кварца, полевых шпатов и мусковита вне зависимости от части Онежского озера. Темноцветными минералами являются эпидот, биотит, пироксены (в основном диопсид) и амфиболы (чаще всего актинолит, иногда роговая обманка), в меньших количествах встречаются акцессорные минералы – рутил, апатит, доломит ильменит, магнетит, титанит, циркон, монацит и гематит. Для разных районов озера характерен свой набор темноцветных и акцессорных минералов, что объясняется различиями в локальном геологическом строении водосборной территории.

Спектры распределения элементов для плейстоценовых и голоценовых отложений в целом имеют схожий характер распределения. Отличия заключаются в более высоких концентрациях Mn, Fe, Hg, P, Mo, Cd для голоценовых отложений, что объясняется увеличением поступления этих элементов, вызванным гумидизацией климата в голоцене, и перераспределением этих элементов в процессе окислительно-восстановительного диагенеза.

В верхней части голоценовых отложений наблюдается перераспределение ряда элементов (Fe, Mn, Ba, P, Cd, Ni, Zn, Mo и Hg) в условиях окислительно-восстановительного диагенеза. Перераспределение ряда элементов приводит к формированию аутигенных минералов на границе окислительно-восстановительных условий: пиролюзит, бернессит, гетит разной степени кристалличности. Для отложений с восстановительными условиями диагенеза наблюдаются образования вивианита, родохрозита и сидерита.

Глава 5. ОСАДОЧНОЕ ВЕЩЕСТВО ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Образование осадочного вещества, поступающего в экосистему озера, происходит на поверхности суши в результате ряда процессов: выветривание и перемыв пород суши и берегов водных бассейнов, жизнедеятельность организмов, вулканические извержения, осаждение материала из космоса.

Между возникновением осадочного вещества и его накоплением в виде донных осадков происходит его преобразование. Так, в процессе переноса происходит дифференциация осадочного материала и частичное осаждение на путях переноса. Помимо обломочного вещества и растворов в поток вещества вовлекаются продукты жизнедеятельности организмов. Происходит изменение размера исходного рассеянного вещества до невидимых содержаний, что приводит к более интенсивному взаимодействию со средой и объемному вовлечению в биологические процессы.

Для более полного изучения процессов современного литогенеза необходимо рассматривать не только конечный продукт осадконакопления – донные отложения, но и материал в промежуточных этапах литогенеза.

В данной работе изучались: 1) взвешенное осадочное вещество рек и Онежского озера; 2) осадочное вещество седиментационных ловушек; 3) современные донные отложения, которые представляют материал заключительного этапа формирования донных отложений.

5.1 Минеральный состав осадочного вещества вод рек, впадающих в Онежское озеро, в их устьях

Согласно опубликованным данным, ежегодно в Онежское озеро поступает 80-90 тыс. т. взвешенных веществ (Крупнейшие…, 2015; Лозовик и Ефремов,

2017). Главным поставщиком взвешенных веществ в Онежское озеро являются реки: Водла, Шуя, Суна и Андома Вытегра, Кумса, Деревянка, Шелтозерка.

Установлено, что материал взвеси рек представлен биогенной рентгеноаморфной массой (биодетрит диатомовых водорослей, споры и пыльца растительных сообществ) с ассоциациями частиц обломочных минералов, чешуйчатыми образованиями слоистых силикатов и алюмосиликатов, железобразными сгустками и пленками обрастания по органическим скелетам окислов, гидроксидами марганца и железа (рис. 5.1.; 5.2.) (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al., 2022; Kulik et al., 2023).

Для разных рек выявлены близкие спектры минералов, но в очень разных соотношениях. Также установлено неравномерное распределение частиц по размерам, степени их окатанности и разным соотношениям минеральной и органической части взвешенного вещества.

Среди биогенных частиц растительные волокна доминируют во взвеси р. Вытегра, Водла, Кумса (рис. 5.2.). В основном встречаются агрегаты изометричной формы, состоящие из слепленных мелких зерен минералов (пелитовой размерности) и частиц биодетрита (мелкие обломки диатомей, шарообразные частицы (пыльца, споры)), пеллетные комки (рис 5.1а, 5.3а). Однако стоит отметить, что встречаются и крупные отдельные зерна минералов (более 20-50 мкм) (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al., 2022; Kulik et al., 2023).

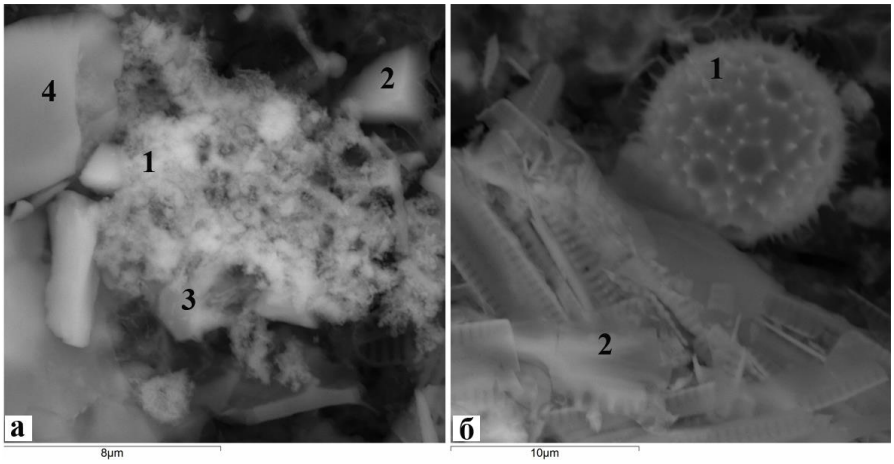


Рисунок 5.1. Фотография СЭМ. Осадочное вещество фильтра р. Шуя (а): 1 – землистые агрегаты родохрозита, 2 – кварц, 3 – панцири и биодетрит диатомовых водорослей, 4 – олигоклаз; осадочное вещество фильтра р. Кумса (б): 1 – пыльца, 2 – многочисленные виды диатомей.

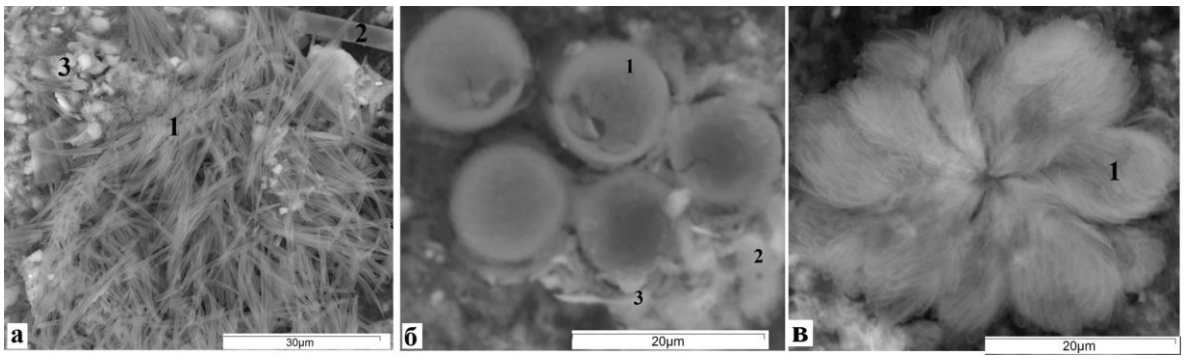


Рисунок 5.2. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ, образцов речной взвеси на фильтрах, отобранных в р. Вытегра (а), р. Водла (б), р. Кумса (в): (а) 1 – тонковолокнистый агрегат водорослей (аморфный кремнезём), 2 – панцири и биодетрит диатомовых водорослей, 3 – тонкозернистый агрегат терригенных минералов (кварц, олигоклаз, иллит (Mg, Fe), альбит); (б) 1 – шаровидные полые агрегаты спор; 2 – панцири и биодетрит диатомовых водорослей, 3 – чешуйчатые агрегаты мусковита; (в) 1 – тонковолокнистый агрегат водорослей (аморфный кремнезём).

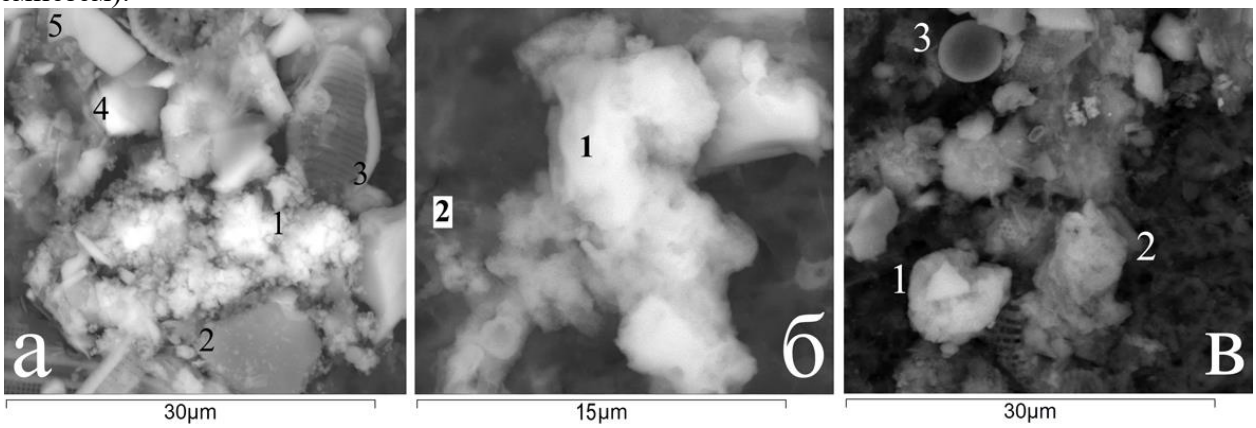


Рисунок 5.3. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ, агрегатов минералов марганца в речной взвеси на фильтрах, отобранных в р. Шелтозерка (а), р. Вытегра (б), р. Лососинка (в): (а) 1 – землистые агрегаты родохрозита; 2 – кварц; 3 – панцири и биодетрит диатомовых водорослей; 4 – иллит (Mg, Fe), 5 – альбит; (б) 1, 2 - натечные агрегаты окислов Mn разной степени кристалличности; (в) 1 – натечные агрегаты окислов Mn с примесью Ba (до 4%); 2 – землистые агрегаты гидроксидов/оксидов Fe и Mn с примесью Ba (1%), P (1%); 3 – панцири и биодетрит диатомовых водорослей.

Во всех пробах встречены отдельные зерна или кристаллы темноцветных и акцессорных минералов, но в очень незначительных количествах: эпидот, амфибол (роговая обманка, актинолит), авгит, ильменит, магнетит, рутил, титанит, апатит, монацит. Причем для разных районов характерны разные темноцветные и акцессорные минералы.

В минеральном веществе всех рек в значительных количествах присутствуют желеобразные агрегаты оксидов и гидроксидов железа и марганца, их количество значительно возрастает относительно других минералов на фильтрах р. Лососинка, Вытегра, Шелтозерка (рис. 5.1., 5.3.).

На фоне большого количества желеобразных агрегатов, сложенных гидроксидами железа разной степени кристалличности и размерности, в ряде рек во взвеси установлено значительное количество агрегатов железа необычной морфологии: оолитов (шаровидные стяжения), сложных ячеистых агрегатов, тонковолокнистых радиальнолучистых агрегатов (рис. 5.4.).

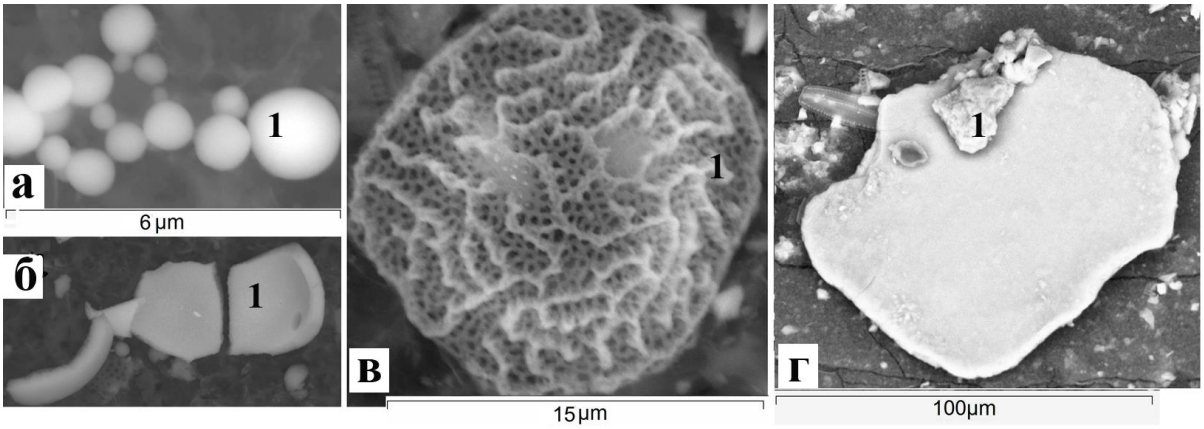


Рисунок 5.4. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ, агрегатов минералов железа различной морфологии в речной взвеси на фильтрах, отобранных в р. Водла (а), р. Андома (б), р. Шуя (в), р. Шелтозерка (г): (а) 1 – шаровидные агрегаты гетита; (б) 1 – осколки шаровидного агрегата гетита; (в) 1 – ячеистый агрегат гетита; (г) 1 – крупная частица органического вещества, покрытая пленкой самородного железа.

Антропогенные частицы в пробах взвешенного вещества вод рек представлены отдельными мелкими зернами (от 2 до 25 мкм) неправильной формы с химическим составом, который не встречается в природе. Например, согласно исследованиям, на СЭМ во взвеси реки Суна в составе терригенного материала в ассоциации с мелкими зернами кварца, кальцита, альбита, биодетрита диатомовых водорослей присутствуют крупные и мелкие зерна неправильной формы сплава Zn-Ni-Cu и Ni-Sn с резким преобладанием в составе Ni (рис. 5.5а, б). А во взвеси р. Андома встречены техногенные частицы самородной сурьмы и сульфата серебра (рис. 5.5в, г).

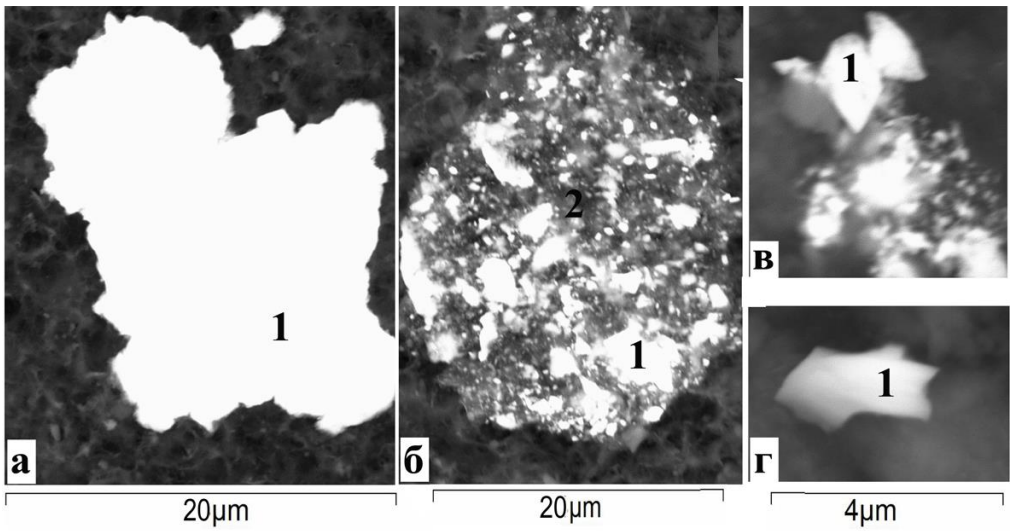


Рисунок 5.5. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ, агрегатов техногенного состава различной морфологии в речной взвеси на фильтрах, отобранных в р. Суна (а, б), р. Андома (в, г): (а) 1 – агрегат сплава Zn-Ni-Cu; (б) 1 – агрегат сплава Ni-Sn; 2 – мелкие зерна кальцита в ассоциации с биодетритом диатомовых водорослей; (в) 1 – кристаллики и изометричные зерна сульфата серебра; (г) 1 – срастание зерен самородной сурьмы.

5.2 Минеральный состав осадочного вещества вод Онежского озера

5.2.1 Взвешенное вещество в воде Онежского озера

В водах озера концентрация взвешенных веществ колеблется от 0,4 до 1,9 мг/л (в среднем – 0,7 мг/л), за исключением Кондопожской (22 мг/л) и Петрозаводской (1,4 мг/л) губ. Минимум был отмечен в Большом Онего, максимум – в Южном Онего. Наибольшее содержание взвешенного вещества характерно для придонных горизонтов. В Повенецком и Заонежском заливах отмечалось уменьшение концентрации этого показателя с глубиной, в Малом Онего и Уницкой губе наблюдалась обратная картина, а в Лижемской губе его содержание было постоянным по всей высоте водного столба.

Основными компонентами взвешенного вещества вод Онежского озера являются минеральные зерна, имеющие тонкопелитовую (<1 мкм) и пелитовую (от 1 до 10 мкм) размерность, сравнительно редко встречаются частицы алевритовой размерности (от 10 до 100 мкм), и биогенные частицы, сложенные рентгеноаморфной массой (панцири и биодетрит диатомовых водорослей, пыльца и споры). Доминирующие биогенные частицы представлены в основном

многочисленными видами диатомей (в их составе выявлены характерные представители современных сообществ диатомового планктона, цисты, споры и пыльца растительных сообществ (рис. 5.6., 5.7., 5.8.).

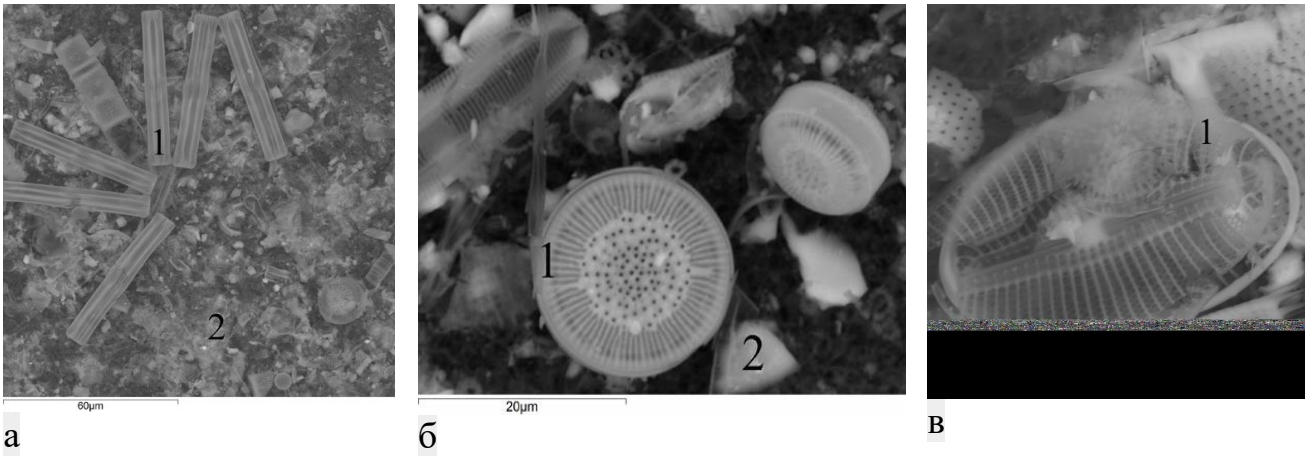


Рисунок 5.6. Фотографии СЭМ. Осадочное вещество фильтра L11 (Малое Онего), глубина отбора воды 20 м (а): 1 – многочисленные виды диатомей; 2 – терригенная фракция; осадочное вещество фильтра W2 (Повенецкий залив), глубина отбора воды 10 м (б): 1 – многочисленные виды диатомей; 2 – терригенная фракция; осадочное вещество фильтра С4 (Центральное Онего), глубина отбора воды 40 м (в): 1 – многочисленные виды диатомей.

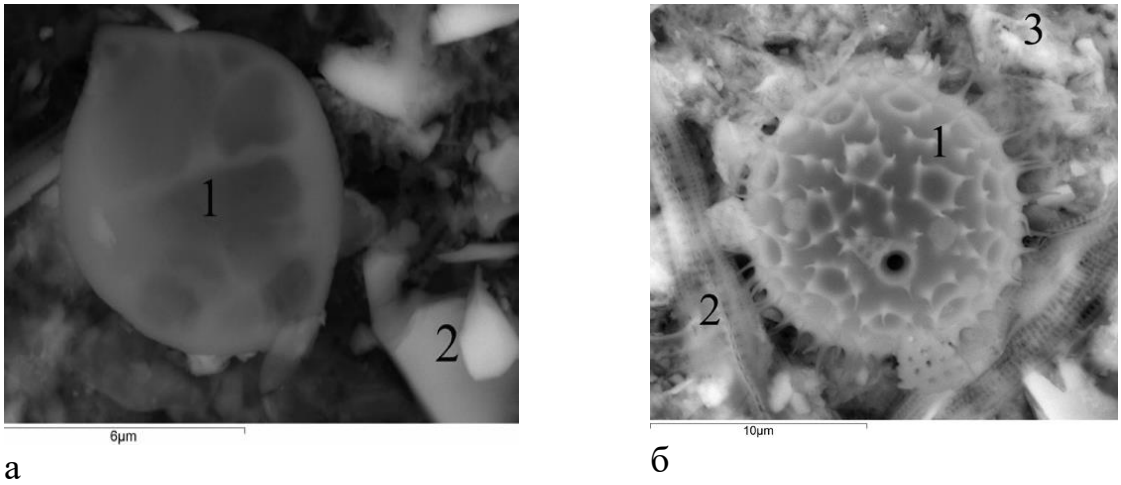
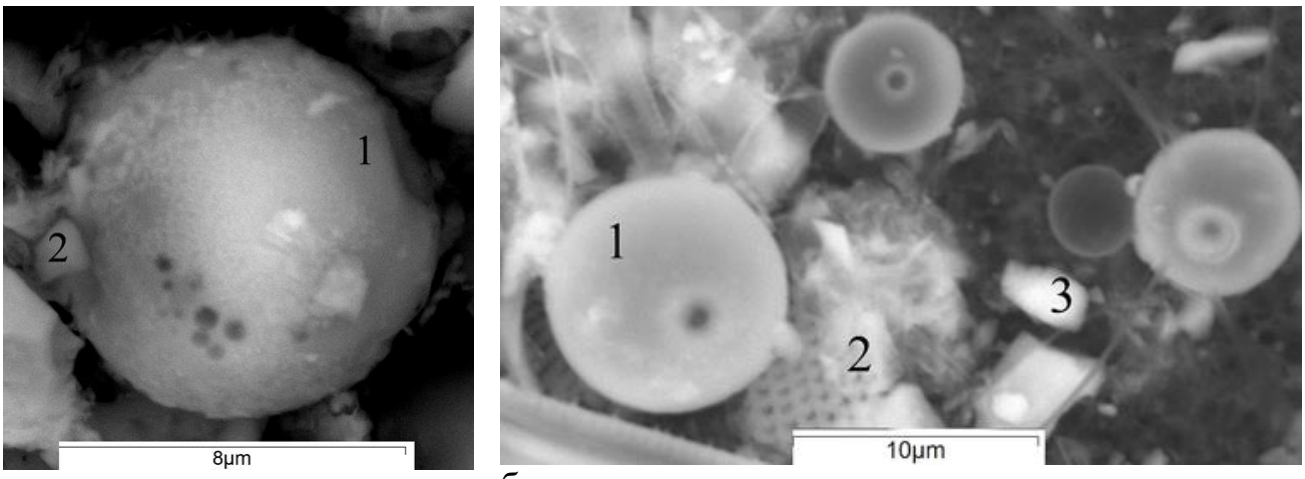


Рисунок 5.7. Фотографии СЭМ. Осадочное вещество фильтра W2 (Повенецкий залив), глубина отбора воды 10 м (а): 1 – пыльца; 2 – терригенная фракция; осадочное вещество фильтра К2 (Кондопожская губа), глубина отбора воды 6 м (б): 1 – пыльца; 2 – многочисленные виды диатомей; 3 – терригенная фракция.



а б

Рисунок 5.8. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ, агрегатов цист из взвешенного материала воды Онежского озера, отобранного в: (а) Кондопожской губе 1 – циста, облепленная зернами минералов терригенной фракции (2); (б) Повенецком заливе 1 – цисты; 2 – многочисленные створки диатомей; 3 – эпидот.

Вещественный состав нерастворимых взвешенных частиц из воды близок к друг другу в разных районах озера. Среди литогенного материала (отдельные зерна обломочных минералов, чешуйчатых агрегатов слоистых силикатов, сгустков оксидов и гидроксидов Fe и Mn) присутствуют частицы антропогенного происхождения.

Терригенная составляющая взвеси вод рек и из разных частей озера имеет сходный состав: кварц, гидроксиды железа (резко преобладают), плагиоклаз (альбит, олигоклаз, андезин), калиевые полевые шпаты, мусковит, иллит (Mg, Fe), хлорит (Mg, Fe) (рис. 5.9.). Присутствуют также роговая обманка, тремолит-актинолит, диопсид-геденбергит, эпидот и каолинит, но в количествах меньше 5%.

Во всех пробах были определены отдельные зерна акцессорных минералов: магнетит, рутил, титанит, ильменит, апатит и монацит.

Стоит отметить что в минеральном веществе, собранном на фильтры в Южном Онего и Уницкой, Лижемской губах, наблюдается увеличение количества мусковита относительно других минералов (рис. 5.9.).

Во взвеси Кондопожской и Петрозаводской губ, Центрального и Малого Онего были установлены значительные количества крупных и мелких агрегатов окислов марганца (рис. 5.9.). Наибольшие концентрации железа во взвеси определенны для Южного Онего. Содержание Fe там составляет в среднем 10,5%.

Что подтверждается находками на фильтрах станции S3 гидроксидов Fe, которые, вероятно, образованы из коллоидной взвеси уже в озере (рис. 5.9.).

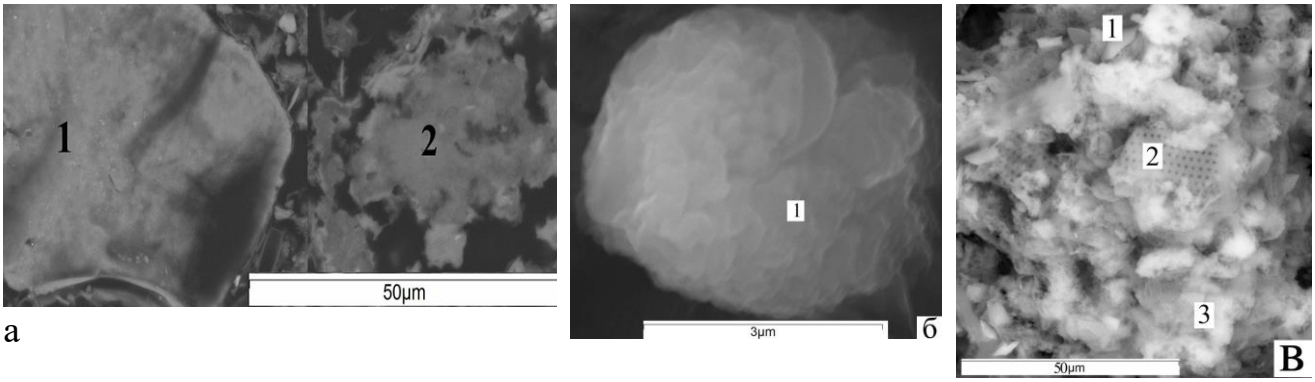


Рисунок 5.9. Фотографии, выполненные с помощью СЭМ: Южное Онего (а): 1 – крупные чешуйчатые выделения хлорита, Fe-Mg (клинохлора); 2 – спутановолокнистое тонкоигольчатое выделение гидроксидов Fe; Большое Онего (б): 1 – крупное чешуйчатое выделение мусковита; Кондопожская губа (В): 1 – альбит, 2 – панцири и биодетрит диатомовых водорослей, 3 – окислы марганца.

Данный факт хорошо соотносится с более высокой долей окислов Mn и Fe, наблюдаемых во взвеси рек, впадающих в эти районы. Как было уже выше сказано, именно для р. Лососинка (впадает в Центральное Онего), Вытегра (впадает в Южное Онего), Шелтозерка (впадает в Центральное Онего) характерно повышенное количество оксидов и гидроксидов железа и марганца.

Антропогенные частицы в пробах взвешенного вещества вод основной части акватории Онежского озера представлены крайне скудно, в основном это отдельные мелкие (от 2 до 25 мкм) зерна неправильной формы с химическим составом, который не встречается в природе. Например, согласно исследованиям, на СЭМ, на станциях B1 (Большое Онего) и L1811 (Малое Онего) в составе терригенного материала, представленного зернами кварца, альбита в ассоциации с листоватыми выделениями мусковита и гематита, присутствуют зерна неправильной формы оксида Cu и Zn, с резким преобладанием в составе Zn (рис. 5.10.).

В значительных количествах антропогенные частицы встречены только в пробах Кондопожской губы, в них преобладают антропогенные частицы разного генезиса, что также хорошо согласуется с большим количеством находок антропогенных частиц во взвеси реки Суна, впадающей в Кондопожскую губу. Среди наиболее часто встречающихся отмечены гладкие сферы сгорания, а также

игольчатые волокнистые частицы органического вещества. Размер антропогенных частиц варьирует от мелких (2-10 мкм) до крупных (до 50мкм). Гладкие сферы сгорания также выявлены во взвеси фильтров Повенецкого залива.

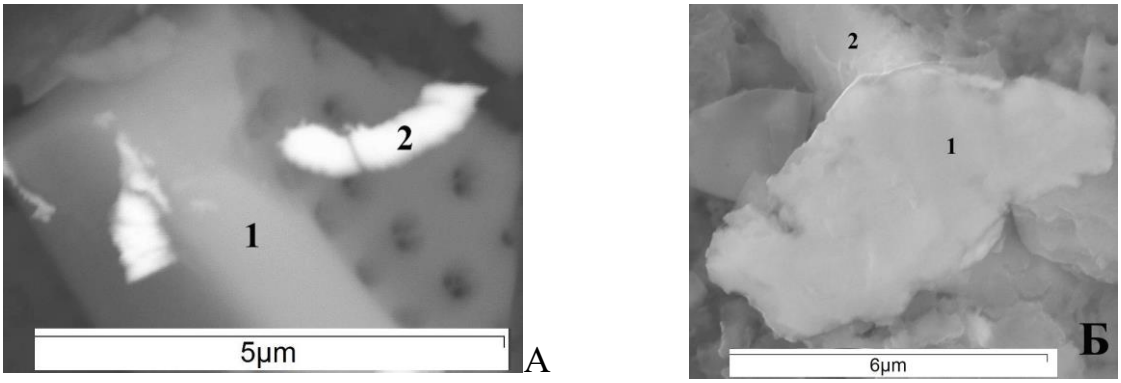


Рисунок 5.10. Фотографии, выполненные с помощью СЭМ: Большое Онего (А): 1 – многочисленные виды диатомей; 2 – выделение неправильной формы оксидов Cu, Zn; Малое Онего (Б): 1 – крупное выделение неправильной формы оксидов Cu, Zn; 2 – удлиненное зерно кальцита.

5.2.2 Осадочный материал седиментационных ловушек

В разных участках озера были установлены седиментационные ловушки, в которые был отобран осадочный материал, представленный коллоидной системой со средней плотностью 1,06 г/мл. Материал в ловушках был не гомогенный и состоял сверху из неконсолидированной охристо-буро-красной взвеси, обладающей мощностью от 1 до 3 см и плотностью близкой к плотности воды. Ниже этой взвеси находится коллоидный желеобразный коричневый ил, мощностью до 5 см. В самом низу располагался уплотненный осадок, достигающий мощности 20-25 см и имеющий иногда зелено-серый цвет (рис. 3.2.). Eh материала седиментационных ловушек изменяется от 270 до 376 мВ, pH от 6,3 до 7,3 (Сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН под руководством Белкиной Н.А).

Осадочный материал седиментационных ловушек схож для разных районов и состоит преимущественно из кварца, альбита, олигоклаза, калиевого полевого шпата, мусковита, биотита, гидроксидов железа, иллита и хлорита (рис. 5.11.).

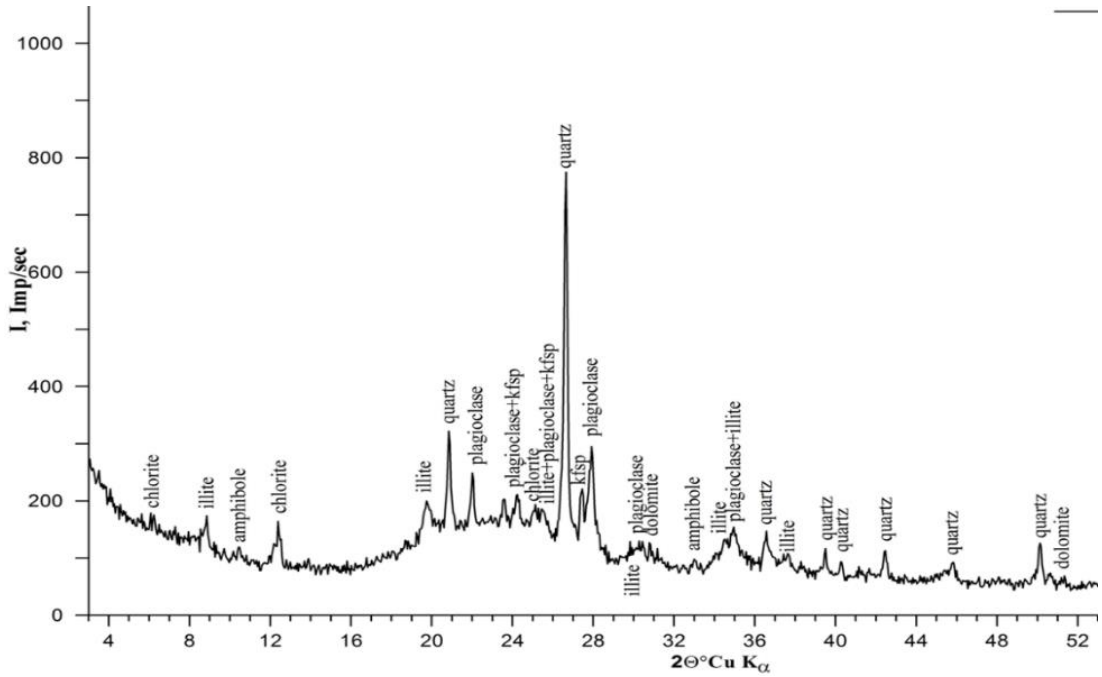


Рисунок 5.11. Рентгенограмма материала седиментационных ловушек

Среди второстепенных минералов можно назвать роговую обманку, тремолит, диопсид, эпидот, апатит и доломит Кроме того, присутствуют акцессорные минералы: магнетит, ильменит, циркон, рутил, монацит и т.д. Обычно эти минералы составляют небольшую долю от общей массы минералов (до 5 %), но их количество и соотношение может значительно варьировать в разных частях Онежского озера и зависит от состава горных пород прилегающих водосборных территорий (рис. 5.12.).

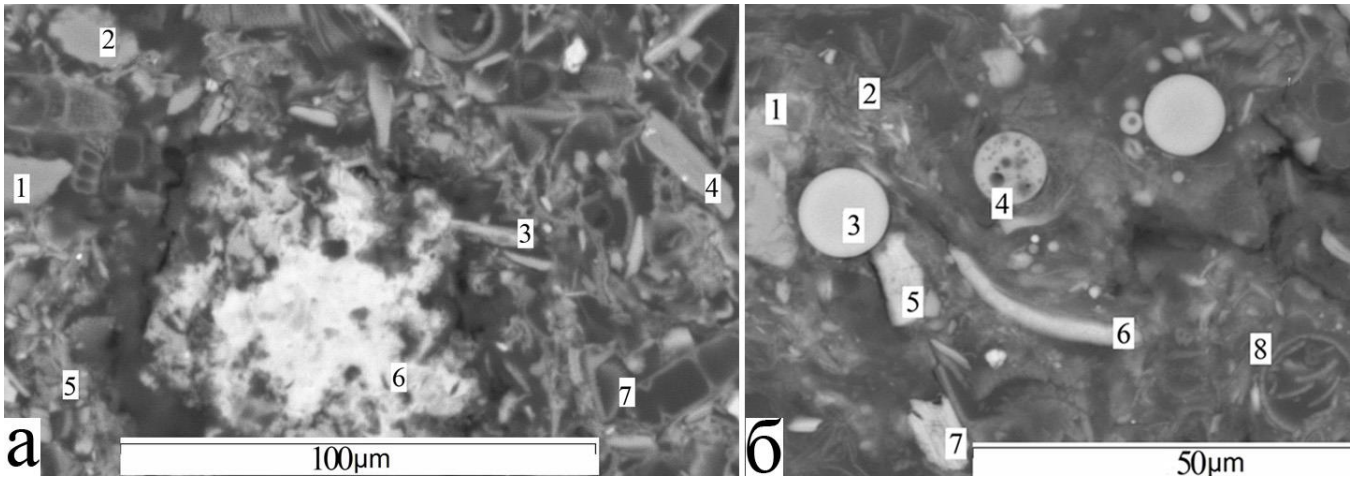


Рисунок 5.12. Фотографии с СЭМ минералов из материала седиментационных ловушек: в Петрозаводской (а) и Кондопожской (б) губах. Отдельные зерна и кристаллы минералов и их агрегаты: а – 1 – кварц; 2 – альбит; 3, мусковит; 4 – хлорит (Mg > Fe); 5 – иллит (Mg, Fe); 6 – гидроксиды марганца; 7, створки диатомовых водорослей; б – 1 – альбит; 2 – иллит (Fe, Mg); 3 – иллит (Fe > Mg) сферической морфологии; 4 – сферолит техногенного генезиса; 5 – хлорит (Mg > Fe); 6, мусковит; 7 – диопсид; 8 – створки диатомовых водорослей.

5.3 Сравнение минерального состава современных осадков с осадочным веществом экосистемы Онежского озера

Сравнение вещественного состава осадочного вещества и современных донных отложений показало, что отличие заключается в доле биогенной и минеральной составляющей. В донных отложениях биогенной составляющей меньше (табл. 5.1.).

Таблица 5.1. Сравнение вещественного состава взвеси рек, материала седиментационных ловушек и донных отложений.

Компонент озерной системы	**Вещественный состав**
Взвесь рек	**Биогенная составляющая** (диатомовые водоросли) > Минеральная составляющая (кварц, ПШ, слюда мусковитового типа, гидроксиды железа и марганца, **Mg,Fe-хлорит, Mg,Fe-иллит,** амфибол) >>> Антропогенные частицы.
Материал седиментационных ловушек	**Биогенная составляющая** (диатомовые водоросли) > Минеральная составляющая (кварц, ПШ, слюда мусковитового типа, гидроксиды железа и марганца, **Mg, Fe-хлорит, Mg,Fe-иллит**, амфибол, акцессорные минералы) >>> Антропогенные частицы.
Донные отложения	**Минеральная составляющая** (кварц, ПШ, слюда мусковитового типа, гидроксиды железа и марганца, **Fe-хлорит, Fe-иллит,** амфибол, вивианит, родохрозит, сидерит, акцессорные минералы) > Биогенная составляющая (диатомовые водоросли) >>> Антропогенные частицы.

Как уже было сказано в прошлой главе, основными компонентами донных отложений являются минералы терригенной фракции пелитовой размерности, многочисленные диатомовые водоросли, кварц и полевой шпат, Fe-иллит и Fe-хлорит, а также оксиды и гидроксиды Fe и Mn (рис 5.13.).

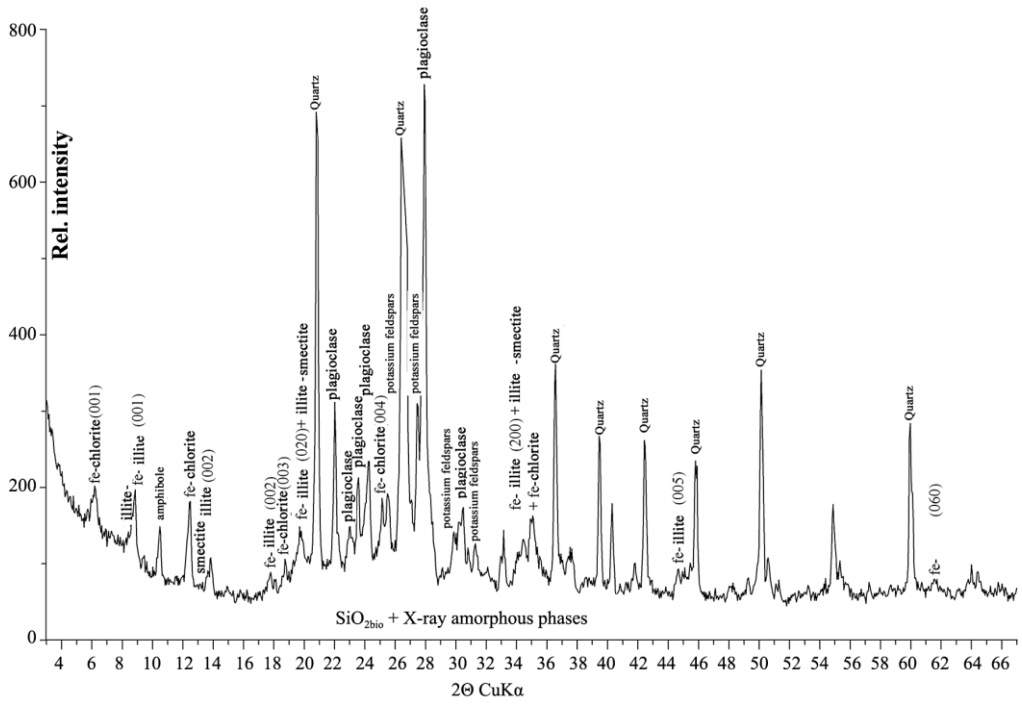


Рисунок 5.13. Дифрактограмма донных отложений, Петрозаводская губа (глубина 0–10 см).

Исследование минерального состава взвешенного вещества водной толщи Онежского озера в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков показало, что отличие в составе минералов, поступающих со взвесью в Онежское озеро, и минералов донных отложений отмечается лишь для слоистых силикатов. В составе иллита и хлорита донных отложений резко преобладает железо в отличие от их состава во взвеси на фильтрах и в материале седиментационных ловушек (рис. 5.14.).

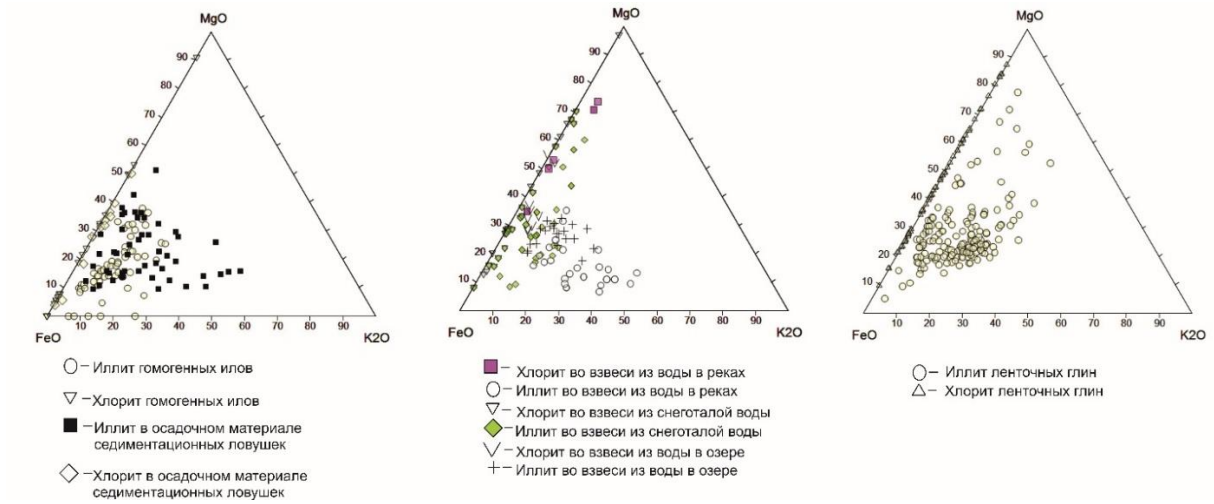


Рисунок 5.14. Диаграмма FeO-MgO-K_2O составов иллитов и хлоритов из разных компонентов (взвесь снега, вод речной и озерной, осадочного материала ловушек и донных отложений) Онежского озера.

На дифрактограммах неориентированного препарата (37 образцов) присутствуют рефлексы, которые указывают на присутствие иллита, хлорита в донных осадках в тех конкретных пробах, которые исследованы СЭМ. Установлено наличие слоистых силикатов во взвешенном материале фильтров, осадочном веществе седиментационных ловушек и донных отложений Онежского озера: мусковит, биотит, иллит и хлорит.

Чешуйчатые агрегаты зерен и отдельные пластинчатые кристаллы слоистых силикатов разделены по размерам на две группы. Крупные частицы слоистых силикатов размером от 100 мкм до 5 мм присутствовали во всех образцах. В составе хлорита и иллита соотношение Fe и Mg примерно одинаково.

Мелкозернистые агрегаты, игольчатые зерна (<5 мкм) содержали в своем составе значительно больше железа, чем магния (или чистых железистых разновидностей), и обнаружены только в материале из седиментационных ловушек и донных отложений. В осадочном веществе седиментационных ловушек состав хлоритов и иллитов (соотношение Mg-Fe) в основном идентичен для крупных зерен и мелких агрегатов в разных частях Онежского озера, и отличается от взвеси фильтров наличием менее железистых разновидностей.

В условиях высоких концентраций железа и кремния в водах Онежского озера неустойчивые агрегаты детритных иллитов (Fe-Mg) и хлоритов (Fe-Mg) трансформируются в железистые разновидности в донных отложениях (рис. 5.14., 5.15.).

Наличие значительных количеств мусковита в донных отложениях связано с эрозией более старых ледниковых отложений, в которых преобладают серициты с повышенной устойчивостью к химическому разрушению. На их образование непосредственно в озере указывает их морфология, тончайшие срастания с обломками раковин диатомовых, и изменение химического состава непосредственно в толще воды. То есть деградированные минералы слюд, привнесенные реками, регенерируются до нормальных железистых иллитов и хлоритов непосредственно в самой верхней части донного осадка.

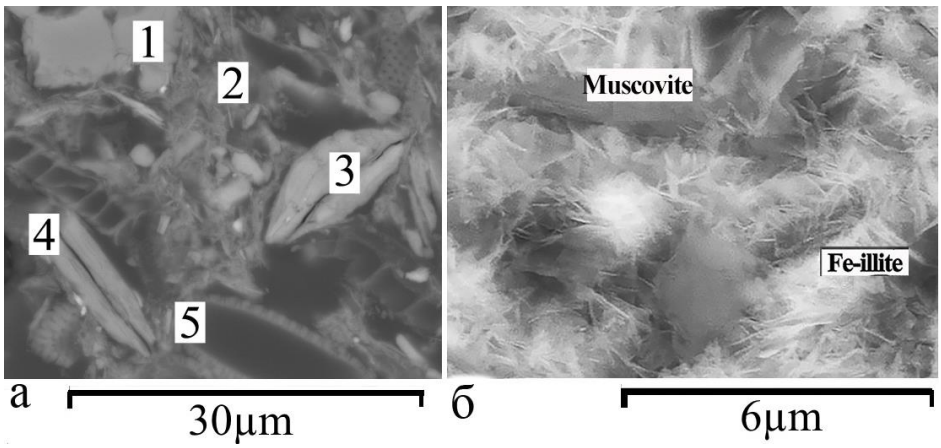


Рисунок 5.15. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ, взвешенного материала седиментационной ловушки (а) и донного осадка (б), отобранного в Малом Онего: (а) 1 – отдельные зерна альбита; 2 – мелкие ватоподобные чешуйчатые агрегаты иллита (Mg, Fe); 3 – отдельные кристаллы мусковита; 4 – отдельные зерна хлорита (Mg, Fe); 5 – скелеты и обломки панцирей диатомовых; (б) Fe-иллит – мелкие ватоподобные чешуйчатые агрегаты иллита (Fe); Мусковит – отдельные крупночешуйчатые агрегаты мусковита.

Стоит также отметить, что хоть отличие в составе минералов, поступающих со взвесью в Онежское озеро, и минералов донных отложений отмечается лишь для слоистых силикатов, донные отложения имеют более схожий состав в разных районах Онежского озера, в отличии от взвешенного вещества Онежского озера и тем более материала рек. Данный факт указывает на гомогенизацию осадка по всей акватории в процессе осаждения.

5.4 Скорости осадконакопления в Онежском Озере

В кернах донных отложений разных районов Онежского озера, относящихся к разным типам стратификации, проведено детальное изучение распределения ^{210}Pb (через 1 см) и ^{137}Cs (рис. 5.16.). Расчеты скоростей осадконакопления для проанализированных проб позволили дать оценки скорости ненарушенной седиментации в пределах последних 100 лет, рассчитанные по ^{210}Pb, и сопоставить их с графиками распределения по ^{137}Cs.

Основа метода заключается в разделении активности неравновесного и равновесного ^{210}Pb и расчёта возраста осадка в соответствии с законом радиоактивного распада при учете допущений модели CRS (ConstantRateoSupply) (Appleby&Oldfield, 1978). Модель базируется на допущении, что атмосферное

поступление ^{210}Pb в донные отложения постоянно; скорость осадконакопления в пределах рассматриваемого промежутка времени (одной пробы) не меняется; нет постседиментационной миграции радиоактивных элементов.

Расчеты по данной модели для проанализированных проб позволили дать оценки скорости ненарушенной седиментации в пределах последних 100 лет, рассчитанные по ^{210}Pb, и сопоставить их с графиками распределения по ^{137}Cs, и провести их экстраполяцию по ^{137}Cs. Следует отметить, что в нижней части колонки мы приближаемся к пределу возможности датирования по ^{210}Pb (111 лет или 5 периодов полураспада).

Согласно расчетам по распределению ^{210}Pb, рост активности ^{137}Cs в вертикальных разрезах донных отложений Онежского озера начинается с глубины 11-15 см (Малое Онего и Большое Онего) и 7-9 см (Центральное, Южное Онего и заливы, губы) (это в обоих случаях 1950-1955 гг. – начало ядерных испытаний на испытательных полигонах, концентрация ^{137}Cs увеличивается вверх по разрезу до глубины 7-9 см (Малое и Большое Онего) и 4 см (Центральное, Южное Онего и заливы, губы). Распределения ^{137}Cs в донных отложениях характеризуется наличием отчетливо выраженного пика активности ^{137}Cs на разной глубине донной залежи в разных частях акватории Онежского озера, а вверх и вниз по разрезу происходит затухание удельной активности радиоизотопа.

Согласно расчетам скоростей седиментации по модели CRS во всех разрезах донных отложений в различных районах Онежского озера и малых озер пик содержания ^{137}Cs в глубоких интервалах керна приходится на 1961-1965 гг. Пик активности ^{137}Cs в этом временном интервале свидетельствует о первоначальном загрязнении донных отложений в результате ядерных испытаний, проведенных на Новоземельском полигоне в 1961-1962 гг. Мощность которого равнялась 132710 килотоннам или 55,3% мощности всех атмосферных испытаний на Новоземельском полигоне, включая крупнейший в мире ядерный взрыв 30.10.1961 года (Ядерные…, 2000). Отложившийся детрит, неорганические частицы и мортмасса улавливают радионуклиды из воды и уносят их на дно. Процесс происходит синхронно с непрерывным перераспределением радиоактивных

элементов на границе вода-донные отложения и их накоплением бентосом. При отмирании биомассы ^{137}Cs возвращается в донные отложения. С другой стороны, большая часть ^{137}Cs сосредоточена в самом верхнем слое почвы и осадочных рыхлых породах водосбора озер, а их разрушение приводит ко вторичному загрязнению донных отложений радионуклидами, поступающими из аллохтонных частиц из водосборных бассейнов. Таким образом, от пиковых значений в верхнем горизонте до границы придонных отложений снижение активности ^{137}Cs происходит постепенно.

Важно отметить, что графики распределения ^{210}Pb и ^{137}Cs в колонках 1 и 2 типа стратификации одинаковые и, следовательно, на распределения ^{210}Pb и ^{137}Cs не влияет тип диагенеза (рис. 5.16.).

Исходя из сделанных допущений и полученных данных, оценены скорости осадконакопления в различных районах Онежского озера, которые составляют: Большое Онего – 0,05 см/год, Малое Онего – 0,14 см/год, Лижемская губа – 0,07 см/год; Южное Онего – 0,09 см/год; Центральное Онего – 0,03 см/год, Уницкая губа – 0,11 см/год.

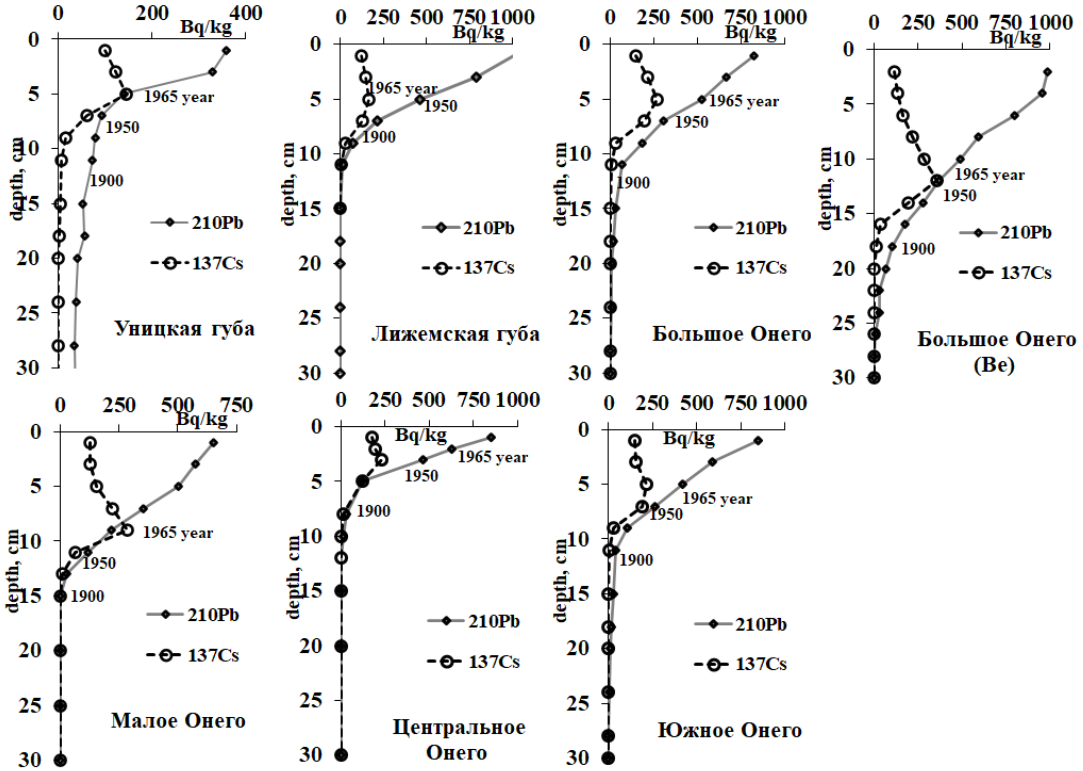


Рисунок 5.16. Вертикальное распределение удельной активности ^{137}Cs (Бк/кг) и $^{210}Pb_{атм}$ в донных отложениях разных районов Онежского озера.

Величины скорости осадконакопления в разных районах озера полученные путем оценки активности ^{137}Cs и ^{210}Pb в разрезах керна донных отложений, сопоставимы со скоростями, которые получены из натурных наблюдений в СЛ. Скорость осадконакопления по натурным наблюдениям в СЛ в зависимости от района изменяется более чем на порядок: от 1 мм до 3 см свежеосажденного неконсолидированного вещества или от 0,1 до 2,8 мм/год уплотненного грунта (расчет на глубину 20 см) (Страховенко и др., 2022).

Полученные результаты согласуются с данными для схожих объектов. Так, величины скорости осадконакопления для озер Гурон и Мичиган (США), сопоставимы с нашими данными и варьируют от 0,02 до 0,2 см/год для озера Гурон (Durham and Joshi, 1980) и от 0,05 до 0,28 см/год для озера Мичиган (Robbins and Edgington,1975). Полученные результаты также хорошо ложатся в диапазон значений скоростей осадконакопления, полученных для акватории Белого моря, для которого значения варьируют в диапазоне от 0,04 до 0,42 см/год (Новигатский и др., 2023). В рассматриваемых работах скорости осадконакопления оценивались теме же методом, что и в работе автора диссертации.

5.5 Результаты кластерного анализ.

Аналитическая обработка геохимических данных включала кластерный анализ, задача которого – разбить множество химических элементов на группы, где объединяются элементы с наивысшими значениями меры сходства (парные коэффициенты корреляции Пирсона) (Михальчук, Язиков, 2014).

Корреляция между химическими элементами и их группами, рассчитанная для материала седиментационных ловушек, а также для донных отложений (разделены на три группы по глубине разреза и принадлежности к первому или второму типу стратификации (наличие или отсутствие окислительно-восстановительного геохимического барьера в донном осадке на глубине до 40 см) хорошо прослеживается на дендрограмме кластер-анализа R-типа (рис. 5.17.).

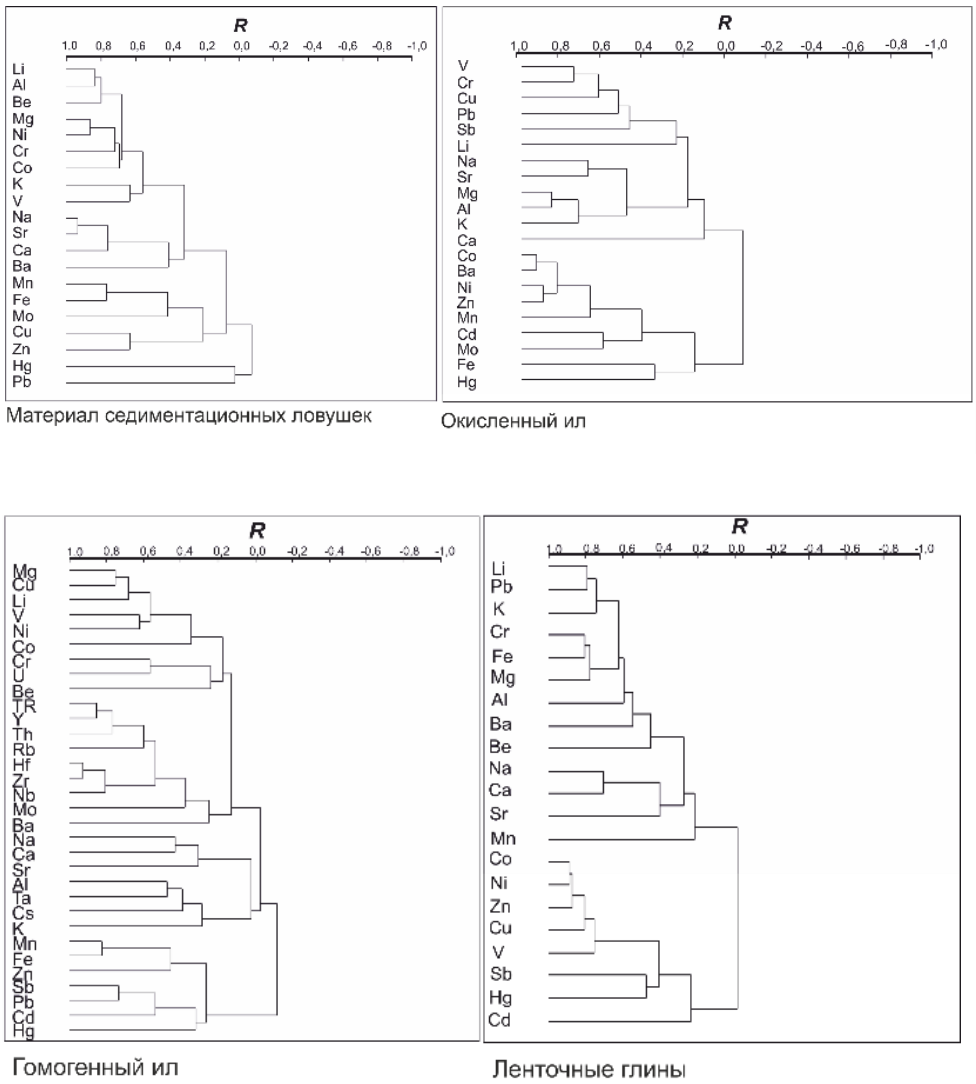


Рисунок 5.17. Дендрограммы кластер-анализа R-типа, рассчитанные на основе концентраций химических элементов в материале седиментационных ловушек и донных отложений.

Согласно кластерному анализу R-типа существуют от 1 до 2 групп элементов, образующих значимые (при вероятности 95%) положительные корреляционные связи между макро- и микроэлементами внутри группы в выделенных пачках донных отложений. Элементы отдельной группы по высоким коэффициентам корреляции разделяются на подгруппы. Элементы наиболее многочисленной группы входят преимущественно в состав минералов терригенной фракции, они делятся на более мелкие подгруппы с более высокими коэффициентами положительной корреляции, разделяются по составу основных породообразующих или акцессорных минералов, что подтверждается данными изучения фазового состава донных отложений с использованием СЭМ.

Выделение групп химических элементов определяется наличием нескольких главных минеральных фаз, которые выступают их концентраторами. Такими минеральными фазами для верхней части донных отложений, в которую вошли окисленные илы + железо-марганцевые образования, выступают: кварц, полевые шпаты, слоистые силикаты (хлорит, иллит, слюды) и гидроксиды Fe и Mn (Strakhovenko et al., 2020б).

В нашем случае мы видим, что литофильные элементы образуют свою группу, выделением которой обусловлено вхождение этих элементов в силикатные минералы, и группу минералов, тесно связанных с гидроксидами Fe и Mn.

Для залегающих ниже гомогенных илов основными минеральными фазами, являются те же минералы, однако их количественное соотношение другое. В гомогенных илах в меньших количествах присутствуют гидроксиды Mn, при этом полностью отсутствуют гидроксиды Fe, которые в процессе диагенеза в восстановительной обстановке преобразуются в фосфаты и карбонаты Fe. Различное соотношение основных минеральных фаз ведет к отличному объединению химических элементов по группам (рис. 6.17.). К группе фосфата железа, минералу, который слагает многочисленные слойки в гомогенных илах, присоединяются Hg, Sb, Pb, Cd. Согласно литературным данным и нашим более ранним исследованиям высокие концентрации данных элементов в органоминеральных отложениях обусловлены их высокой способностью аккумулироваться биотой (Моисеенко, Гашкина, 2018; Федоров и др., 2013; и др.). Известно, что в процессе диагенеза фосфат железа является конечным продуктом анаэробного процесса восстановления трехвалентного железа (Fe(III)) в результате жизнедеятельности микроорганизмов (Заварзина, 2001; Strakhovenko et al., 2020а, б; и др.). Следовательно, можно предположить, что Hg, Sb, Pb, Cd, сорбированные биотой, при её минерализации остаются в ассоциации с фосфатом железа.

В ленточных глинах одна группа минералов обломочной фракции подразделяется на 4 подгруппы: к минералообразующим элементам (полевые шпаты, иллиты, циркон+ильменит, хлориты) присоединяются элементы, которые

часто в них присутствуют в виде изоморфных примесей. Особняком находятся Hg, Sb, Mo, Cd.

Как и для донных отложений, для материала седиментационных ловушек (СЛ), объединение элементов по группам определяется наличием нескольких главных минеральных фаз. С точки зрения вещественного состава донные отложения и материал СЛ идентичны за исключением катионного состава иллита и хлорита. В составе донных отложений основная часть иллита и хлорита, представлена железистыми разновидностями, которые образовались непосредственно в озере (Strakhovenko et al., 2022; Strakhovenko et al., 2020a). На дендрограмме кластер-анализа R-типа для материала седиментационных ловушек также, как и для донных отложений, литофильные элементы образуют свои группы, выделение которых обусловлено вхождением этих элементов в силикатные минералы. Fe-Mn образуют отдельную группу, обусловленную наличием гидроксидов Fe-Mn в составе материала седиментационной ловушки.

ВЫВОДЫ 5 ГЛАВЫ

Состав осадочного вещества, поступающего в Онежское озеро, достигает донный осадок без существенных изменений и представлен минералами терригенной фракции, биогенной составляющей, а также частицами антропогенного происхождения.

В донных отложениях наблюдаются более железистые разности иллита и хлорита, в отличие от разностей этих же минералов во взвешенном веществе в воде. Данный факт указывает, что часть слоистых силикатов формируется непосредственно в донных отложениях и имеет аутигенный генезис.

Донные отложения имеют более схожий минеральный состав в разных районах Онежского озера, в отличие от взвешенного вещества Онежского озера и тем более материала рек, что указывает на гомогенизацию осадка по всей акватории в процессе осаждения.

Скорость седиментации варьирует как по акватории Онежского озера, так и в пределах одного района: Большое Онего – 0,05 см/год, Малое Онего – 0,14 см/год, Лижемская губа – 0,07 см/год; Южное Онего – 0,09 см/год; Центральное Онего – 0,03 см/год, Уницкая губа – 0,11 см/год.

Глава 6. РТУТЬ В СИСТЕМЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Ртуть является токсичным элементом. По мнению всемирной организации здравоохранения, Hg входит в десятку наиболее опасных химических веществ (Raj, Maiti, 2019) из-за ее высокой мобильности и биоаккумуляционной способности (Selin, 2009). Наибольшую опасность ртуть представляет, попадая в водные экосистемы, где она может преобразовываться в более токсичную форму – метилртуть, которая аккумулируется в водных пищевых цепях (Hsu-Kim et al., 2013).

Одним из главных объектов исследования пресноводных экосистем являются озера, которые играют важнейшую роль в процессах концентрирования химических элементов, так как являются конечными водоемами стока наравне с морями и океанами. В крупных озерах Европы процессы перераспределения химических элементов сопоставимы со внутренними морями. Преобразование неорганической ртути в монометилртуть в водной среде может привести к высоким концентрациям монометилртути в рыбе и оказать негативное воздействие на здоровье диких животных и людей, потребляющих рыбу (Mergler et al., 2007).

В пресноводных экосистемах преобладающими источниками ртути являются прямое атмосферное осаждение и поступление со сточными водами, речным стоком. Атмосферное осаждение ртути особенно важно в озерах с большим отношением площади водной поверхности к объему воды озера и небольшими площадями водосбора (Kocman et al., 2017).

Ртуть попадает в пресноводные системы из разных источников и подвергается сложным путям переноса (Driscoll et al., 2013). Различным путям переноса соответствуют характерные для них процессы преобразования формы ртути. Вследствие чего для каждого своего пути поступления в пресноводную экосистему может быть ртуть в своей форме, что, в свою очередь, сильно влияет на

ее дальнейшую судьбу в пресноводной экосистеме (Obrist et al., 2018). Атмосферное осаждение является основным источником ртути для регионов, на территории которых нет выходов ртутьсодержащих пород. Гидрология и мобильность растворимых органических соединений являются основными средствами контроля доставки Hg в такие водные экосистемы (Louis et al., 2016).

Как и в случае почти для всех глобальных балансов микроэлементов, существуют неопределенности в отношении оценки количества антропогенной и природной ртути, «хранящейся» в различных компонентах окружающей среды, потоков между ртутными резервуарами и темпов удаления ртути из биосферы. В настоящий момент существует большое число работ, посвящённых этой проблеме (Streets et al., 2011; Amos et al., 2013; Driscoll et al., 2013; Horowitz et al., 2014; Lamborg et al., 2014; Zhang et al., 2014; Amos et al., 2015; 106. Streets et al., 2017). Однако интерполяция таких данных на уникальные объекты будет давать большое количество неточностей в отношении оценок. К таким уникальным объектам можно отнести Онежское озеро. Исследования экосистемы очень большого озера (площадь зеркала >1000 км^2), вносит необходимость учитывать неравномерность развития гидродинамических процессов разного масштаба, а также мозаичность характера антропогенного воздействия, который проявляется не сразу, часто с длительным временным перерывом.

В работах предшественников сообщалось об обнаружениях концентраций ртути, превышающих значения ПДК. Например, в статье (Горбунов и др., 2020) сообщается о концентрациях ртути в мышцах рыб, потребляемых в Петрозаводске и Медвежьегорске. Авторы показывают, что максимальные значения концентрации ртути в мышцах окуня, судака и щуки, выловленных в Онежском озере, либо превышают значения ПДК 500 ppb, либо близки к этим значениям.

В статье (Игнатьева и др., 2015) указано: «концентрации ртути, превышающие ПДК (0,01 мкг/л), были обнаружены в 2013 г. в водах рек Шуя, Андома, Свирь (Свирьстрой), Полисть, Веронда, Волхов, Морье, а также в водах Онежского озера вблизи населенных пунктов Кондопога, Медвежьегорск, Повенец (до 0,048 мкг/л). В 2014 г. содержание ртути до 0,060 мкг/л в разные сроки

наблюдения отмечалось в Кондопожской губе, у пос. Песчаное, в реках Вытегра, Пола, Ловать, Псижа, Перехода, Шелонь, Веронда, Волхов, Вуокса, Тулема, Видлица, Оять, Паша, Сясь, Лава, оз. Ильмень. В то же время в р. Лососинка, притоках Ильменя – Нише, Полисти, Псиже, Переходе, Шелони, Веронде, Веряже, а также в Свирице и Назии ртуть была обнаружена в более высоких концентрациях – 0,14-0,27 мкг/л».

Согласно работам (Kulik et al., 2022) основное поступление литофильных элементов и тяжелых металлов в Онежское озеро связано с речным стоком (68-97 % от общего поступления каждого элемента в отдельности). Эти данные полностью соответствуют материалам, опубликованным в статье А.Ю. Санина (Санин и др., 2020). В этих работах содержание ртути не изучалось.

Однако в работе А. В. Горбунова с соавторами (Горбунов и др., 2020) показано, что уровни накопления ртути в почве и растительности в исследованных ими городах Карелии не превышают принятых в России нормативов и близки к фоновым.

Как видно, из упомянутых выше публикаций, на территории Онежского озера отмечаются повышенные концентрации ртути только в водных и связанных с ними объектах окружающей среды.

6.1 Ртуть в системе вода – взвешенное вещество

Общее содержание ртути в воде Онежского озера в среднем составляет 0,32 ± 0,07мкг/л. Минимальные значения получены для водных проб Повенецкого залива – 0,022 мкг/л. Максимальные значения характерны для водных проб, отобранных в Южном Онего (0,852 мкг/л) и Большом Онего (0,552 мкг/л). Данные величины превышают допустимые концентрации (0,5 мкг/л) (СанПиН 2.1.4.1074 – 01) (Malov et al., 2022).

Наши результаты согласуются с данными, полученными другими исследователями. Так, концентрация ртути в воде Петрозаводской губы аналогичны концентрациям ртути для этого района, полученным в 2016 году

(Efremova et al., 2019). О схожих значениях сообщается и в статье (Горбунов и др., 2020). По их данным среднее содержание ртути в воде $Hg_{ср}$ = 0,028 мкг/л (от 0,017 до 0,039 мкг/л). Стоит отметить, что полученные вышеупомянутыми авторами значения, в среднем ниже полученных нами и не превышают предельно допустимых концентраций (Malov et al., 2022).

Концентрации ртути во взвешенных частицах в воде Онежского озера варьируют от 0,002 мкг/л (Лижемская губа) до 0,073 мкг/л (Заонежский залив), среднее содержание – 0,024±0,006 мкг/л. Содержание ртути в растворенной+коллоидой форме выше значений содержания ртути в виде взвеси. Содержание ртути в растворенном-коллоидном виде изменяется в широком диапазоне: от 0,01 мкг/л в Кондопожской губе и Повенецком заливе до 0,85 мкг/л в Южном Онего. Таким образом, преобладающая форма нахождения ртути в воде – раствор+коллоид (рис. 6.1.). Только лишь в Кондопожской губе и Повенецком заливе преобладает ртуть во взвешенной форме (Malov et al., 2022).

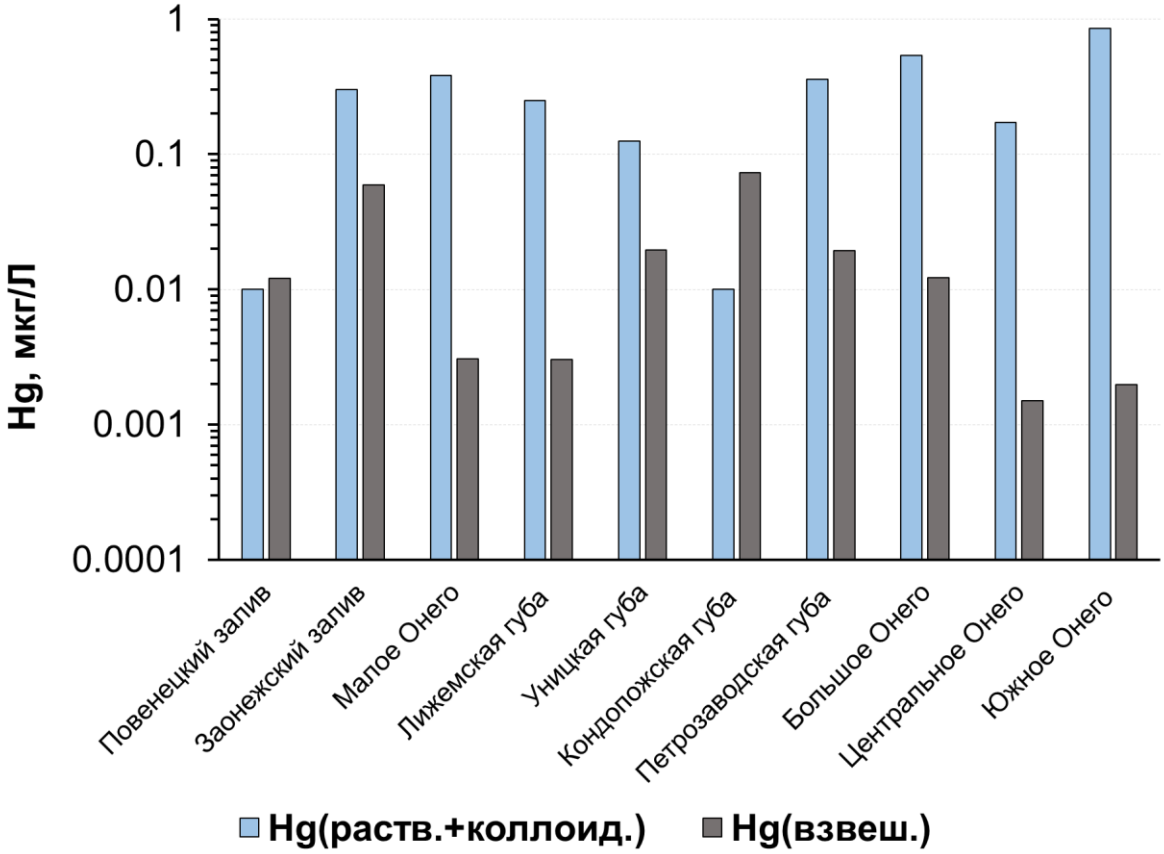


Рисунок 6.1. Форма нахождения ртути в воде в разных районах Онежского озера.

Нами установлено, что содержания ртути в материале седиментационных ловушек варьируется в широком диапазоне от 0,062 мкг/г до 4,37 мкг/г. Стоит отметить, что высокие значения наблюдаются лишь в двух районах Онежского озера: в районе Лижемской губы (4,37 мкг/г) и в Повенецком заливе (0,76 мкг/г). Полученные значения превышают значения ПДК (0,5 мг/кг) и требуют дальнейшего изучения и выявления источника ртути. Для остальных районов средняя концентрация ртути в материале седиментационных ловушек равна 0,12 мкг/г (Malov et al., 2022).

Для подтверждения полученных результатов произведена повторная установка седиментационных ловушек в тех же районах озера. В 2021 году в материале седиментационных ловушек получены близкие значение концентраций ртути (табл. 6.1., рис. 6.2.). Седиментационную ловушку, расположенную в Лижемской губе и Повенецком заливе, не удалось поднять в 2021 году.

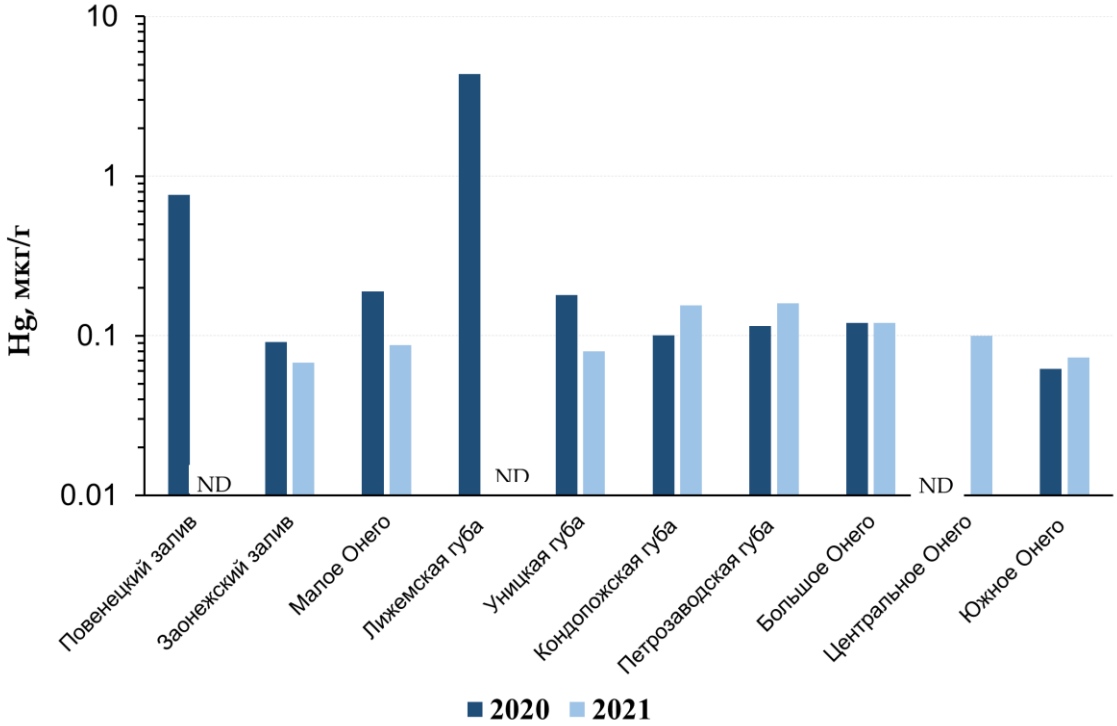


Рисунок 6.2. Содержание ртути в материале седиментационных ловушек из разных районов Онежского озера в 2020 и 2021гг., ND – нет данных.

Таблица 6.1. Содержание ртути в компонентах озерной экосистемы Онежского озера.

Район озера	Ртуть в воде		Ртуть в материале седиментационных ловушек (2020/2021 год), мкг/г	Ртуть в донных отложениях	
	$Hg_{растворенная}$, мкг/л	$Hg_{взвешенная}$, мкг/л		Донные отложения 0 - 20 см, мкг/г	Донные отложения 20- 200 см, мкг/г
Повенецкий залив	0,010	0,012	0,76/ND	0,041	0,023
Заонежский залив	0,300	0,060	0,09/0,07	0,050	0,019
Малое Онего	0,385	0,003	0,19/0,09	0,053	0,033
Лижемская губа	0,250	0,003	4,37/ND	0,073	0,044
Уницкая губа	0,125	0,020	0,18/0,08	0,070	0,016
Кондопожская губа	0,010	0,073	0,10/0,15	0,089	0,031
Петрозаводская губа	0,360	0,019	0,11/0,16	0,052	0,027
Большое Онего	0,540	0,012	0,12/0,12	0,076	0,058
Центральное Онего	0,173	0,002	ND/0,10	0,069	0,044
Южное Онего	0,850	0,002	0,06/0,07	0,080	0,044

Примечание: ND – нет данных

Преобладание ртути во взвешенной форме в некоторых районах указывает, что существует как минимум еще один источник ртути – антропогенная деятельность. Большинство предприятий сбрасывают стоки, содержащие микроэлементы, включая ртуть, непосредственно в воду (Nriagu, Pacyna, 1988). Хлорно-щелочные заводы и целлюлозно-бумажные фабрики были крупными промышленными источниками, сбрасывающими ртуть в виде отходов в водоемы (Clarkson, 2002; Hylander., Meili, 2005). Это согласуется с нахождением промышленных производств на берегу Кондопожской губы и Повенецкого залива, которые могут являться источником таких ртутьсодержащих частиц.

6.2 Ртуть в донных отложениях Онежского озера

Из анализа концентраций ртути в разрезе донных отложений установлено, что ниже 20 см и до 200 см распределение равномерное не изменяется вдоль всего интервала и в среднем составляет 0,041 ±0,001 мкг/г (рис. 6.3.) (Malov et al., 2022).

В верхней части разреза (выше 20 см) наблюдается резкое повышение концентраций Hg, среднее значение составляет 0,067 ± 0,003 мкг/г. Наиболее высокие концентрации характерны для окисленных слоев и слоев, обогащенных Fe-Mn (Malov et al., 2022).

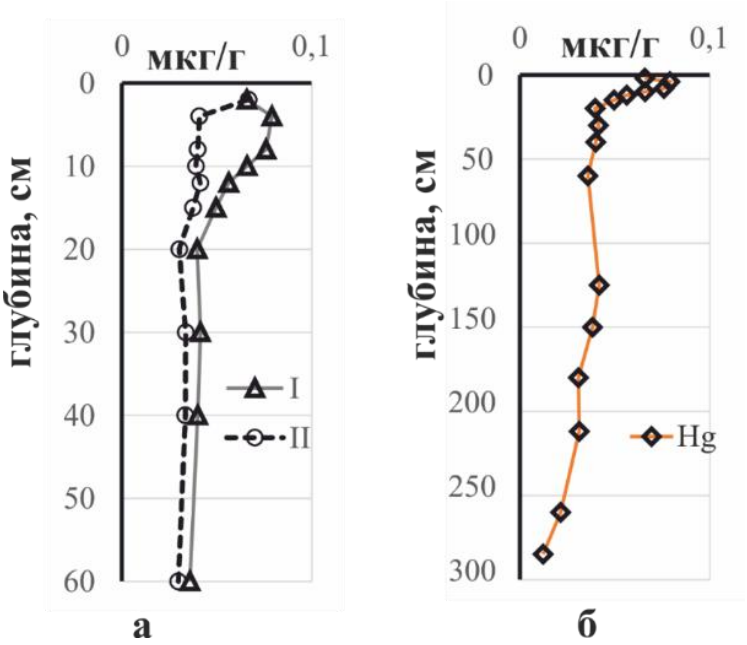


Рисунок 6.3. Распределение ртути: а) в I и II типе разрезов донных отложений Онежского озера, б) в усредненном разрезе донных отложений Онежского озера.

Различия в распределении ртути в разрезах первого и второго типа заключается лишь в мощности зоны с повышенными значениями концентраций ртути и максимальными значениями (0,19 мкг/г для первого типа и 0,12 мкг/г для второго типа разрезов) (рис 6.4.) (Malov et al., 2022).

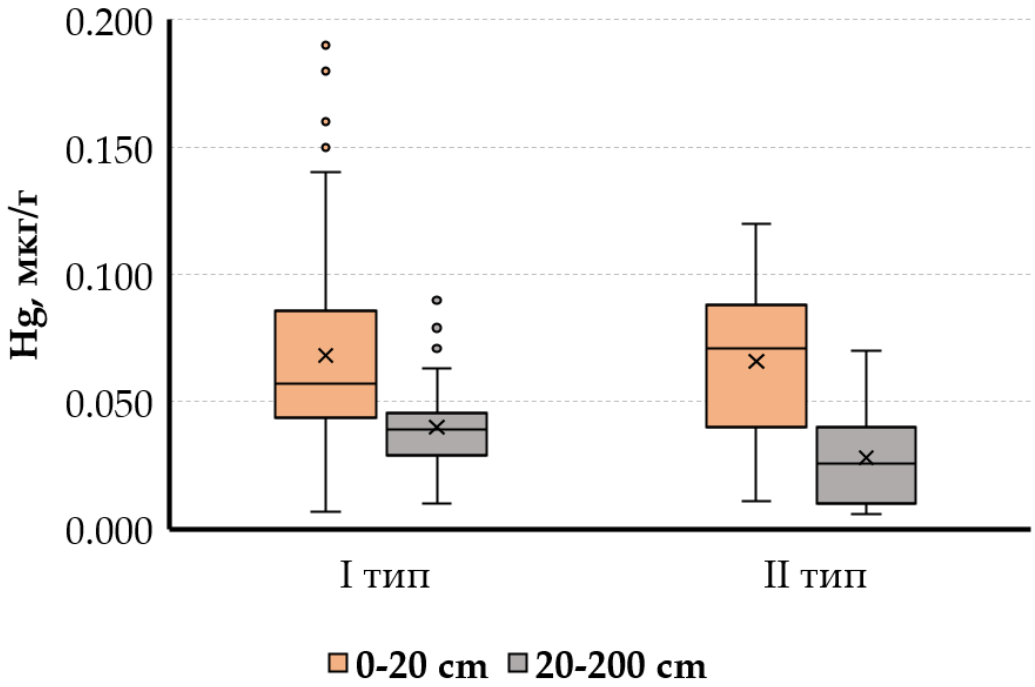


Рисунок 6.4. Содержание ртути в донных отложениях колонок I и II типа.

В ходе работы впервые изучено латеральное распределение ртути в донных отложениях на всей акватории Онежского озера. При изучении латерального распределения содержаний ртути в верхней части разреза донных отложений установлено, что содержание ртути в донных отложениях имеет равномерный характер распределения и варьируется в диапазоне от 0,041 до 0,089 мкг/г. (рис. 6.5.). При этом для северо-восточной части Онежского озера (Повенецкий и Заонежский заливы, Малое Онего) характерны более низкие значения, чем для остальной части акватории Онежского озера. Максимальные значения содержания ртути в верхней части донных отложений установлены в Кондопожской губе (0,089 мкг/г) (рис. 6.5.) (Malov et al., 2022).

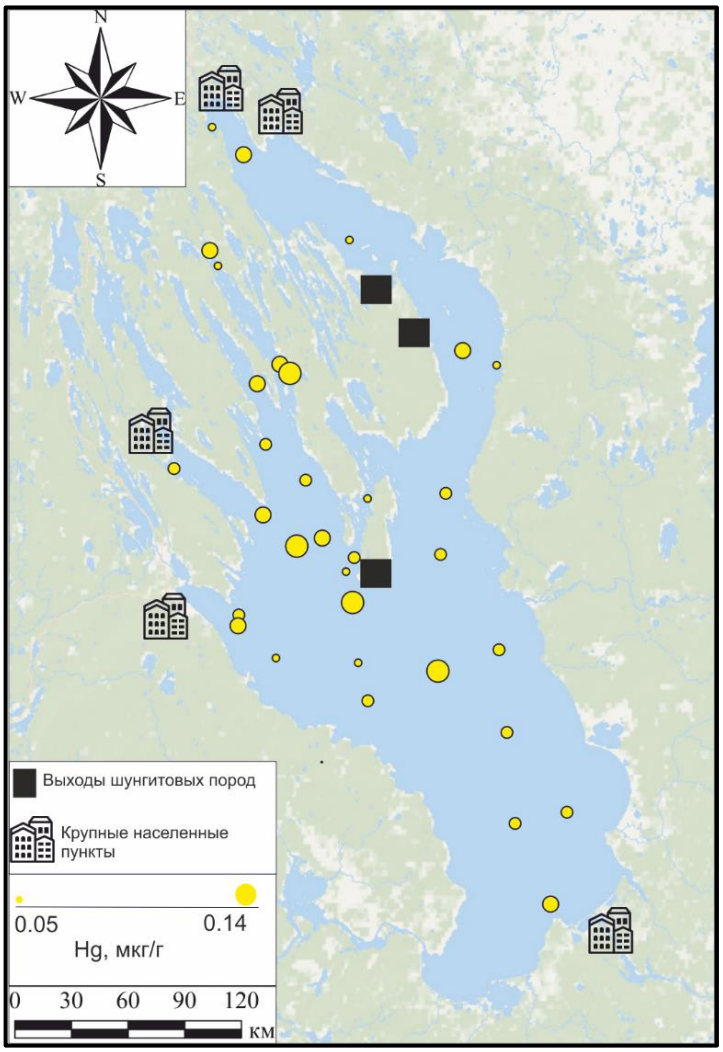


Рисунок 6.5. Латеральное распределение концентраций ртути в донных отложениях Онежского озера: I – Повенецкий залив; II – Заонежский залив; III – Малое Онего; IV – Уницкая губа; V – Лижемская губа; VI – Кондопожская губа; VII – Петрозаводская губа; VIII – Большое Онего; IX – Центральное Онего; X – Южное Онего.

Как уже было сказано выше, на всей акватории содержания ртути в нижних горизонтах донных отложений имеют более низкие значения концентраций, чем в верхних (рис. 6.6.). Наименьшие значения в нижней части разреза наблюдаются в донных отложениях, отобранных в Уницкой губе – 0,016 мкг/г, максимальные значения в районе Большого Онего составляют 0,058 мкг/г (Malov et al., 2022).

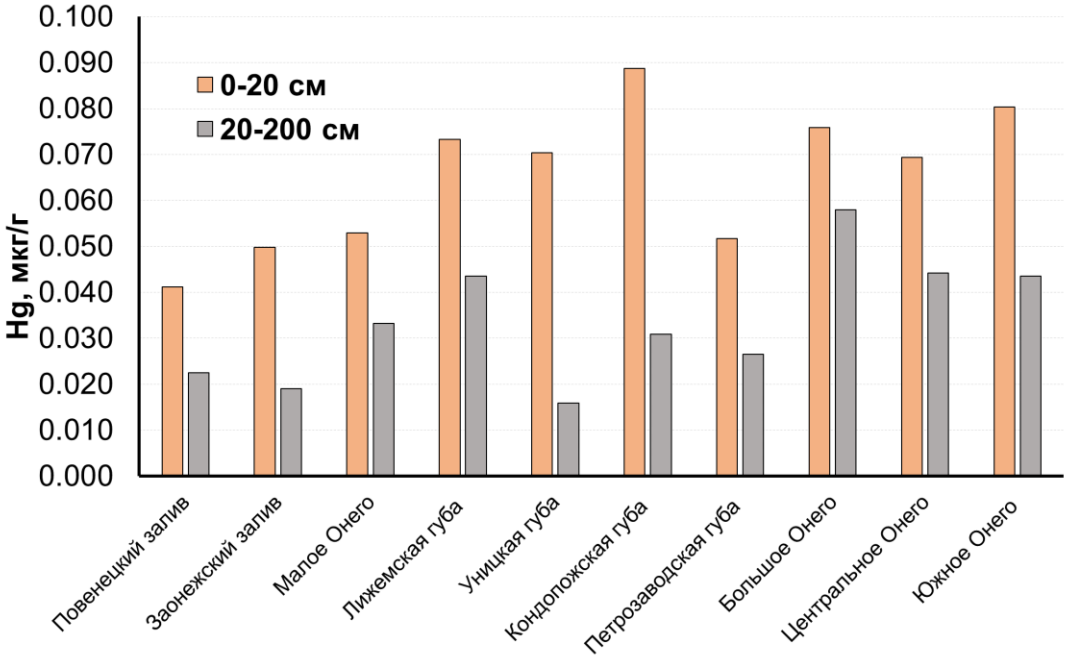


Рисунок 6.6. Содержание ртути в донных отложениях Онежского Озера

Более высокие концентрации ртути в верхней части донных отложений могут указывать либо на изменение динамики, а именно на увеличение потока поступления ртути, либо на перераспределение содержаний ртути в донных отложениях в процессе диагенеза.

Источником ртути может быть электролизный процесс при производстве хлора и каустика, территориально которое всегда расположено рядом с потребителями, основными из которых являются производители целлюлозно-бумажной продукции. Наиболее опасным производством, с точки зрения воздействия на экосистему Онежского озера, является Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат. За 90 лет его существования, начиная с 1929 г., объемы (от 2,6 в 1948 г. до 64,5 млн. м^3 в 1990 г.) и качественный состав сточных вод, поступающих в Кондопожскую губу Онежского озера, менялись в соответствии с

применяемыми технологиями. В настоящее время сточные воды, сбрасываемые целлюлозно-бумажным комбинатом (ЦБК) (~ 40 млн. $м^3$ в год), выносят в водоем значительное количество загрязняющих веществ. Так, в среднем в залив в течение года поступает ~ 2500 т взвешенных веществ: 50 т фосфора, 60 т азота и т.д (Kulik et al., 2022). Именно в донных отложениях Кондопожской губы выявлены высокие концентрации ртути в донных осадках (0,19 мг/кг), что на порядок выше, чем в других частях озера. Высокие концентрации ртути в осадочном материале седиментационных ловушек практически во всех губах (Повенецкий залив – 0,76 мкг/г; и особенно в Лижемской губе (4,3 мкг/г)) могут указывать на ветровой разнос загрязненной пыли (Malov et al., 2022).

Выявлено, что на всей акватории Онежского озера, концентрации ртути в материале седиментационных ловушек выше, чем содержание ртути в соответствующих им кернах донных отложений. Различие в концентрациях ртути в материале седиментационных ловушек в разное время, предположительно, обусловлено единичными антропогенными выбросами ртути в водную экосистему озера.

Напомним, что вещественный состав материала из седиментационных ловушек близок по составу к верхней части донных отложений, за исключением наличия железистых иллитов и хлоритов для донных отложений и большего количества органических остатков в материале седиментационных ловушек (Палеолимнология …, 2022; Strakhovenko et al., 2018; Strakhovenko et al., 2020a Strakhovenko et al., 2020б). Со вторым фактом также может быть связаны более высокие концентрации ртути в материале седиментационных ловушек, так как ртуть имеет высокую биоаккумуляционную способность.

Согласно графикам вертикального распределения содержаний ртути, в донных отложениях можно сделать вывод, что в позднем плейстоцене и голоцене поток ртути в донные отложения был постоянен. И лишь в современное время (около 200 лет) наблюдается повышение концентраций ртути в донных отложениях. При этом наиболее высокие концентрации выявлены в окисленной части донных илов. По данным радиометрического датирования с использованием

неравновесного ^{210}Pb (Strakhovenko et al., 2020a) повышение концентраций ртути наблюдается в донных отложениях с возрастом до 150 лет назад, при этом резкое повышение наблюдается с 80 лет назад.

Тесная связь ртути с Fe и Mn, которая установлена для верхней части разреза донных отложений, объясняется сорбцией Hg гидроксидами Fe и Mn. Гидроксиды Fe и Mn играют важную роль в круговороте и транспорте микроэлементов из-за их большой площади поверхности и высокой способности сорбировать и соосаждать металлы (Nelson et al., 2002) Увеличение поступления гидроксидов Fe и Mn в голоцене, вызванное гумидизацией климата, может являться причиной увеличения поступления ртути совместно с гидроксидами Fe и Mn. Источником ртути в этом случае могут выступать шунгитовые породы, для которых преобладание физического выветривания в позднем плейстоцене, сменилось на химическое в голоцене. Также источником ртути выступают атмосферные осадки. Увеличение поступления ртути из атмосферы связано с глобальным увеличением поступления ртути в окружающую среду, вызванное индустриальной деятельностью человека (Beal et al., 2015).

Еще одним объяснением тесной связи Fe и Mn может служить механизм, по которому формируются рудные Fe-Mn корки (слои). Такие образования формируются по классической схеме, упоминаемой в литературе как «ловушка марганца» (Юдович и Кетрис, 2014). В постседиментационных процессах органическое вещество восстанавливает Fe и Mn. В результате этого процесса образуются растворимые ионы этих металлов в форме 2+. Данные ионы попадают в поровую воду, а затем мигрируют вверх по разрезу к ранее образованному окисленному слою, в котором свободный O_2 еще не израсходован на окисление органического вещества. Здесь ионы окисляются, переходя в нерастворимые формы, и образуют слои с повышенными концентрациями Fe и Mn. По всей видимости, в момент восстановления Fe и Mn и растворения их гидроксидов, Hg также уходит в поровые растворы. Ртуть мигрирует вверх по разрезу совместно с Fe и Mn, где повторно сорбируется новообразованными гидроксидами Fe-Mn (Malov et al., 2022).

ВЫВОДЫ 6 ГЛАВЫ

Общее содержание ртути в воде Онежского озера в среднем составляет 0,32± 0,07мкг/л. Минимальные значения получены для водных проб Повенецкого залива – 0,022 мкг/л. Максимальные значения характерны для водных проб, отобранных в Южном Онего (0,852 мкг/л) и Большом Онего (0,552 мкг/л). Данные величины превышают допустимые концентрации (0,5 мкг/л) (СанПиН 2.1.4.1074 – 01).

Преобладающей формой нахождения ртути является растворенная+коллоидная, за исключением Кондопожской губы и Повенецкого залива, где наблюдается повышенная антропогенная деятельность.

Увеличение содержания ртути в донных отложениях вверх по разрезу в среднем от 0,041 ± 0,001 мкг/г до 0,067 ± 0,003 обусловлено антропогенным загрязнением и миграцией Hg и ее переотложением на геохимическом барьере совместно с Fe и Mn.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе минералогических и геохимических исследований можно дать следующую оценку процессу литогенеза в Онежском озере.

1) Скорость седиментации варьирует как по акватории Онежского озера, так и в пределах одного района: Большое Онего – 0,05 см/год, Малое Онего – 0,14 см/год, Лижемская губа – 0,07 см/год; Южное Онего – 0,09 см/год; Центральное Онего – 0,03 см/год, Уницкая губа – 0,11 см/год.

2) Состав осадочного вещества, поступающего в Онежское озеро, достигает донный осадок без существенных изменений и представлен минералами терригенной фракции, биогенной составляющей, а также частицами антропогенного происхождения.

3) Состав терригенной составляющей вещества, поступающего в Онежское озеро, отражает состав горных пород площади его водосбора в целом и каждого залива в частности. Это подтверждается геохимическим и минералогическим составами. Донные отложения преимущественно состоят из кварца, полевых шпатов и мусковита вне зависимости от части Онежского озера. Темноцветными минералами являются эпидот, биотит, пироксены (в основном диопсид) и амфиболы (чаще всего актинолит, иногда роговая обманка), в меньших количествах встречаются акцессорные минералы – рутил, апатит, доломит ильменит, магнетит, титанит, циркон, монацит и гематит. Для разных районов озера характерен свой набор темноцветных и акцессорных минералов, что объясняется различиями в локальном геологическом строении водосборной территории.

4) Донные отложения имеют более схожий минеральный состав в разных районах Онежского озера, в отличие от взвешенного вещества Онежского озера и

тем более материала рек, что указывает на гомогенизацию осадка по всей акватории в процессе осаждения.

5) В верхней части голоценовых отложений наблюдается перераспределение ряда элементов (Fe, Mn, Ba, P, Cd, Ni, Zn, Mo и Hg) в условиях окислительно-восстановительного диагенеза. Перераспределение ряда элементов приводит к формированию аутигенных минералов на границе окислительно-восстановительных условий: пиролюзит, бернессит, гетит разной степени кристалличности. Для отложений с восстановительными условиями диагенеза наблюдаются образования вивианита, родохрозита и сидерита. Совместно с этим установлен аутигенный генезис железистых разностей и иллита, и хлорита в донных отложениях.

6) Спектры распределения элементов для плейстоценовых и голоценовых отложений Онежского озера в целом имеют схожий характер распределения. Отличия заключаются в более высоких концентрациях Mn, Fe, Hg, P, Mo, Cd для голоценовых отложений, что объясняется увеличением поступления этих элементов, вызванным гумидизацией климата в голоцене и перераспределением этих элементов в процессе окислительно-восстановительного диагенеза.

7) Проведенные работы также позволили дополнить и подтвердить более ранние результаты по изучению содержаний концентраций ртути в компонентах экосистемы Онежского озера.

8) Общее содержание ртути в воде Онежского озера в среднем составляет 0,32± 0,07 мкг/л, что превышает допустимые концентрации ртути в воде рыбохозяйственных водоёмов (0,01 мкг/л) (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552). Стоит отметить что для Южного Онего (0,852 мкг/л) и Большого Онего (0,552 мкг/л) установлены значения, которые превышают допустимые концентрации для вод хозяйственно-питьевого и культурного водопользования (0,5 мкг/л) (СанПиН 2.1.4.1074 – 01).

9) Преобладающей формой нахождения ртути в воде является растворенная+коллоидная, за исключением Кондопожской губы и Повенецкого залива, где наблюдается повышенная антропогенная деятельность.

10) Увеличение содержания ртути в донных отложениях вверх по разрезу обусловлено антропогенным загрязнением и миграцией Hg и ее переотложением на геохимическом барьере совместно с Fe и Mn.

Список литературы

1. Алешин, М. И. Закономерности распространения, морфология и генезис покмарок в Онежском озере / М. И. Алешин, М. Ю. Токарев, С. Г. Миронюк [и др.] // Морские исследования и образование (MARESEDU-2017) : Труды VI Международной научно-практической конференции, Москва, 30 октября – 02 2017 года. – Москва: ООО "ПолиПРЕСС", 2017. – С. 262-266.
2. Андреев, А.П. Ладожское озеро / [соч.] А.П. Андреева, полк. Корпуса флотск. штурманов, начальника гидрогр. работ по исследованию Ладожского бассейна: в 2-х ч. СПб.: в тип. Морского м-ва, 1875. - Ч. 1. 263 с.
3. Арестова, Н. А. Кучеровский Формирование архейской коры древнего Водлозерского домена, Балтийский щит / Н. А. Арестова, В. П. Чекулаев, С. Б. Лобач-Жученко, Г. А. Кучеровский // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2015. – Т. 23, № 2. – С. 3.
4. Бабак В.И., Гарбар Д.И., Сим Л.А., Касаткин Ф.Г. Тектонические условия и тенденции развития Онежского озера // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1979. № 2. С. 44–51.
5. Белкина Н.А. Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера / Н. А. Белкина, Д. А. Субетто, Н. А. Ефременко, Н. В. Кулик // Наука и образование. – 2016. – № 3(83). – С. 135-139.
6. Белкина, Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах / Н. А. Белкина // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 4. – С. 35-41.
7. Беляев, П. Ю. Рельеф дна и строение поздневалдайских-голоценовых отложений котловин Ладожского и Онежского озёр: диссертация ... кандидата географических наук: 1.6.14. / Беляев Павел Юрьевич; [Место защиты: Институт географии Российской академии наук]. — Санкт-Петербург, 2021. — 115 с.
8. Биоресурсы Онежского озера : Bioresources of Lake Onego / А. А. Лукин, Д. Э. Ивантер, Ю. Н. Лукина [и др.] ; Карельский научный центр РАН, Институт водных проблем Севера, Северный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства ПетрГУ. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2008. – 272 с.
9. Бискэ Г.С., Лак Г.Ц., Лукашов А.Д., Горюнова Н.Н., Ильин В.А. Строение и история котловины Онежского озера : монография / Институт геологии КФ АН СССР. — Петрозаводск : Карелия, 1971. — 74 с.
10. Бобров В.А., Гофман А.М. Лабораторный гамма-спектрометрический анализ естественных радиоактивных элементов (методические разработки) —Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1971. — 67 с.
11. Васильева Е. П., Фрейндлинг В. А. Формирование химического состава донных отложений больших заливов Онежского озера //Проблемы исследования крупных озер СССР. Л. – 1985. – Т. 195. – С. 139-142.
12. Вулканизм архейских зеленокаменных поясов Карелии / [Рыбаков С.И., Светова А.И., Куликов В.С. и др.; Отв. ред. В.А. Соколов]. — Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1981. — 152 с.

13. Геологическое наследие Карелии. Путеводитель историко-геологических экскурсий по городу Петрозаводску и Центральной Карелии / Под ред. Л. В. Кулешевич. С. А. Светова. — Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2021. — 207 с.
14. Геология Карелии / [В.А. Соколов, М.М. Стенарь, А.С. Гришин и др.]; Отв. ред. В.А. Соколов, АН СССР, Карел. фил., Ин-т геологии. — Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1987. — 230 с.
15. Демидов И. Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменениях его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье //Геология и полезные ископаемые Карелии. – 2006. – №. 9. – С. 171-182.
16. Добровольский, В. В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами / В. В. Добровольский // Почвоведение. — 1999. — Т. 5. — С. 639-645..
17. Доманицкий, А. П. Реки и озера Советского Союза [Текст] : (Справочные данные) / А. П. Доманицкий, Р. Г. Дубровина, А. И. Исаева ; Под ред. д-ра геогр. наук, проф. А. А. Соколова ; Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Гос. гидрол. ин-т. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1971. — 104 с
18. Дриженко Ф. К. Гидрографическое описание Онежского озера //Известия ИРГО. – 1895. – Т. 31. – С. 603.
19. Дриц, В. А. Глинистые минералы: слюды, хлориты / В. А. Дриц, А. Г. Коссовская. — Москва : Наука, 1991. — 174 с.
20. Заварзина, Г.Д. Биогеохимические факторы преобразования соединений железа в восстановительной обстановке : диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук : 25.00.09. - Москва, 2001. - 135 с.
21. Иванова М. Б. Продукция популяций планктонных животных в пресных водах СССР //Экология. – 1973. – Т. 3. – №. 1. – С. 52.
22. Игнатов, Е. И. Связь геологического строения побережья, истории развития рельефа и динамики берегов Онежского озера / Е. И. Игнатов, Е. В. Борщенко, А. Л. Загоскин [и др.] // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2017. – № 3. – С. 65-78.
23. Игнатьева, Н. В. Оценка загрязненности поверхностных вод на территории водосборного бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям / Н. В. Игнатьева, Т. Н. Петрова, М. А. Гусева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 6. – С. 91-96.
24. Калинкина, Н. М. Динамика состояния бентосных сообществ и химического состава донных отложений Онежского озера в условиях действия антропогенных и природных факторов / Н. М. Калинкина, Н. А. Белкина // Принципы экологии. – 2018. – № 2(27). – С. 56-74..
25. Калинкина, Н. М. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения / Н. М. Калинкина, Е. В. Теканова, М. Т. Сярки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2017. – № 1. – С. 4-18.
26. Квасов Д. Д., Амантов А. В. Происхождение котловины Онежского озера //Палеолимнология Онежского озера. Л. – 1976. – С. 7-40.
27. Колодяжный, С. Ю. Структурно-кинематическая эволюция юго-восточной части Балтийского щита в палеопротерозое / С. Ю. Колодяжный ; С. Ю. Колодяжный. – Москва : ГЕОС, 2006.
28. Костин В. А. Гранитоиды и метасоматиты Водлозерского блока (юго-восточная Карелия) / В. А. Костин. — Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1989. — 165 с.
29. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных

воздействиях / Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, А. В. Литвиненко [и др.]. – Петрозаводск : Карельский научный центр Российской академии наук, 2015. – 375 с.
30. Куликов В. С. Геологическая карта юго-восточной Фенноскандии масштаба 1 : 750 000: новые подходы к составлению / В. С. Куликов. С. А. Светов. А. И. Слабунов [и др.] // Труды Карельского научного центра РАН. серия Геология докембрия. — 2017. — № 2. — С. 3–41.
31. Куликова, Т. П. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера / Т. П. Куликова, Н. Б. Кустовлянкина, М. Т. Сярки. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 1997. – 111 с.
32. Лавров М. М. Геология и петрология Бураковского расслоенного интрузива / М. М. Лавров. Н. Н. Трофимов. А. И. Голубев [и др.] // Отечественная геология. — 2004. — № 2. — С. 23–30.
33. Лисицын, А. П. Ледовая седиментация в Мировом океане / А. П. Лисицын ; Российская Академия Наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – Москва : Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 1994. – 448 с.
34. Литвиненко, А. В. Хозяйственное использование водных ресурсов в прибрежной зоне Онежского озера: современное состояние и динамика / А. В. Литвиненко, М. С. Богданова, И. А. Литвинова // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2016. – № 9. – С. 27-32.
35. Лифшиц В. Х. Исследования экосистемы Онежского озера / [Науч. ред. В. Х. Лифшиц]. — Петрозаводск : Карел. фил. АН СССР, 1981. — 74 с.
36. Логвиненко Н. В., Орлова Л. В. Образование и изменение осадочных породтна континенте и в океане —Л.: Недра, 1987.— 237 с.
37. Лубнина Н. В. Карельский кратон в структуре неоархейского суперконтинента Кенорленд: новые палеомагнитные и изотопно-геохронологические данные по гранулитам Онежского комплекса / Н. В. Лубнина. А. И. Слабунов // Вестник Московского университета. серия Геология. — 2017. — № 5. — С. 3–15.
38. Макарихин, В. В. Геологические памятники природы Карелии / В. В. Макарихин, П. В. Медведев, Д. В. Рычанчик. – Петрозаводск : Институт геологии Карельского НЦ РАН, 2006. – 192 с.
39. Малов В.И., Латеральные различия в минеральном и геохимическом составе донных отложений Онежского озера / В. И. Малов [и др.] // Геология морей и океанов : Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 13-17 нояб. 2023. — Москва : ИО РАН, 2023.
40. Маслов, А. В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных : учеб. пособие по разделам дисциплин "Литология" и "Лаборатор. методы изучения полез. ископаемых" для студентов спец. 080100 - "Геол. съемка, поиски и разведка месторождений полез. ископаемых" / А. В. Маслов ; А.В. Маслов ; Федер. агентство по образованию ГОУ ВПО "Ур. гос. горн. ун-т", Ин-т геологии и геохимии УрО РАН. – Екатерибург : Изд-во Ур. гос. горн. ун-та, 2005. – 289 с.
41. Михальчук, А. А. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Часть I. Математические основы : Учебное пособие / А. А. Михальчук, Е. Г. Язиков. – Томск : Томский политехнический университет, 2014. – 102 с.
42. М-МВИ-80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв. грунтов и донных отложениях методами атомноэмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии.
43. Моисеенко, Т. И. Биогеохимия кадмия: антропогенное рассеивание, биоаккумуляция и экотоксичность / Т. И. Моисеенко, Н. А. Гашкина // Геохимия. – 2018. – № 8. – С. 759-773

44. Молчанов, И. В. Онежское озеро / И. В. Молчанов, В. Н. Былинкиной, З. А. Викулиной и Т. А. Горшуновой ; Под ред. д-ра техн. наук, проф. С. И. Руденко ; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Сов. министров СССР. Гос. ордена Труд. красного знамени гидрол. ин-т. - Ленинград : Гидрометеорол. изд-во, 1946. - 207 с
45. Морозов А. Ф. Толща каменных солей в разрезе палеопротерозоя Онежского прогиба Карелии (по данным Онежской параметрической скважины) / А. Ф. Морозов. Б. Н. Хахаев. О. В. Петров [и др.] // Доклады Академии Наук. — 2010. — Т. 435. № 2. — С. 230–233.
46. Новигатский, А. Н. Вертикальные потоки осадочного вещества и современные скорости осадконакопления в Белом море / А. Н. Новигатский, А. А. Клювиткин, М. Д. Кравчишина [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2022. – Т. 86, № 6. – С. 1023-1034.
47. Озера Карелии : Справочник / П. А. Лозовик, А. А. Лукин, Н. А. Белкина [и др.]. – Петрозаводск : Карельский научный центр Российской академии наук, 2013. – 302 с.
48. Озерецковский Н. Я. Путешествие по озерам. Ладожскому и Онежскому. – Рипол Классик. 1792.
49. Онежская палеопротерозойская структура (геология. тектоника. глубинное строение и минерагения) /Глушанин Л.В., Горбачев В.И., Крупеник В.А.–Петрозаводск: КарНЦ РАН. – 2011.
50. Онежское озеро. Экологические проблемы / под ред. Н.Н. Филатова // Петрозаводск: КарНЦ РАН. – 1999. – 293 с.
51. Онежское озеро: атлас / ВОО Русское географическое о-во, Отд-ние РГО в Республике Карелия, Учреждение Российской акад. наук Ин-т водных проблем Севера Карельского науч. центра РАН ; редкол.: отв. ред. Н. Н. Филатов и др. - Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2010. - 149с.
52. ОСТ 41-08-205-99 . Стандарт отрасли. Управление качеством аналитическихработ. Методики количественного химического анализа. Разработка. аттестация. утверждение. М.. 1999. 96 С.
53. Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям / Д. А. Субетто., Н. А. Белкина, В. Д. Страховенко, …, В.И. Малов, и др.; ответственный редактор Д. А. Субетто; Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. – 320 с.
54. Пирожкова Г. П. Источники формирования химического состава воды Кондопожской губы Онежского озера //Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Петрозаводск: Карельский Филиал АН СССР. – 1985. – С. 47-63.
55. Поляков Ю. К. Донные отложения//Кондопожская губа Онежского озера в связи с ее загрязнением промстоками ЦБК. – 1973.
56. Поляков Ю. К., Родькина И. С. Донные отложения Петрозаводской губы Онежского озера //Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск: Изд-во Карельск. Фил. АН СССР. – 1981. – Т. 264. – С. 6.
57. Помазовский А. Л., Зайцев И. В., Лифшиц В. Х., Короткевич О. Е. Гидрооптическая характеристика динамики вод г. Шуи в петрозаводской губе //Петрозаводская губа Онежского озера: гидрология, гидрохимия. – 1981. – С. 57.
58. Ранний докембрий Балтийского щита / В. Ф. Смолькин ; Российская академия наук, Институт геологии и геохронологии докембрия. – Санкт-Петербург : Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука", 2005. – 711 с.
59. Ромашкин, А. Е. Геохимия редкоземельных элементов углеродсодержащих пород заонежской свиты Онежской структуры / А. Е. Ромашкин, Д. В. Рычанчик, А. И. Голубев // Геология и полезные ископаемые Карелии : Научное издание / Карельский

научный центр Российской академии наук, Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2011. – С. 163-176.
60. Ронов А.Б.. Мигдисов А.А. Количественные закономерности строения и состава осадочных толщ Восточно Европейской платформы и Русской плиты и их место в ряду древних платформ мира // Литология и полез. Ископаемые. 1996. № 5. с. 451—475.
61. Россолимо Л.Л. Основы типизации озер и лимнологического районирования //Л.Л. Россолимо // Накопление вещества в озерах. – М.: Наука., –1964. –С. 5-46.
62. Румянцев В. Б. Гидрооптическая характеристика водного тела Онежского озера //В сб.: Динамика и водные массы Онежского озера, Л. – 1972.
63. Сабылина А. В. Химический состав воды Онежского озера и его притоков / А. В. Сабылина, П. А. Лозовик, М. Б. Зобков // Водные ресурсы. — 2010. — Т. 37, № 6. — С. 717–729.
64. Санин, А. Ю. Оценка влияния природных процессов на содержание тяжелых металлов в воде Онежского озера / А. Ю. Санин, А. А. Строков, П. Н. Терский // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 146-171.
65. СанПин 2.1. 4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества //М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. – 2002.
66. Светов, С. А. Древнейшие адакиты Фенноскандинавского щита / С. А. Светов ; С. А. Светов ; Карельский науч. центр Российской акад наук, Ин-т геологии, Петрозаводский гос. ун-т, Каф. геологии и геофизики. – Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2009.
67. Семенович Н.И. Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука. 1973. 104 с.
68. Система Белого моря / Российская академия наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Том 3. – Москва : ООО "НАУЧНЫЙ МИР", 2013. – 690 с.
69. Система Белого моря / Российская академия наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Том 4. – Москва : ООО "НАУЧНЫЙ МИР", 2017. – 1030 с.
70. Слабунов А. И. Архей Балтийского щита: геология. геохронология. геодинамические обстановки / А. И. Слабунов. С. Б. Лобач-Жученко. Е. В. Бибикова [и др.] // Геотектоника. — 2006. — № 6. — С. 3–32.
71. Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита) / А. И. Слабунов. — Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2008. — 296 с.
72. Слабунов А. И. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов / А. И. Слабунов. В. В. Балаганский. А. А. Щипанский // Геология и геофизика. — 2021. — Т. 62. № 5. — С. 648–675.
73. Слабунов А. И. Новая тектоническая карта Карелии: принципы построения и их реализация / А. И. Слабунов. С. А. Светов. А. В. Степанова [и др.] // Труды Карельского научного центра РАН. — 2022. — № 5. — С. 132–138.
74. Слабунов А. И. Раннедокембрийский гранулитовый метаморфизм и основной магматизм Карельского кратона. Путеводитель экскурсии / А. И. Слабунов. А. В. Степанова. В. С. Куликов [и др.] / Путеводитель геологических экскурсий XII Всероссийского петрографического совещания. Петрография магматических и метаморфических горных пород / Российская академия наук. Отделение наук о Земле РАН. Межведомственный петрографический комитет. Институт геологии КарНЦ РАН. Региональный петрографический совет по Северо-Западу России. РФФИ ; Ред. кол.: А. И. Голубев. С. А. Светов. А. И. Слабунов [и др.]. — Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2015. — С. 5–27.
75. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза / Н.М. Страхов. – М.: Изд-во АН СССР. 1960; 1962. – Т.1;2;3. – 212 с.; 574 с.; 550 с.

76. Страховенко В.Д. Естественные радионуклиды и радиоцезий в взвеси и донных отложениях Онежского озера // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : Материалы VI Международной конференции. В 2-х томах, Томск, 20–24 сентября 2021 года. Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – 671 с.
77. Страховенко, В. Д. Первые данные по минералогии и геохимии взвеси Онежского озера / В. Д. Страховенко, Н. А. Белкина, Н. А. Ефременко [и др.] // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63, № 1. – С. 68-86.
78. Субетто, Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции / Д. А. Субетто ; Российская акад. наук, Институт озероведения [и др.]. – Санкт-Петербург : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. – 343 с.
79. Субетто, Д.А. Развитие Онежского озера в позднем плейстоцене / Д. А. Субетто, М. С. Потахин, М. Б. Зобков [и др.] // Всероссийская конференция по крупным внутренним водоемам : Сборник научных трудов конференции (V Ладожский симпозиум), Санкт-Петербург, 09–11 ноября 2016 года. – Санкт-Петербург: Издательство "Лема", 2016. – С. 383-390.
80. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция / С. Р. Тейлор, С. М. Мак-Леннан ; пер. с англ. Р. Н. Соболева, Л. Т. Соболевой ; под. ред. Л. С. Бородина. - Москва : Мир, 1988. - 383 с
81. Трофимов, Н. Н. Пудожгорское благороднометалльное титаномагнетитовое месторождение / Н. Н. Трофимов, А. И. Голубев ; Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук. – Петрозаводск : Карельский научный центр РА, 2008. – 120 с.
82. Ушков В. В. Кимозерское проявление алмазоносных кимберлитов в Онежской структуре / В. В. Ушков // Геология и полезные ископаемые Карелии. — 2001. — Вып. 3.– С. 94–98.
83. Федоров, Ю. А. Распределение ртути в донных отложениях Белого моря / Ю. А. Федоров, А. Э. Овсепян, В. А. Савицкий // Живые и биокосные системы. – 2013. – № 2. – С. 8.
84. Филиппов, М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры / М. М. Филиппов. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2002. – 282 с.
85. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов / А. Б. Ронов, А. А. Ярошевский, А. А. Мигдисов; Отв. ред. Э. М. Галимов; АН СССР, Ин-т геохимии и аналит. химии им. В. И. Вернадского. - Москва : Наука, 1990. - 182 с.
86. Чекрыжева, Т. А. Таксономическая и экологическая характеристика фитопланктона Онежского озера / Т. А. Чекрыжева // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2012. – № 1. – С. 56-69.
87. Чекулаев, В. П. Архейские метатерригенные породы Карельской провинции: геологическое положение, геохимия, источники сноса / В. П. Чекулаев, Н. А. Арестова // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2020. – Т. 28, № 4. – С. 3-25.
88. Шевченко, В. П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике / В. П. Шевченко. – Москва : «Наука», 2006. – 226 с.
89. Шелехова, Т. С. Палеоэкологические условия развития Северо-западного Прионежья в позднеледниковье и голоцене / Т. С. Шелехова, О. В. Лазарева, И. Н. Демидов // Геология и полезные ископаемые Карелии : Научное издание / Карельский научный центр РАН, Институт геологии Карельского научного центра РАН. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2005. – С. 149-157.
90. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Т. В. Ефремова, Н. В. Альтшуллер, Т. Е. Гершензон и др.; Под ред. З. С. Кауфмана; АН СССР, Карел. фил., Отд. вод. пробл. - Ленинград : Наука : Ленингр. отд-ние, 1990. - 264 с.
91. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). – Directmedia, 2016.

92. Юдович, Я. Э. Геохимия марганца / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис ; Российская акад. наук, Уральское отд-ние, Коми науч. центр, Ин-т геологии. - Сыктывкар : Геопринт, 2014. - 537с.
93. Юдович, Я. Э. Основы литохимии / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Санкт-Петербург : Наука, 2000. – 479 с.
94. Ядерные испытания СССР. Полигон «Новая Земля»: обеспечение общей и радиационной безопасности ядерных испытаний. Факты, свидетельства, воспоминания / Кол. Авторов – М.: ИздАТ, 2000. 487 с.
95. Ярошевский, А. А. Проблемы современной геохимии : конспект лекций, прочит. в ГЕОХИ РАН в зим. семестре 2003-2004 гг. / А. А. Ярошевский ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Новосиб. гос. ун-т, Моск. гос. ун-т. – Новосибирск : НГУ, 2004. – 194 с.
96. Amos, H. M. Legacy impacts of all-time anthropogenic emissions on the global mercury cycle/ Amos. H. M., Jacob. D. J., Streets. D. G., Sunderland. E. M. //Global biogeochemical cycles. – 2013. – Т. 27. – №. 2. – С. 410-421.
97. Amos. H. M. Observational and Modeling Constraints on Global Anthropogenic Enrichment of Mercury / H. M. Amos [et al.] // Environmental Science & Technology. — 2015. — Vol. 49, iss. 7. — P. 4036-4047
98. Bailey S. W. Report of the Clay Minerals Society Nomenclature Committee for 1982 and 1983 / S. W. Bailey. G. W. Brindley. D. S. Fanning // Clays and Clay Minerals. — 1984. — Vol. 32. — Pp. 239–240.
99. Beal S. A. Ice Core Perspective on Mercury Pollution during the Past 600 Years / S. A. Beal [et al.] // Environmental Science & Technology. — 2015. — Vol. 49, iss. 13. — P. 7641-7647.
100. Borodulina, G. Isotope Composition of Natural Water in Lake Onega Basin / G. Borodulina, I. Tokarev, E. Yakovlev // Water. — 2023. — Vol. 15, iss. 10. — P. 1855.
101. Brown, A. L. Freshwater Ecology / A. L. Brown. — London : Heinemann Educational Publishers, 1987.
102. Clarkson, T. W. The three modern faces of mercury/ T. W. Clarkson //Environmental health perspectives. – 2002. – Vol. 110. – №. suppl 1. – P. 11-23.
103. Davis, J. C. Statistics and data analysis in geology / J. C. Davis. — New York : Wiley, 1973.
104. De Geer, G. Quaternary Sen-bottoms in Western Sweden / G. De Geer //Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar. – 1910. – Vol. 32. –iss. 5. – P. 1139-1195.
105. Driscoll, C. T. Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects / C. T. Driscoll [et al.] // Environmental Science & Technology. — 2013. — Vol. 47, iss. 10. — P. 4967-4983.
106. Durham, R. W. Recent sedimentation rates, 210Pb fluxes, and particle settling velocities in Lake Huron, Laurentian Great Lakes / R. W. Durham, S. R. Joshi // Chemical Geology. — 1980. — Vol. 31. — P. 53-66.
107. Efremova T. A. Seasonal and spatial variation in hydrochemical parameters of Lake Onego (Russia): insights from 2016 field monitoring / T. A. Efremova, A. V. Sabylina, P. A. Lozovik [et al.] // Inland Waters. – 2019. – Vol. 9, No. 2. – P. 227-238.
108. Hang. T. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia / T. Hang, V. Gurbich, D. Subetto, V. Strakhovenko, M. Potakhin, N. Belkina, M. Zobkov // Quaternary International. — 2019. — Vol. 524. — P. 13-23.
109. Hölttä P. Paleoarchean rocks in the Fennoscandian Shield (Chapter 32) / P. Hölttä. E. Heilimo. H. Huhma [et al.] // Earth's Oldest Rocks. Second Edition / Eds.: M. J. van Kranendonk. V. C. Bennett. J. E. Hoffmann. — Elsevier. 2019. — Pp. 819–836.
110. Hölttä P. The Archaean Karelia and Belomorian Provinces. Fennoscandian Shield / P. Hölttä. E. Heilimo. H. Huhma [et al.] // Evolution of Archean Crust and Early Life / Y. Dilek.

H. Furnes (Eds.) // Modern Approaches in SolidEarth Sciences. — Springer. 2014. — Vol. 7. — Pp. 55–102.
111. Horowitz, H. M. Historical Mercury Releases from Commercial Products: Global Environmental Implications / H. M. Horowitz, D. J. Jacob, H. M. Amos, [et al.] // Environmental Science & Technology. — 2014. — Vol. 48, iss. 17. — P. 10242-10250.
112. Hsu-Kim, H. Mechanisms Regulating Mercury Bioavailability for Methylating Microorganisms in the Aquatic Environment: A Critical Review / H. Hsu-Kim, K. H. Kucharzyk, T. Zhang, M. A. Deshusses. / Environmental Science & Technology. — 2013. — Vol. 47, iss. 6. — P. 2441-2456.
113. Hylander, L. D. The Rise and Fall of Mercury: Converting a Resource to Refuse After 500 Years of Mining and Pollution / L. D. Hylander, M. Meili // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. — 2005. — Vol. 35, iss. 1. — P. 1-36.
114. Kalm, V. Ice-flow pattern and extent of the last Scandinavian Ice Sheet southeast of the Baltic Sea / V. Kalm // Quaternary Science Reviews. — 2012. — Vol. 44. — P. 51–59.
115. Kocman, D. Toward an Assessment of the Global Inventory of Present-Day Mercury Releases to Freshwater Environments / D. Kocman, S. Wilson, H. Amos [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2017. — Vol. 14, iss. 2. — P. 138.
116. Kulik, N. Fe, Mn, Al, Cu, Zn, and Cr in the sedimentary matter of Lake Onego / N. Kulik, N. Efremenko, N. Belkina [et al.] // Quaternary International. — 2023. — Vol. 644-645. — P. 134-144.
117. Kulikov, V. S. The Vetreny Poyas (Vetreny Belt) A essential component of the ca. 2.5–2.4 Ga Sumian large igneous province / V. S. Kulikov. Ya. V. Bychkova. V. V. Kulikova [et al.] // Precambrian Research. — 2010. — Vol. 183. — P. 589–601.
118. Lamborg, C. H A global ocean inventory of anthropogenic mercury based on water column measurements / C. H. Lamborg, C. R. Hammerschmidt, K. L. Bowman [et al.]// Nature. — 2014. — Vol. 512, iss. 7512. — P. 65-68.
119. Louis St. V., Graydon J., Mitchell C., Oswald C. Mercury fate and methylation in terrestrial upland and wetland environments In Canada / Louis St. V., Graydon J., Mitchell C., Oswald C. // Mercury Science Assessment. 2016.
120. Lukashin. V. N. The MSL-110 small sediment trap / V. N. Lukashin, A. A. Klyuvitkin, A. P. Lisitzin, A. N. Novigatsky // Oceanology. — 2011. — Vol. 51, iss. 4. — P. 699-703.
121. Malov, V. I. Vivianite in bottom sediments of Lake Onego / V. I. Malov, V. D. Strakhovenko, E. A. Ovdina // X International Siberian Early Career GeoScientists Conference : Proceedings of the Conference, Novosibirsk, 13–17 июня 2022 года. – Novosibirsk State University: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2022. – P. 29-30.
122. Melezhik V. A. The Onega Basin / V. A. Melezhik. P. V. Medvedev. S. A. Svetov // Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia Drilling Early Earth Project. Part IV. Geology of the Drilling Sites / V. A. Melezhik. A. R. Prave. A. E. Fallick [et al.]. — Springer. 2013. — P. 387–490.
123. Melton, E. D. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle / E. D. Melton, E. D. Swanner, S. Behrens [et al.] // Nature Reviews Microbiology. — 2014. — Vol. 12, iss. 12. — P. 797-808.
124. Mergler, D. Methylmercury Exposure and Health Effects in Humans: A Worldwide Concern / D. Mergler, H. A. Anderson, L. H. Chan [et al.]// AMBIO: A Journal of the Human Environment. — 2007. — Vol. 36, iss. 1. — P. 3-11.
125. Nelson, Y. M. Effect of Oxide Formation Mechanisms on Lead Adsorption by Biogenic Manganese (Hydr)oxides, Iron (Hydr)oxides, and Their Mixtures / Y. M. Nelson, L. W. Lion, M. L. Shuler, W. C. Ghiorse.// Environmental Science & Technology. — 2002. — Vol. 36, iss. 3. — P. 421-425.

126. Nesbitt, H. W. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites / H. W. Nesbitt, G. M. Young // Nature. — 1982. — Vol. 299, iss. 5885. — P. 715-717.
127. Nriagu, J. O. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals / J. O. Nriagu, J. M. Pacyna // Nature. — 1988. — Vol. 333, iss. 6169. — P. 134-139.
128. Obrist, D. A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use/ D. Obrist, J. L. Kirk, L. Zhang [et al.]// Ambio. — 2018. — Vol. 47, iss. 2. — P. 116-140.
129. Prave, A. R. The grandest of them all: the Lomagundi-Jatuli Event and Earth's oxygenation / A. R. Prave. K. Kirsimäe. A. Lepland [et al.] // Journal of the Geological Society. — 2022. — Vol. 179. Issue 1.
130. Raj, D. Sources, toxicity, and remediation of mercury: an essence review / D. Raj, S. K. Maiti // Environmental Monitoring and Assessment. — 2019. — Vol. 191, iss. 9.–P. 1-22.
131. Robbins, J. A. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137 / J. A. Robbins, D. N. Edgington // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1975. — Vol. 39, iss. 3. — P. 285-304.
132. Rothe, M. The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments / M. Rothe, A. Kleeberg, M. Hupfer // Earth-Science Reviews. — 2016. — Vol. 158. — P. 51-64.
133. Saarnisto, M. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselkä End Moraines / M. Saarnisto, T. Saarinen // Global and Planetary Change. — 2001. — Vol. 31, iss. 1-4. — P. 387-405.
134. Saarnisto, M. Lateglacial of Lake Onega — Contribution to the history of the eastern Baltic basin / M. Saarnisto, T. Grönlund, I. Ekman // Quaternary International. — 1995. — Vol. 27. — P. 111-120.
135. Selin, N. E. Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review / N. E. Selin // Annual Review of Environment and Resources. — 2009. — Vol. 34, iss. 1. — P. 43-63.
136. Strakhovenko, V. Distribution of rare earth elements and yttrium in water, suspended matter and bottom sediments in Lake Onego: Evidence of the watershed transformation in the Late Pleistocene / V. Strakhovenko, E. Ovdina, N. Belkina [et al.] // Quaternary International. – 2023. – Vol. 644-645. – P. 120-133.
137. Strakhovenko, V. Mineral and geochemical composition of the onega ice lake sediments / V. Strakhovenko, E. Ovdina, I. Danilenko [et al.] // Baltica. – 2018. – Vol. 31, No. 2. – P. 165-172..
138. Strakhovenko, V.D. Distribution of elements in iron-manganese formations in bottom sediments of lake onego (NW Russia) and small lakes (shotozero and surgubskoe) of adjacent territories / V. Strakhovenko, E. Ovdina, D. Subetto [et al.] // Minerals. – 2020б. – Vol. 10, No. 5. – P. 440.
139. Strakhovenko, V.D. Mineralogical and geochemical composition of Late Holocene bottom sediments of Lake Onego / V. Strakhovenko, E. Ovdina, I. Danilenko [et al.] // Journal of Great Lakes Research. – 2020a. – Vol. 46, No. 3. – P. 443-455.
140. Strakhovenko, V.D. The First Data on the Mineralogy and Geochemistry of the Suspension of Lake Onego / V. D. Strakhovenko, E. A. Ovdina, N. A. Belkina [et al.] // Russian Geology and Geophysics. – 2022. – Vol. 63, No. 1. – P. 55-71.
141. Streets D. G., Total Mercury Released to the Environment by Human Activities / D. G. Streets, H. M. Horowitz, D. J. Jacob [et al.] // Environmental Science & Technology. — 2017. — Vol. 51, iss. 11. — P. 5969-5977.
142. Streets, D. G. All-Time Releases of Mercury to the Atmosphere from Human Activities / D. G. Streets, M. K. Devane, Z. Lu [et al.]// Environmental Science & Technology. — 2011. — Vol. 45, iss. 24. — P. 10485-10491.

143. Subetto, D. Structure of late pleistocene and holocene sediments in the Petrozavodsk bay, lake Onego (NW Russia) / D. Subetto, V. Kuznetzov, Y. Kublitskiy [et al.] // Minerals. – 2020. – Vol. 10, No. 11. – P. 1-20.
144. Subetto, D.A. Paleolimnological studies in Russian northern Eurasia: A review / D. A. Subetto, L. S. Syrykh, I. M. Grekov [et al.] // Contemporary Problems of Ecology. – 2017. – Vol. 10, No. 4. – P. 327-335.
145. Svetov S. A. Geochemistry and texture of clinopyroxene phenocrysts from Paleoproterozoic picrobasalts. Karelian Craton. Fennoscandian Shield: records of magma mixing processes / S. A. Svetov. S. Yu. Chazhengina. A. V. Stepanova // Minerals. — 2020. — Vol. 10(5). No. 434. — P. 1–20.
146. Warr, L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols / L. N. Warr // Mineralogical Magazine. — 2021. — P. 1-30.
147. Wetzel, R. G. Limnology / R. G. Wetzel. — London : Elsevier Science & Technology Books, 2001.
148. Zhang, Y. Natural biogeochemical cycle of mercury in a global three-dimensional ocean tracer model / Y. Zhang, L. Jaeglé, L. Thompson // Global Biogeochemical Cycles. — 2014. — Vol. 28, iss. 5. — P. 553-570.
149. Zobkov, M., Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations / M. Zobkov, M. Potakhin, D. Subetto, A. Tarasov // Journal of Paleolimnology. – 2019. – Vol. 62, No. 1. – P. 53-71.