

Санкт-Петербургский государственный университет

МОИСЕЕНКО Алина Дмитриевна

Выпускная квалификационная работа

Эволюция озера Витальевское Валаамского архипелага в контексте изменений уровня Ладожского озера в голоцене (по данным диатомового анализа)

Направление 05.03.02 “География”

Основная образовательная программа СВ.5019.2016 “География”

Профиль “Геоморфология и палеогеография”

Научный руководитель:

доцент кафедры геоморфологии Института Наук о Земле,
к.г.н., Савельева Л. А.

Консультант:

старший научный сотрудник Института озёроведения РАН,
к.г.н., Лудикова А. В.

Рецензент:

научный сотрудник Института озёроведения РАН,
к.г.н., Кузнецов Д. Д.

Санкт-Петербург

2020

Содержание

Введение	2
Глава 1. Физико-географическая характеристика района.....	5
1.1 Геология и четвертичные отложения	5
1.2 Геоморфологическое описание	6
1.3 Климатические условия	7
1.4 Почвенный покров	8
1.5 Растительность	9
1.6 Характеристика объекта исследования.....	10
Глава 2. История исследований.....	12
Глава 3. Материалы и методы	15
3.1 Полевой этап.....	15
3.2 Камеральный этап	17
3.2.1 Пробоподготовка	17
3.2.2 Изучение под микроскопом	18
3.2.3 Аналитическая обработка данных	19
Глава 4. Результаты.....	21
4.1 Состав диатомовых комплексов	21
4.2 Реконструкция значений рН.....	26
Глава 5. Обсуждение результатов	27
Заключение	34
Список использованных материалов	36

Введение

Диатомовые водоросли – *Bacillariophyta* – микроскопические одноклеточные организмы, обитающие во всех водных системах планеты. Во многих из них они составляют важную часть фитоценоза, являясь доминирующей группой в определённый период вегетации, что способствует накоплению обширного материала для исследований.

Характерной особенностью диатомовых водорослей является наличие панциря из двух надвигающихся друг на друга створок, состоящего из аморфного кремнезёма и защищающего клеточный протопласт от внешних воздействий. Каждый панцирь имеет ряд физиологически важных структурных элементов, такие как поры, ареолы, шипики, рёбра, щели и каналы и др., которые позволяют однозначно идентифицировать особь вплоть до подвида. Кремнистые створки диатомовых водорослей хорошо сохраняются в донных отложениях.

Важным качеством диатомовых водорослей является высокая чувствительность большого количества видов к физико-химическим параметрам водной среды, таким как свет, активная реакция среды, количество питательных элементов. Для многих видов диатомовых водорослей установлены четкие экологические предпочтения. При этом они формируют специфические сообщества, позволяющие с высокой долей уверенности реконструировать палеоэкологические обстановки.

Таким образом, *Bacillariophyta* служат хорошими индикаторами изменений физико-химических параметров среды.

Использование диатомовых водорослей нашло широкое применение в решении ряде палеоэкологических и палеогеографических задач. Среди них выделяется реконструкция перемещения древней береговой линии крупных палеобассейнов, для чего надёжным и богатым источником информации служат донные отложения малых водоёмов, в прошлом входивших в состав этих бассейнов.

Традиционно метод “изоляционных бассейнов” использовался для изучения изменения уровня моря в ходе изостатических и эвстатических колебаний, однако на сегодняшний день обосновано его использование для крупных пресноводных водоёмов, одним из которых является Ладожское озеро. Данный подход основан на различии состава диатомовых комплексов, накапливавшихся в котловинах малых озёр на этапе вхождения в состав крупного бассейна и после изоляции от него. Согласно результатам предыдущих работ, озеро Витальевское, донные отложения которого являются **объектом** настоящего исследования, затоплялось водами Ладожского озера в период его среднеголоценовой трансгрессии. **Предметом** настоящего исследования являются изменения состава диатомовых комплексов озера Витальевского в результате изменений уровня Ладожского озера. **Актуальность данной работы** обусловлена необходимостью изучения эволюции малых озёр в связи с трансгрессивно-регрессивными стадиями крупных бассейнов для повышения надёжности реконструкции древней береговой линии. На внутренних водоёмах острова Валаам ранее проводились отборы колонок донных отложений, но без проведения диатомового анализа.

Основная цель данной работы – реконструкция изменения условий среды озера Витальевского в связи с изменением уровня Ладожского озера в среднем голоцене по данным диатомового анализа.

Для достижения указанной цели были **поставлены и решены следующие задачи:**

1. Отбор проб донных отложений озера Витальевского
2. Лабораторная подготовка проб для диатомового анализа
3. Микроскопическое изучение проб
4. Выявление изменений состава диатомовых комплексов и соотношения экологических групп диатомей
5. Установление основных этапов развития озера Витальевского по данным диатомового анализа

Материалом для исследования послужили колонки донных отложений, отобранных в ходе палеолимнологической экспедиции Института озероведения РАН летом 2019 г. при личном участии автора. При интерпретации полученных результатов и пользовались данные о литологическом составе донных отложений, результаты предыдущих исследований, опубликованных в сборниках, монографиях и интернет-источниках. Пробоподготовка, обработка данных и их интерпретация проводилась под руководством с.н.с. ИНОЗ РАН, к.г.н. Лудиковой А.В.

Глава 1. Физико-географическая характеристика района исследования

Озеро Витальевское располагается на острове Валаам, входящем в состав Валаамского архипелага, который расположен в северной части Ладожского озера, крупнейшего пресноводного водоёма европейской части России.

1.1. Геология и четвертичные отложения

Котловина Ладожского озера имеет сложное строение, располагаясь на месте стыка Балтийского кристаллического щита и Русской плиты. Возникновение ладожской котловины и Валаамского архипелага обусловлено тектоническими процессами рифейской эпохи. В этот период в фундаменте Восточно-Европейской платформы образовался Ладожский прогиб северо-западного простирания, и в ходе дальнейшего формирования системы разломов и внедрения по ним магматического вещества произошло образование интрузивных тел. Наиболее выраженным из них является Валаамский силл – пластовое интрузивное тело мощностью до 200 м (Свириденко, Светов, 2008), залегающее между осадочными и эффузивно-осадочными рифейскими отложениями. В течение длительной геологической истории силл был разбит тектоническими процессами на отдельные блоки, которые имели разные скорости и направления вертикальных движений. В результате этих процессов в наиболее углублённой части Ладожского озера (с глубинами до 230 м) образовался Валаамский архипелаг с высотными отметками до 60 м (Свириденко, Светов, 2008).

В то время, как северное побережье Ладоги сложено, в основном, гранитами и гранито-гнейсами, породы архипелага представлены магматическими породами щелочного состава. В частности, на острове Валаам главными распространёнными породами являются габбродолерит, феррогаббро и монцонитоиды с аплитовыми жилами (Шешукова и др, 2005), которые были подвержены постмагматической переработке. В целом, породы

острова отличаются низким содержанием кремнезёма и значительным содержанием оксидов Ca, Mg, Ti, P, а также Fe (Матинян, Урусевская, 1999).

На острове наблюдаются маломощные четвертичные отложения. В основном, они представлены супесчаными ледниковыми отложениями последнего, валдайского оледенения (осташковский горизонт), особенно распространёнными на северо-восточной и западной частях острова, и ледниково-озёрными и озёрными отложениями, которые формировались в ходе трансгрессивно-регрессивных стадий Балтийско-Ладожских палеобассейнов (Балтийского Ледникового озера и Анцилового озера) и среднеголоценовой ладожской трансгрессии. При этом в каждую последующую стадию сформировавшиеся ранее отложения подвергались размыву и переработке. Озерно-ледниковые и озерные осадки сосредоточены, в основном, в центральной части острова, где их мощность составляет до 5 м (Матинян, Урусевская, 1999). Ледниково-озёрные представлены ленточными глинами, на которых с размывом залегают озёрные пески, супеси и суглинки. Эти отложения они распространены и в ложбинах и понижениях по всему острову. Также находят распространение элювиальные, элювиально-делювиальные отложения, представленные, в основном, дресвяно-щебенистой супесью, мощностью несколько десятков сантиметров (Матинян, Урусевская, 1999), а также коллювиальные и торфяно-болотные отложения в понижениях.

1.2. Геоморфологическое описание

Валаам является частью субгоризонтально залегающего интрузивного тела, которое имеет несколько характеристик, определяющих облик острова. Во-первых, для породы, слагающей основную его массу – габбродолерита – характерно образование пластовых и столбчато-призматических отдельностей со средними размерами блоков 1,0 x 1,5 м (Свириденко, Светов, 2008). Во-вторых, в районе Валаама силл образует пологую синклиналиную складку с углом падением около 5-10 ° (Свириденко, Светов,

2008), что определяет наклон острова: в результате перекоса для северо-западного берега характерны уступы, скалы и обрывы, образование которых поддерживается легко разрушающимися отдельностями основных пород, а для юго-восточного – пологие берега. Центральная же часть острова прогибается, образуя подобие чаши. В-третьих, на протяжении длительной геологической истории тектонические процессы обусловили проявление системы трещин, преимущественно, северо-западного простирания, а также сбросы широтного направления (Кучко и др., 1988). Их постепенное развитие, а также экзарационное воздействие четвертичных оледенений обусловили сильно расчленённый рельеф Валаама, привели к формированию глубоко врезанных заливов и бухт. Кроме того, ледники изменили морфоскульптурные характеристики, образовав пологоволнистые денудационные равнины в северной и южной частях острова, местами с мелко и крупно грядовым сельговым рельефом с преимущественно плоскими вершинами, который особенно заметен западнее Монастырской бухты, в районе о. Скитский, в районе озера Сисяярви. Распространены также “бараньи лбы”, особенно на восточных и юго-восточных берегах. В остальных частях преобладают местами плоская (озёрная или моренная) или всхолмленная (моренная) аккумулятивная равнина. Из-за сильной расчленённости рельефа на острове встречается несколько небольших озёр: Сисяярви и Лещево (самые крупные), Антониевское, Зимняковское, Германово, Витальевское и т.п.

1.3. Климатические условия

Ладожское озеро расположено в северном полушарии в умеренном поясе. Влияние на формирование климатических условий данной территории оказывают и континентальные, и морские воздушные массы. В частности, перенос влажных атлантических масс способствует развитию облачности. Но из-за большой площади водного зеркала озера, Ладога сама оказывает сильное влияние на региональный климат. Остров Валаам вследствие своего

расположения очень подвержен этому влиянию. В основном, озеро оказывает сглаживающее воздействие на климатические показатели. Так, оно способствует смягчению микроклимата, уменьшая сезонные и суточные амплитуды колебания температур, увеличивая среднюю температуру самого холодного месяца (февраль, $-8,6^{\circ}$) и уменьшая температуру самого тёплого месяца (июль, $+16,7^{\circ}$) относительно южных районов Карелии (Назарова, 2014). Озеро обеспечивает высокую относительную влажность воздуха на острове около 81-83%, а также большое количество осадков (около 600 мм в год), 70% которых составляют дожди, часто имеющие ливневый характер (Матинян, Урусевская, 1999). Высокая влажность способствует образованию частных туманов. Большое количество осадков в совокупности с частой облачностью приводит к развитию промывного типа водного режима территории. Для Ладоги характерна ветреная погода; средняя скорость ветра колеблется от 4 до 8 м/с, в то же время сильные ветры со скоростями более 15 м/с являются обычными (<http://oopt.aari.ru/oopt/Валаамский-архипелаг>, дата обращения: 24.02.2020)

1.4. Почвенный покров

Особенности строения Валаама, в частности, высокая степень расчленённости рельефа и разнообразие пород, определили высокое разнообразие почвенного покрова острова. Для средней тайги характерно формирование подзолистых почв из-за преимущественно промывного типа водного режима и формированием кислой среды из-за присутствия в лесной подстилке лигнина, дубильных веществ. Основные породы Валаама – габбродолериты и т.п. - породы, довольно обогащенные такими элементами, как Са и Mg. Они препятствуют развитию подзолистого процесса из-за своей способности коагулировать органические соединения. В результате на острове широкое распространение получили подбуры и бурозёмы. Они характеризуются кислой реакцией среды и достаточно высоким содержанием гумуса. В них также отмечается высокое содержание Fe, поскольку его

миграция по профилю затруднена катионами Ca, Mg и т.п., а также велико содержание в самих почвообразующих породах. Почвы этих типов развиваются на элювиально-делювиальных отложениях, в том числе перемешанных с мореной или озёрными отложениями. Их преимущественно супесчаный или песчаный состав обеспечивает хороший дренаж почв. В основном, подбуры и бурозёмы распространены на склонах сельг, плоских вершинах. Подзолистый процесс находит небольшое распространение на моренных или озёрных и озёрно-ледниковых отложениях, частично состоящих из материала, принесённого ледником из зоны распространения кислых силикатных пород: гранитов и гранито-гнейсов Балтийского кристаллического щита. Образующие подзолистые почвы имеют кислую реакцию и характеризуются низким содержанием гумуса. Они характерны для понижений между сельгами, низин. При близком залегании коренного субстрата или ленточных глин, а также на озёрных суглинках происходит ослабление дренажа, и формируются болотно-подзолистые или дерново-глеевые почвы, преимущественно в понижениях рельефа, в нижних частях склонов. Локально представлены болотные почвы, и примитивные - на выходах коренных пород (Матинян, Урусевская, 1999).

На острове ведётся довольно активное хозяйство, в результате чего развитие получили и антропогенно-преобразованные почвы с разной степенью преобразованности: с повышенным содержанием биогенных элементов, изменённым водным режимом. В основном, они сосредоточены в центральной и северной частях острова.

1.5. Растительность

Географически Валаам располагается в подзоне среднетаёжных лесов, поэтому в составе древесных пород преобладают хвойные деревья. Основную часть занимают сосновые леса (скальные типы, беломошные, вересковые, брусничные, черничные, травяные), но около трети площади занимают ельники (скальные типы, черничные, кисличные, травяные),

которые сосредоточены, в основном, в восточной части острова (Кучко и др., 1988; Матинян, Урусевская, 1999). Также здесь встречаются берёза, осина, ольха, в основном, лишь в составе других типов лесов. По берегам малых внутренних озёр острова растёт чёрная ольха. Распространены также широколиственные породы: клён остролистный, липа мелколистная, вяз шершавый, находящиеся на северной границе своего ареала. Среди пород подроста и подлеска встречаются рябина, несколько видов ивы, можжевельник, иногда – калина, черёмуха, красная смородина. Травянистые растения получают широкое распространение на острове, особенно на местах старых вырубок, полянах. Кроме того, для лесов также характерно соседство неморальных видов травянистых растений с арктическими, арктоальпийскими, сибирскими видами (Кучко и др., 1988). Это связано, в том числе, с климатическими изменениями в течение голоцена и смещению границы природных зон. Широко распространены лишайники и мхи.

На Валааме произрастает несколько видов интродуцентов – пород из других районов. Среди них можно выделить дуб черешчатый, лиственницу сибирскую, пихту сибирскую, сосну кедровую сибирскую, сосну Муррея, тую западную и др. Часть из них (лиственница, пихта) имеют значительное распространение на острове (Кучко и др., 1988). Отличительная особенность валаамских лесов – большой возраст многих деревьев, составляющий более 100 лет.

1.6. Характеристика объекта исследования

Озеро Витальевское (61°24' с.ш., 31°00' в.д.; рис. 1) расположено в восточной части острова Валаам, в узкой ложбине северо-западного простирания на абсолютной отметке около 10,8 м (Saarnisto, 2012). Водоём вытянут в том же направлении. Площадь водного зеркала составляет 0,51 га, максимальная глубина - 1,9 м, площадь водосбора - 50 га (Степанова и др., 2010). Минимальное расстояние до Ладожского озера - порядка 400 м. Питание водоёма осуществляется за счёт атмосферных осадков и

поверхностного склонового стока. Притоков оно не имеет, сток из озера осуществляется через ручей в юго-восточной части озера. С юго-запада к озеру подходит неглубокая канава, в период проведения экспедиционных работ практически пересохшая. Северо-восточный берег водоёма крутой, юго-западный – пологий, переходящий в сплавину шириной до 10 м.. Вокруг озера - сосновый черничный лес с елью и осиной. По показателю активной реакции среды водоём относится к нейтральным, хотя рН может варьировать (6,2-7,4) (Степанова и др., 2010). Так же воды озера Витальевского характеризуются повышенным содержанием Fe, что обусловлено распространением в северо-восточной части Валаама среди кристаллических пород ферро-габбро (Шешукова и др., 2005).

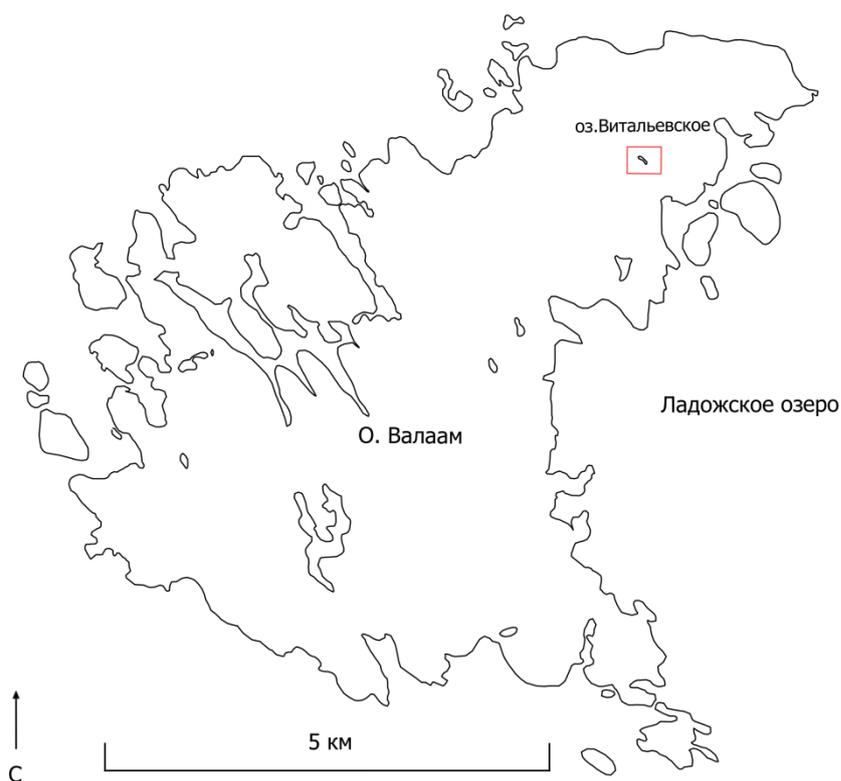


Рисунок 1. Местоположение оз. Витальевского

Глава 2. История исследований

Событие, именуемое в литературе ладожской трансгрессией, имело место в интервале примерно 5-3 тыс. л.н. (Субетто, 2007). Основной причиной данного события считается перекоп котловины озера в результате неравномерных гляциоизостатических поднятий северной и южной частей и изменения системы водосбора в условиях отсутствия речного стока. Завершение трансгрессии связывается с прорывом реки Невы через Мгинско-Тосненский водораздел.

Впервые исследования диатомовых водорослей в отложениях ладожской трансгрессии были выполнены в 30-х годах на южном и восточном побережье Ладожского озера К.К.Марковым и В.С. Порецким (Марков и др., 1934). Особенности состава диатомовых комплексов позволили авторам сделать вывод о формировании осадков в глубоководном пресноводном бассейне. С тех пор данные о составе диатомовых водорослей в этих отложениях начали появляться во многих работах (Маркова К.К. (Марков, 1949), Бискэ Г.С., Шаркова В.В. (Бискэ, 1959), Малаховского Д.Б., Кошечкина Б.И. и Экмана И.М. (Кошечкин, Экман, 1993) и др.). В дальнейшем систематическое изучение диатомовых комплексов донных отложений Ладожского озера (Давыдова, 1985) позволило сопоставить их состав с составом диатомовых комплексов из отложений ладожской трансгрессии. Это позволило диатомовому анализу прочно закрепиться в списке методов изучения пространственно-временных пределов среднеголоценовой трансгрессии.

Отдельным пунктом стоит упомянуть исследования колонок донных отложений, полученных на малых озёрах. В 1992 году были проведены буровые работы на озёрах острова Кильпола (Витсалампи и Ревонлампи, 15 и 18 м над у.м. соответственно), расположенного в северо-западной части Ладожского озера (Saarnisto, Grönlund, 1996). Изучение состава диатомовых комплексов позволило выявить стадию, соответствующую ладожской

трансгрессии и характеризующуюся присутствием определенных видов диатомей – типичных представителей ладожской флоры. Завершение трансгрессии нашло отражение в смене состава диатомовых комплексов: исчезновении из их состава видов больших озёр (в нашем случае “ладожских”) и установлении доминирования видов-обитателей малых озер со слабо-кислой реакцией среды. Датирование момента исчезновения из состава диатомовых комплексов “ладожских” видов диатомей позволило установить время завершения ладожской трансгрессии и образования р. Невы. Палеолимнологические исследования на небольшом озере Суури (12,1 м над у.м.) (Клейменова и др., 1995), расположенном на северо-западном побережье Ладожского озера, так же выявили изменения в составе диатомовых комплексов, основанные на превалировании разных экологических групп в связи с изменением физических и гидрохимических характеристик водоёма. Это позволило выделить несколько стадий развития озера, начиная с раннеголоценовой анциловой трансгрессии.

Трансгрессивное состояние Ладожского озера в суббореальное время и проникновение его вод в котловину оз. Суури отражает смена ацидофилов, характеризующих этап изолированного малого озера, алкалифилами, характерными для нейтрально-слабощелочных вод Ладоги, а также закономерное изменение соотношения планктонных и бентосных видов. В начале 2000-х годов сотрудниками Института озёроведения РАН были проведены работы на малых озёрах, расположенных на трассе палеостока из Ладожского озера в северной части Карельского перешейка (Субетто и др., 2007) с целью реконструкции пределов распространения среднеголоценовой трансгрессии и эволюции гидросети Карельского перешейка. В озёрах его северной части исчезновение из состава диатомовых комплексов “ладожских” видов позволило установить момент прекращения поступления ладожских вод в их котловины и таким образом датировать время прекращения существования палеостока из Ладожского озера (Субетто и др. , 2007; Кузнецов и др., 2015). Изучение состава диатомовых комплексов из

донных отложений оз. Св. Сергия (15 м над у.м.) на острове Путсаари, расположенном в северной части озера, показало, что на раннем этапе в его котловине существовал небольшой залив Ладоги с нейтральной-слабощелочной реакцией среды. Снижение уровня Ладожского озера (не позднее 2700 ¹⁴С л.н.) привело к частичному размыву отложений ладожской трансгрессии и изоляции от Ладоги. На основе изменений состава диатомовых комплексов установлено, что после завершения трансгрессии в котловине возник олиготрофный водоём с кислой реакцией среды (Лудикова и др., 2005). Гидрохимические и гидробиологические особенности этого этапа развития озера определялись спецификой его водосбора (малая площадь, состав горных пород, рельеф, почвенно-растительный покров) (Лудикова, 2008).

Обобщение результатов изучения диатомовых комплексов в отложениях ладожской трансгрессии позволило уточнить состав группы её видов-индикаторов (Лудикова, 2015).

Важным звеном в реконструкции голоценовых изменений береговой линии Ладожского озера является Валаамский архипелаг, в частности, его главный остров. Несмотря на то, что само озеро, и, в частности, его альгологические сообщества, стали активно изучаться, начиная с 1950-х гг. (Давыдова, 1985) на архипелаге детальных масштабных исследований практически не проводилось до 70-х годов. В 80-х годах возрос интерес к внутренним водоемам Валаама. Тогда впервые был описан зоопланктон нескольких малых озёр (Куликова, 2013), специализированные научные работы были посвящены животному миру внутренних водоемов (Кирцидели, 2002; Степанова, 1998). В начале 90-х годов был проведён отбор проб с прибрежной части Ладожского озера в районе Валаамских островов, а также из их внутренних озёр с целью изучения видового состава комплексов водорослей (планктонных сообществ и сообществ обрастаний) и их экологических характеристик (Маринич, 1994). В результате было установлено, что по видовому разнообразию в водной системе архипелага

превалируют диатомовые (в частности, семейство Навикулоидных) и зелёные водоросли. Началось активное изучение фитопланктона водоёмов (Воякина, 2007). Среди диатомовых водорослей планктона наблюдалось развитие, в основном, представителей *Aulacoseira* spp., *Cyclotella* spp.; наибольшее разнообразие диатомей в планктонных сообществах отмечено в том числе в озере Витальевском. Помимо изучения состава растительных и животных сообществ внутренних озёр, были проведены работы по изучению гидрохимических и физических характеристик внутренних озёр (Степанова и др., 2010), а также химического состава донных отложений некоторых из них, в том числе с палеолимнологическими целями (Марков, 2011). В настоящее время на о-ве Валаам расположена учебно-научная станция РГГМУ, которая проводит контроль за характеристиками внутренних озёр острова, а также заливов и др. (<http://valaam.rshu.ru>, дата обращения: 27/02/2020).

В 1996 г. на внутренних озёрах Валаама проводились буровые работы с целью реконструкции скорости поднятия Вааламского архипелага (Saarnisto, 2012). В результате были отобраны керны донных отложений из 8 озёр, в том числе из оз. Витальевского, и для них были получены радиоуглеродные датировки литологических границ, предположительно соответствующих моменту изоляции водоёмов от Ладожского озера (Saarnisto, 2012). Однако диатомовый анализ этих отложений не выполнялся.

Глава 3. Материалы и методы

1.1. Полевой этап

Материал для данной работы был отобран в ходе палеолимнологической экспедиции Института озероведения РАН в период с 15 по 22 июля 2019 г.

Пробоотбор осуществлялся с помощью русского торфяного бура с длиной желонки 1 м и диаметром 5 см. Бурение производилось со специально подготовленной плавучей платформы на основе надувного

катамарана. Керн донных отложений мощностью 2,3 м отобран в северо-западной части озера с глубины 1,90 м, максимальной для данного озера (Степанова и др., 2010) (рис. 2). Пробоотбор осуществлялся с перекрытием минимум 0,20 м. Всего было отобрано и описано 6 кернов. Донные отложения были пройдены до глубины 4,20 (от поверхности воды). Сводный разрез донных отложений представлен в табл. 1.



Рисунок 2. Местоположение точки бурения (красный круг). Основа – снимок Google Earth

Таблица 1. Сводный разрез донных отложений озера Витальевского.

Макс. мощность, м	Литологическое описание
0,15	Чёрный наилок
1,55	Однородная тёмно-бурая и бурая гиттия. Нижняя граница постепенная
0,77	Серая и серо-коричневая алевролитовая опесчаненная гиттия с грубодетритовыми прослоями. Нижняя граница ясная
0,04	Серый тонкозернистый песок. Нижняя граница резкая
>0,23	Серый крупнозернистый / мелкозернистый песок.

1.2. Камеральный этап

На камеральном этапе исследования в Институте озёроведения РАН проводилось уточнение литологических границ отобранных кернов и разбор колонок донных отложений на разные виды анализов, такие как анализ потери при прокаливании для определения содержания органического вещества в образце, спорово-пыльцевой, геохимический и диатомовый анализы.

3.2.1. Пробоподготовка

Для данной работы было выбрано 10 проб из разных литологических горизонтов, характеризующих различные седиментационные обстановки в котловине озера Витальевского, охватывающие разные этапы эволюции его экосистемы (табл.2).

Таблица 2. Глубины отбора проб

Лабораторный номер	Глубина, м	Литологический горизонт
Vi-146	2,82-2,80	Однородная гиттия
Vi-141	2,92-2,90	Однородная гиттия
Vi-135	3,02-3,00	Алевритовая опесчаненная гиттия
Vi-41	3,17-3,15	Алевритовая опесчаненная гиттия
Vi-31	3,37-3,35	Алевритовая опесчаненная гиттия
Vi-21	3,57-3,55	Алевритовая опесчаненная гиттия
Vi-11	3,77-3,75	Алевритовая опесчаненная гиттия
Vi-3	3,93-3,91	Тонкозернистый песок
Vi-62-2	3,98-3,93	Крупнозернистый песок
Vi-54-55	4,14-4,10	Крупнозернистый песок

Подготовка проб для диатомового анализа осуществлялась по стандартной методике (Давыдова 1985). Материал для диатомового анализа, отобранный в поле 2019, высушивали при комнатной температуре для последующего вычисления содержания створок в 1 г сухого осадка, после чего взвешивали. Полученные навески (0,5-2 грамма для гиттии и 7-8

граммов для песка) помещали в стаканы, заливали 30%-й перекисью водорода для избавления от органического вещества и оставляли на 1-2 суток. Далее для ускорения реакции суспензия нагревалась на плитке, что дополнительно способствовало разъединению створок диатомовых водорослей. После прекращения реакции с перекисью, её остатки выпаривали, и остывший осадок заливали водой. После тщательного перемешивания суспензию переливали в пробирку, при этом наиболее крупные минеральные частицы, осаждаясь, оставались в стакане. Т.к. осадок состоял преимущественно либо из гиттии, либо из крупного песка, то применение тяжёлой жидкости для выделения и концентрирования створок не понадобилось. Для отмывания от остатков перекиси водорода и очищения от тонких (преимущественно глинистых частиц) пробы подвергались центрифугированию: 1 раз - 10 минут, и 3 раза по 8 минут на скорости 1000 оборотов/мин. После каждого центрифугирования неосевшую взвесь сливали, заливали осадок чистой водой и тщательно перемешивали. Центрифугирование повторялось, пока жидкость в пробирке не становилась прозрачной. Затем в пробирку с осадком, насыщенным створками, заливалось известное количество воды, и после тщательного перемешивания каплю пробы объёмом 0,1 мл помещали на покровное стекло. Когда лишняя вода испарялась, на плитке нагревали предметное стекло, наносили на него среду Эльяшева (с показателем преломления 1,67-1,68 (Диатомовые водоросли..., 1974), на которую приклеивали покровное стекло с осадком.

3.2.2. Изучение под микроскопом

Изучение препаратов проводилось в Институте озёроведения РАН с помощью светового биологического микроскопа МБИ-15 при суммарном увеличении в 900 крат (x10 – увеличение окуляра и x90 – увеличение самого иммерсионного объектива), при этом использовалось иммерсионное масло для увеличения чёткости и яркости изображения. В комплектацию микроскопа также входит окулярный микрометр, который позволял

определять размеры створок и их структурных элементов, что является важными диагностическими признаками.

Согласно методическим рекомендациям (Диатомовый анализ..., 1949) необходимо подсчитывать не менее 300 створок, что позволяет охватить основное видовое разнообразие и с достаточной достоверностью выделить доминирующие комплексы и виды. В изученных образцах, как правило, подсчитывалось не менее 400 створок в каждом, при этом фиксировалось количество просмотренных полей зрения. Обломки размером $>1/2$ створки считали как целую створку.

Определение видовой принадлежности основывалось на нескольких определителях (Krammer, Lange-Bertalot, Teil 1-4; Забелина и др., 1951; Диатомовый анализ... 1950)

3.2.3. Аналитическая обработка данных

Концентрацию створок диатомей в 1 г сухого осадка рассчитывали по методике Н.Н. Давыдовой (Давыдова, 1985):

$$K = \frac{P \times Чр \times Чп \times X}{H \times O \times ПЗ}, \text{ где}$$

K – концентрация (кол-во створок в 1 г сухого осадка), P – разбавление (мл), Чр – число рядов, Чп – число полей в ряду, X – количество створок, H – навеска (г), O – объём пробы (мл), ПЗ – число просмотренных полей зрения.

Для оценки роли отдельных видов в составе диатомовых комплексов было принято подразделение на доминантов ($>10\%$), субдоминантов (5-10%), “обычных” (1-5%) и единичных ($<1\%$) видов (Давыдова 1985). Исходя из поставленных задач, виды были сгруппированы по местообитанию, отношению к рН и трофности. Сведения об экологии диатомей получены из работ Н.Н. Давыдовой (Давыдова, 1985)), Г. Ван Дама с соавторами (Van Dam et. al., 1994) (Krammer, Lange-Bertalot, Teil 1-4). Кроме того, идентифицированные таксоны были также разделены на “ладожские” (т.е. виды-обитатели больших озёр) и остальные виды (т.е. виды малых озёр и

индифферентные – обитающие как в больших, так и в малых озерах). Для этого использовали данные из работ (Лудикова, 2015; Hedenström, 1999). Для оценки количественного взаимоотношения видов в каждой пробе был рассчитан индекс флористического разнообразия (ИФР), который представляет собой отношение числа определённых видов в пробе к общему количеству подсчитанных в пробе створок (Bennion 1995). Дополнительно была предпринята попытка реконструировать значения рН по одной из методик (Renberg, Hellberg, 1992):

$$B = \frac{\text{ind} + 5 * \text{acf} + 40 * \text{acb}}{\text{ind} + 3,5 * \text{alkf} + 108 * \text{alkb}};$$
$$\text{pH} = 6,40 - 0,85 * \log(B), \text{ где}$$

ind – нейтрофилы, acf – ацидофилы, acb – ацидобионты, alkf – алкалифилы, alkb – алкалибионты (содержание створок в процентах). При расчёте было учтено содержание видов, отношение к активной реакции среды которых неизвестно, - сначала они считались в сумме с алкалибионтами (максимальное возможное значение рН для данного видового состава), потом – в сумме с ацидобионтами (минимальное возможное значение рН для данного видового состава).

Предварительная компьютерная обработка данных осуществлялась с использованием программного пакета Microsoft Office Excel, где были составлены таблицы видов. Диаграммы относительной численности видов и экологических групп построены с помощью программы для обработки и визуализации палеоэкологических данных C2 Версия 1.7 (Juggins, 2007).

Пробоподготовка, определение видовой принадлежности диатомовых водорослей, обработка данных и реконструкции палеоэкологических обстановок были выполнены под руководством Лудиковой А.В.

Глава 4. Результаты

4.1. Состав диатомовых комплексов

В просмотренных пробах озера Витальевского всего было обнаружено 212 видов диатомовых водорослей (включая внутривидовые таксоны), принадлежащих к 31 роду. На построенных диаграммах представлена относительная численность основных видов (доминанты, субдоминанты) и родов, концентрация створок в донных осадках, значения ИФР (рис. 3), соотношение экологических групп диатомовых водорослей (рис. 4).

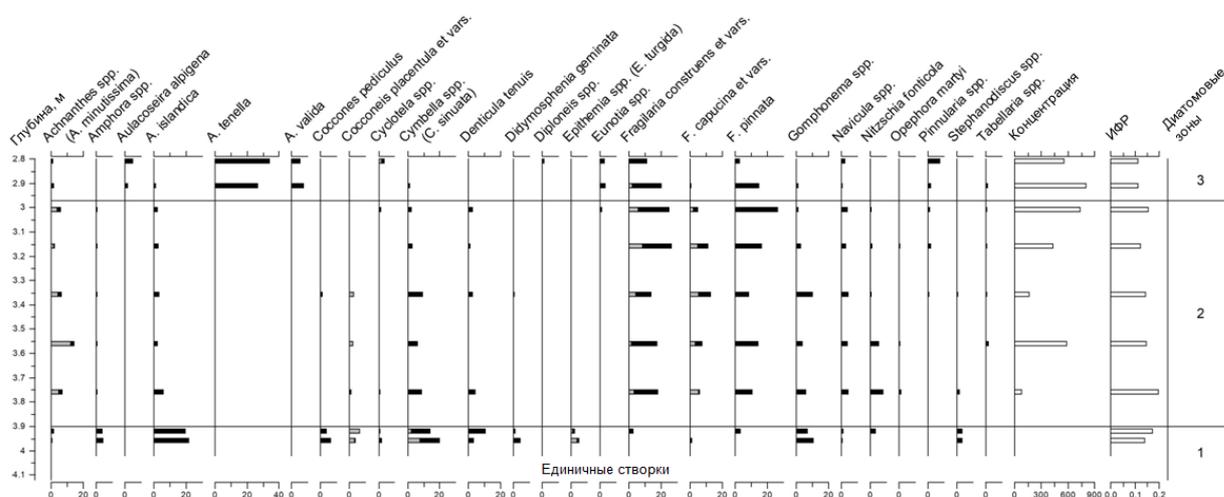


Рисунок 3. Диатомовая диаграмма оз. Витальевского. Численность дана в %, концентрация – в млн. единиц на 1 г. сухого осадка. Серым цветом обозначено относительное содержание видов, указанных в скобках, и основных видов среди сгруппированных разновидностей (“et vars.”)

Изменения состава диатомовых комплексов позволяют выделить 3 диатомовые зоны (ДЗ).

ДЗ-1 (4,12-3,90 м) характеризуется очень низкими значениями концентрации створок диатомовых водорослей - менее 7,3 млн. в 1 г. сухого осадка; в нижней части исследованного интервала, где были идентифицированы только 2 створки *Aulacoseira islandica* и *Amphora lybica*, концентрация падает до 500 створок.

Здесь отмечается высокое содержание видов-обрастателей (до 62%), среди которых преобладают: алкалифил *Denticula tenuis*, *Cocconeis spp.* (в частности, достигающие значений субдоминантов алкалифильные *Cocconeis*

pediculus (6,9-4,0%) и *C. placentula* (3,7-6,8%)), *Cymbella* spp. (в т.ч. нейтрофильные *Cymbella sinuata* (8,1-2,8%) и *C. silesiaca* (2,7-5,4%)), *Gomphonema* spp., которые часто обитают в средах с довольно активным гидродинамическим режимом, *Epithemia* spp., несколько представителей рода *Fragilaria* (алкалифильные *F. pinnata*, *F. construens f. venter*). Велика доля и планктонных видов (26-28,5%), главным образом, представленных нейтрофильным видом *Aulacoseira islandica*, являющейся доминантом с относительным содержанием до 21,9%, а также видами *Stephanodiscus* spp. (3,5-3,7%). Донные диатомеи, составляющие 10-13% от общей численности, представлены, в основном, видами рода *Amphora* (4,5-4,6%), а также видами *Caloneis bacillum* (1,2-3,2%) и *Nitzschia fonticola* (0,2-3,5%).

По отношению к активной реакции среды преобладают виды-алкалифилы, составляющие от 33 до 49% общей численности видов, и нейтрофилы (до 40%). При этом доля алкалибинтов невелика – они образуют 5,3-6,9%. Главным представителем этой экологической группы является *Epithemia turgida* (1,6-4,2%). По отношению к трофности наиболее характерным являются виды с широкой экологической толерантностью, в частности, из-за высокого процентного содержания *A. islandica*. Относительное содержание эвтрофных видов (26-28%), главным образом представленных видами *Cocconeis pediculus* и *C. placentula*, является максимальным на изучаемом интервале. Так же велика доля мезотрофных (14-17%), основную часть которых образует *Denticula tenuis*, и мезо-эвтрофных видов (9,2-11,0%), имеющих довольно большую долю за счёт видов *Caloneis bacillum*, *Epithemia turgida*, *Nitzschia fonticola* и некоторых видов *Fragilaria* spp.

В ДЗ-1 отмечается максимальное относительное содержание “ладожских” видов, которое немного снижается с 43,4% в горизонте крупнозернистого песка до 32,2% в горизонте тонкозернистого песка. Эти виды представлены, главным образом, *Aulacoseira islandica*, *Cymbella sinuata*,

Didymosphenia geminata (до 4,8%), *Stephanodiscus medius* (до 1,9%) и *St. neoastrea* (до 1,8%).

ИФР несколько повышается к верхней границе зоны со значения 0,14 до 0,17.

В ДЗ-2 (3,90-2,95 м) происходит увеличение значений концентрации створок до 80 млн. в нижней части зоны и до 740 млн. в 1 г. сухого осадка в верхней части зоны, при этом значения концентраций значительно варьируют.

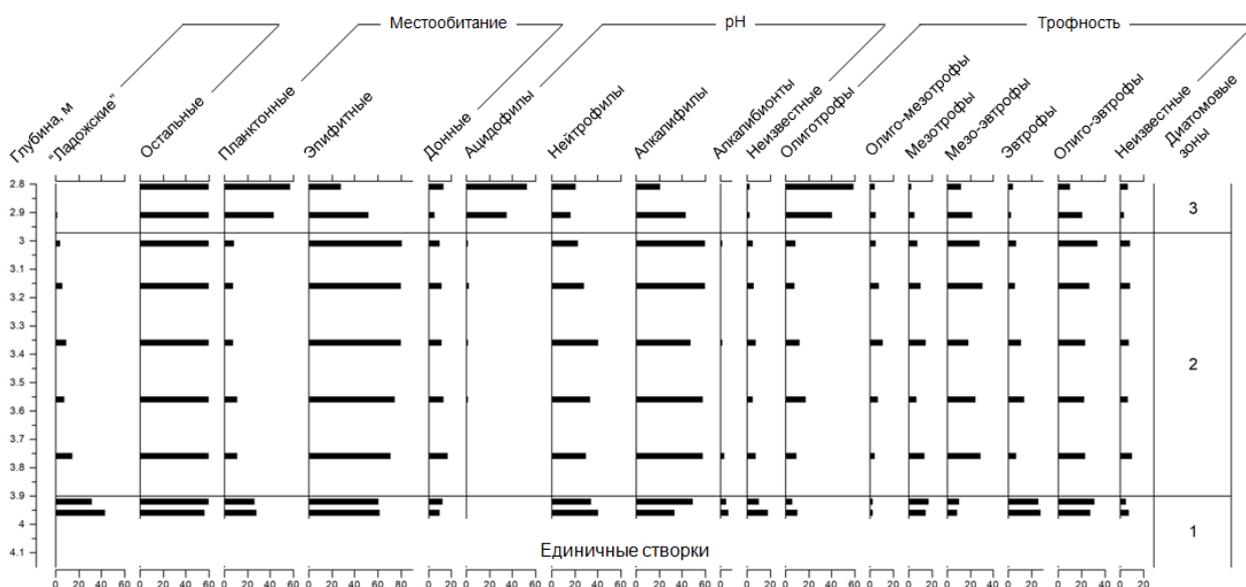


Рисунок 4. Диаграмма соотношения экологических групп. Численность дана в %.

Для зоны характерно довольно резкое изменение соотношения планктонных и эпифитных видов (рис. 4). Так, доля планктонных видов заметно снижается с 26%, характерных для ДЗ-1, до 11,6% в нижней части рассматриваемой зоны и далее до 7,6-8,7% в её верхней части. Планктон представлен, главным образом, *Aulacoseira islandica*, численность которой резко снизилась до 6,5% и менее вверх по зоне до 2,7%, и нейтрофильной *Aulacoseira subarctica*, численность которой достигает 2,3%. К верхней границе ДЗ-2 планктон пополнился эвтрофным алкалифильным видом *Aulacoseira ambigua* (2,0-2,5%). Значительно меняется соотношение видов, образующих группу обрастателей, при этом их общая доля выросла на 10-

20%. Одна из ведущих ролей отходит роду *Fragilaria* (в частности, алкалифилам *Fragilaria pinnata*, содержание которой в интервале глубин 3,90-3,00 м повышается, достигая в верхней части зоны 26,7%, *F. construens f. venter*, которая так же в верхней части зоны достигает значений доминанта (15,4-17,6%) и *F. construens f. binodis* (9,3-10,1% в нижней части до 1,0-2,6% в верхней)). Высокое значение видов-обрастателей достигается так же за счёт нейтрофильного вида *Achnanthes minutissima* (до 12,4%) и алкалифильного *Nitzschia fonticola*, содержание которого достигает значений 5,7-8,3% в нижней части выделенной зоны, после чего он становится “обычным видом” с долей чуть более 1%. При этом из комплекса практически исчезает *Epithemia spp.* и значительно снижается доля *Symbella spp.*, составляя 6,6-9,5% и уменьшаясь до значений 3,5% у верхней границы. Содержание же донных видов практически не изменилось, хотя состав тоже претерпел некоторые изменения, и важная роль отошла представителям рода *Navicula*, доля которых с 0,9-1,6% из первой зоны здесь возрастает до 3,1-4,6%, а во второй половине зоны несколько возросло содержание донных диатомей *Pinnularia spp.* (до 2,2%).

По отношению к рН водной среды здесь всё ещё наблюдается преобладание алкалифильных (47-67%), доля которых немного увеличивается к верхней части зоны, и нейтрофильных (23-40%) видов, содержание которых, наоборот, несколько уменьшается к верхней границе. Отмечается маленький прирост ацидофильных видов, среди которых *Tabellaria flocculosa* (до 1,4%), *Pinnularia nodosa* (до 0,7%), а также некоторые представители рода *Eunotia*.

По отношению к трофности наблюдается резкое повышение содержания мезо-эвтрофных видов, среди которых основной вклад принадлежит *Fragilaria construens et vars.*, до 18-31%. Небольшое увеличение численности прослеживается у олиго-мезотрофных видов с 2,5% из ДЗ-1 до 4-8% с пиком 11,5% на глубине 3,37-3,35 м. Доля эвтрофных видов резко снижается до 11-13% в средней части зоны и до 6,2-6,9% у верхней границы

зоны – это обусловлено в т.ч. сокращением численности *Cocconeis placentula* et vars. и *Cocconeis pediculus*. Содержание же олиготрофных видов и видов с широкой экологической валентностью практически не изменилось, только в верхней части наблюдается повышение последних до 27-34%.

Доля “ладожских” видов заметно снизилась до 15,2% у нижнего края зоны и до 4,1% у верхнего края. Основным представителем этой группы является всё ещё *Aulacoseira islandica*. При этом в сюда добавились *Opephora martyi* (до 1,2%), *Navicula aboensis* (до 1,1%) и *Achnanthes calcar* (до 0,8%), которые практически отсутствовали в ДЗ-1.

ИФР достигает максимального значения для всего изученного промежутка – 0,20 на нижней границе зоны. К верхней части он несколько снижается до 0,12-0,15.

В ДЗ-3 (2,95-2,80 м) концентрация створок остаётся примерно такой же, что и в ДЗ-2, достигая значений в 800-500 млн. на 1 г. сухого осадка.

Доля планктонных видов резко увеличивается до 43-57,5%. Состав этой группы формируется за счёт представителей рода *Aulacoseira*, в том числе нового доминанта - ацидофильного вида *Aulacoseira tenella* (27,3-34,5%), а также нейтрофила *A. valida* (7,8-5,7%) и ацидофила *A. alpigena* (до 5,3%). Содержание *Aulacoseira islandica* падает до 1,4% и до 0%, а содержание *A. subarctica* практически не изменилось. Доля планктонных *Cyclotella spp.*, среди которых, в основном, нейтрофильный вид *Cyclotella pseudostelligera*, несколько повышается в интервале 2,80-2,82 м, достигая значений 3,8%.

Доля эпифитных видов, наоборот, снижается до 52 и далее до 28,5%., поскольку доля *Fragilaria spp.* уменьшается, хотя *Fragilaria construens f. venter* (16,8-11,0%) всё ещё остаётся доминантом, а *Fragilaria pinnata* из доминанта на нижней границе зоны (15,4%) превращается в “обычный” вид с численностью 3,2%. Сокращается численность обрастателя *Achnanthes spp.* до 1,5-2,0%, *Symbella spp.* до 0,5-1,4% и *Gomphonema spp.* до 0,6%. При этом здесь отмечается небольшое увеличение доли ацидофильных обрастателей *Eunotia spp.* (в т.ч. ацидофильного вида *Eunotia pectinalis*) до 3,5%.

Наблюдается небольшое уменьшение содержания створок донных диатомей до 5%, после чего значение возвращается к обычным 13%. Содержание донных *Navicula spp.* падает до 1,2-2,8%, а *Pinnularia spp.* – обитателей стоячих или медленно текучих вод - наоборот, возрастает до 7,8% в интервале глубин 2,82-2,80 м. В этом же интервале немного возрастает численность *Diploneis finnica* до 1,5%, тогда как в предыдущих зонах содержание отдельных видов рода *Diploneis* не превышало 0,4%.

В данной зоне резко меняется соотношение экологических групп по показателю активной реакции среды. Так, преобладающими становятся ацидофилы с содержанием 35-53%, а доля алкалофилов снижается до 21% у верхней границы зоны, хотя стоит отметить, что их доля всё ещё достаточно велика за счёт *Fragilaria construens* et vars. В зоне выделяются ацидобионты (*Pinnularia braunii* (1,1-1,2%), *Frustulia rhomboids* var. *saxonica*).

По отношению к трофности наибольшее развитие в зоне получают олиготрофные виды, процентное содержание которых резко увеличивается до 40,5-59,5% (большой частью за счёт доминанта *Aulacoseira tenella* и других *Aulacoseira spp.*). Также велика доля мезо-эвтрофных видов, однако она снижается по сравнению с ДЗ-2 до 12,5%. Относительное количество олиго-мезотрофных видов практически не меняется, а доля мезотрофных уменьшается до 4,9-2,7%.

Относительное содержание “ладожских” видов в данной зоне закономерно падает до 1,4-0,2%. При этом из группы пропадают *Aulacoseira islandica*, *Didymosphenia geminata* и некоторые другие виды. Остаются только единичные представители.

ИФР несколько падает по сравнению с ДЗ-1 и ДЗ-2, достигая минимальных значений для рассматриваемого интервала (0,12).

4.2. Реконструкция значений рН

Значения рН, рассчитанные для 9 из 10 проб, представлены на рис. 5. Несмотря на большую погрешность, связанную с довольно большим

количеством видов, чьё отношение к активной реакции среды неизвестно (от 18,0% в нижней части до 2,7% в верхней части рассматриваемой колонки), можно наблюдать тренд изменения этого показателя. Так, в нижней части ДЗ-2 заметно плавное понижение значений водородного показателя к верхней части, при этом можно предположить, что неизвестные виды из ДЗ-1, вероятнее всего, распределятся между нейтрофилами, алкалифилами или алкалибионтами, что сместит значение в сторону с более высокими значениями рН. В это время в ДЗ-3 рН заметно снижается до значений 6,8-5,7, что означает слабокислую среду.

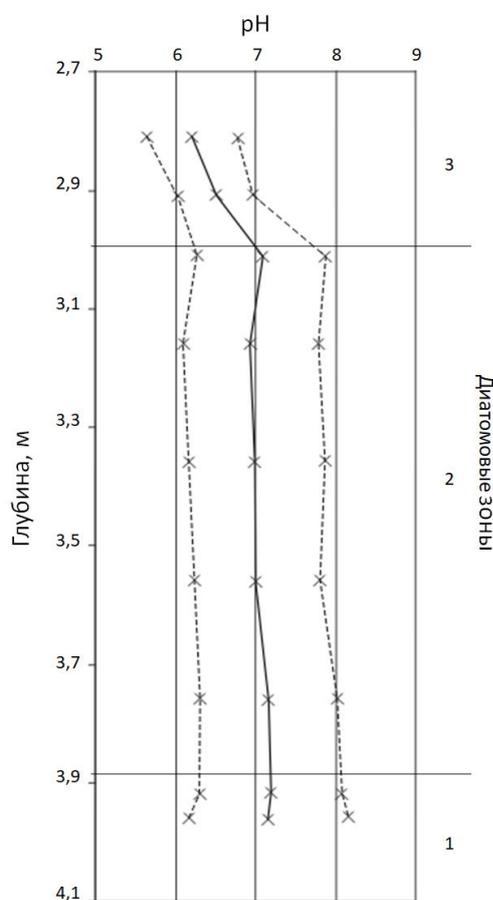


Рисунок 5. Реконструированные значения рН. Сплошная линия - среднее арифметическое значение рН, пунктирная – погрешность (с учётом стандартной ошибки метода)

Глава 5. Обсуждение результатов

Изучение колонки донных отложений с помощью диатомового анализа позволило выделить 3 этапа эволюции озера Витальевское.

В первый этап, соответствующий ДЗ-1, согласно данным диатомового анализа, осадконакопление происходило в водной обстановке, имеющей прямую связь с водами Ладоги, о чём свидетельствует массовое развитие “ладожских” видов, в том числе это выражается в доминировании *Aulacoseira islandica*, который является массовым ладожским видом с позднеледниковья (Давыдова, 1985), а также в достаточно высоком содержании *Cymbella sinuata*, *Didymosphenia geminata* и участии других характерных видов. Развитие этого комплекса отмечалось в донных отложениях, приуроченных ко времени ладожской трансгрессии в котловинах других малых озёр, расположенных на Ладожском озере и в Приладожье (Лудикова, 2005; Saarnisto, Grönlund, 1996). Можно утверждать, что на рассматриваемом этапе котловина Витальевского является частью глубоко врезанного залива. Доминирование группы нейтрофилов и алкалифилов свидетельствует о слабощелочных условиях среды, что является характерной чертой вод Ладоги. Достаточно активный гидродинамический режим проявляется в низкой концентрации створок диатомовых водорослей в осадке. Об этом также дополнительно свидетельствуют часто обитающие в текущих водах *Gomphonema* spp. и *Didymosphenia geminata*. Высокое относительное содержание бентосных диатомей, в первую очередь, видов-обрастателей, свидетельствует об относительно небольшой глубине залива и широком развитии доступных субстратов для эпифитов, одним из которых является водная растительность, довольно распространённая на литорали Ладожского озера (Распопов, 2009). Дополнительно эпифитные виды могли выноситься из береговых зарослей макрофитов. Значительное развитие эвтрофных видов говорит о достаточно высоком трофическом статусе вод, что, вероятно, может быть связано с выносом большого количества биогенных элементов в узкий залив и с развитием береговой и водной растительности. При этом волновая деятельность не благоприятствовала накоплению органического материала в осадках.

Литологически данная зона представлена крупно- и мелкозернистым песком, перекрытым тонкозернистым песком, что также свидетельствует о том, что осадконакопление происходило в достаточно высокоэнергичной среде с постепенным ослаблением активности.

На основе моделирования изменения уровня Ладожского озера в период спада среднеголоценовой трансгрессии и датировок момента обособления малых озёр Валаама, приведённых в работе (Сапелко и др., 2018), были высчитаны предполагаемые максимальные глубины оз. Витальевского в некоторые периоды его существования (рис. 6). На момент 3100 ± 200 кал.л.н. уровень воды отсчитывался по моменту изолирования оз. Антониевское (2900 ± 80 ^{14}C л.н. (Saarnisto, 2012), которое является ближайшим озером к Витальевскому и располагается выше.

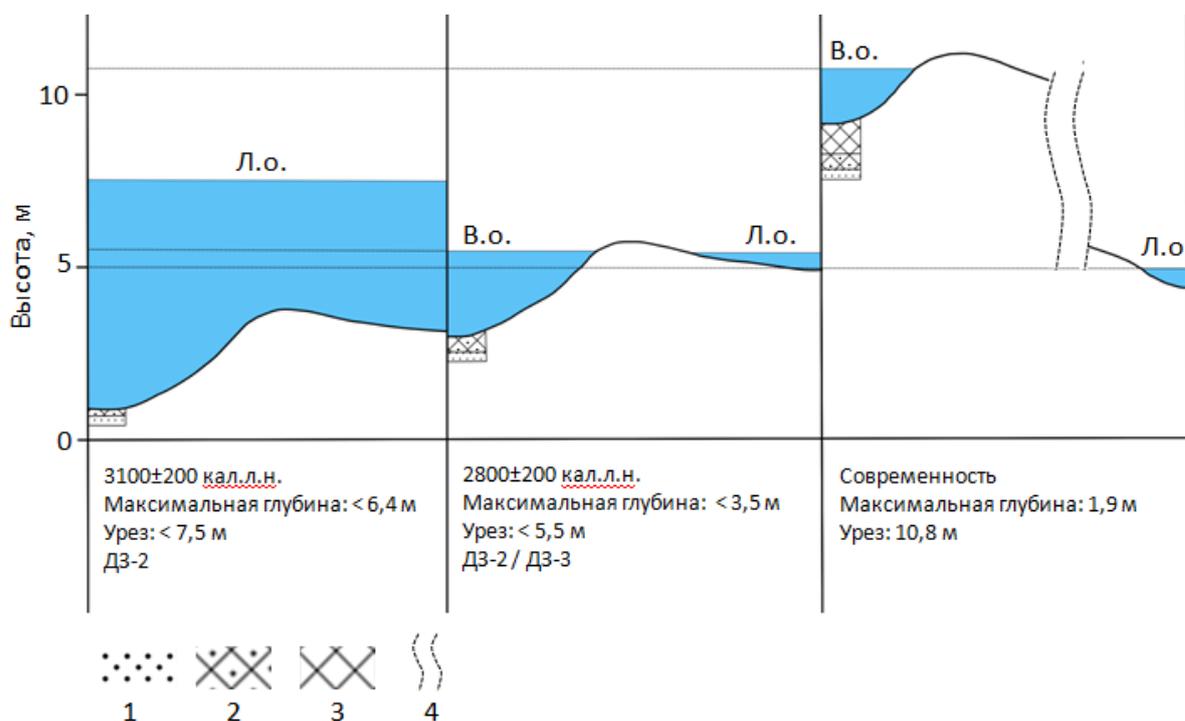


Рисунок 6. Схема-реконструкция глубины и уреза водоёма на основе данных моделирования гляциоизостатического поднятия Валаама и изменения уровня Ладожского озера (Сапелко и др., 2018) с учётом мощности литологических горизонтов.

Условные обозначения: 1 – крупно-, мелко-, тонкозернистый песок; 2 – алевритовая гиттия с примесью песка; 3 – однородная гиттия; 4 – “разрыв”. Л.о. – Ладожское озеро; В.о. – Витальевское озеро. Высоты даны относительно современного уровня моря.

Так, в первый этап (ДЗ-1) максимальная глубина, вероятно, составляла немногим более 6,5 м, а средняя глубина, скорее всего, была меньше этого значения, что вполне удовлетворяет вышеописанным реконструированным условиям среды. Формирование этого горизонта происходило, вероятно, немногим раньше 3100 ± 200 кал.л.н. (2950 ± 150 ^{14}C л.н. 3100 ± 110 ^{14}C л.н – результаты датирования момента перехода от песчаных отложений Ладожского озера к алервритовой опесчаненной гиттии (Saarnisto, 2012)).

Следующий этап, соответствующий ДЗ-2, характеризуется снижением доли “ладожских” видов при сохранении первоначального видоразнообразия, по крайней мере, в нижней части зоны, что говорит об уменьшении связи с Ладожским озером, вызванным снижением его уровня. При этом такое заметное уменьшение содержания “ладожских” диатомей – до 6% и менее, – может означать сокращение поступления Ладожских вод в котловину. Кроме того, снижение уровня Ладоги привело к изменению условий среды в заливе (увеличение влияния стока с берегов, изменение глубины и других гидрологических, гидрохимических и гидробиологических факторов). В результате “ладожские” виды оказались менее конкурентоспособными в изменившихся условиях среды. Алкалифилы и нейтрофилы всё ещё преобладают, однако можно заметить тенденцию к небольшому смещению водородного показателя в сторону более нейтральных условий (рис. 5). Однако, в целом, среду всё ещё можно охарактеризовать как слабощелочную, что говорит о влиянии Ладожского озера. Кроме того нейтрально-слабощелочная реакция среды могла являться следствием активного фотосинтеза в процессе развития водной растительности. Вероятно, немного увеличивается роль водосбора будущего Витальевского озера, подкисляя воды залива. Заболачивание участков водосбора, ранее затопленных водами Ладожского озера, вследствие близости скального недренируемого основания, также способствовало формированию стока с кислой реакцией среды. Заметно снижается относительное содержание планктона на фоне увеличивающейся доли эпифитов. Это также указывает на снижение уровня

Ладожского озера, в результате чего глубина залива уменьшилась, увеличилась площадь мелководья, что благоприятствовало развитию как высшей водной растительности, так и сообществ эпифитов. При этом трофический статус немного снижается, возможно, из-за изменения водообмена с Ладогой. Смена в составе донных диатомей и увеличение доли *Navicula* spp. может говорить об меняющихся условиях среды, поскольку этот род обитает в широком диапазоне экологических обстановок, в то время как другие рода часто характеризуют однотипные условия, и на фоне падения уровня воды становятся менее конкурентноспособными. Переход доминирующих позиций к *Fragilaria* spp. подчёркивает смену гидрологических условий, поскольку данный род довольно часто развивается средах с изменяющимися физико-химическими параметрами из-за своей быстрой адаптации (Сапелко и др., 2014). Наряду с доминированием *Fragilaria* spp., особенно *Fragilaria pinnata*, развивается и *Achnanthes minutissima*, которые встречаются в сообществах обрастаний макрофитов, при этом у них может наблюдаться приуроченность к определённому виду растений (Sayer et al., 1999), что, теоретически, может указывать на смену и в растительном сообществе залива в результате эволюции водной среды. Это же указывает на постепенное зарастание залива, по крайней мере, в прибрежных частях.

Литологически рассматриваемая зона представлена алевроитовой гиттией с примесью песка, содержание которого уменьшается к кровле, и с грубодетритовыми прослоями. Это указывает на переходные условия осадконакопления. Согласно рис. 6, в момент формирования максимальный рассчитанный уровень воды, вероятно, составлял от 6,5 в начале данного этапа до 3,5 м в конце. Однако средние глубины, очевидно, были значительно меньше, что вполне подходит для предполагаемых условий. При этом порог, отделяющий на сегодняшний день озеро Витальевское от спуска в Ладогу, мог препятствовать дальнейшему проникновению в котловину грубого материала в связи со снижением энергии переноса,

обуславливая замедленный водообмен с озером и позволяя осаждаться только алевритовым частицам с периодическими более энергичными заплесками, несущими песок. Грубодетритовые прослойки свидетельствуют об изменяющихся условиях седиментации на фоне общего зарастания, что также подтверждается варьирующимися значениями концентраций створок.

По интерпретации М.Саарнисто, данный литологический горизонт формировался в условиях, близких к лагунным, т.е. в обстановках низкой гидродинамики и уменьшающейся связи с Ладожским озером. Это утверждение можно считать справедливым, т.к. оно подтверждается данными диатомового анализа. Начало формирования этого горизонта началось приблизительно 2950 ± 150 ^{14}C л.н. (Saarnisto, 2012).

На третьем этапе, соответствующему ДЗ-3, происходит достаточно резкая смена ведущих экологических групп. Начинает доминировать ацидофильный планктон, сформированный новыми видами, в частности, *Aulacoseira tenella*. Развитие других видов *Aulacoseira* (*A. valida*, *A. lacustris*, *A. alpigena*), а также *Eunotia* spp. дополнительно указывает на снижение значения активной реакции среды, т.к. они встречаются в сфагновых болотах (Куликовский, 2007). Вероятно, такой достаточно резкий переход обусловлен тем, что водосбор становится главным фактором, формирующим физико-химические характеристики водной среды озера Витальевского из-за относительного снижения уровня Ладоги, что подразумевает его полную изоляцию от Ладожского озера. Об этом говорит и развитие рода *Pinnularia*, среда обитания которых, в большинстве случаев, связана со стоячими небольшими водоёмами. Падение уровня воды и уменьшение объёма залива привело к слабому закислению вод из-за характеристик водосбора (на рис.5 заметно относительно резкое отклонение значений рН в кислую сторону), который обеспечивает поступление вод с пониженным значением рН. Стоит отметить, что формирование ацидофильной диатомовой флоры после изоляции малого водоёма отмечалось в работах, посвященных изучению изменения уровня Ладожского озера по данным бурения малых водоёмов

(Лудикова и др. 2005; Saarnisto, Grönlund, 1996; Клейменова и др., 1995). Снижение ИФР говорит о небольшом снижении видового разнообразия, что характерно для обстановок со смещением экологических условий от оптимума большинства видов, что основано на биоценотическом принципе Тинемана (Реймерс, 1994). Развитие олиготрофных видов связано с дефицитом биогенных элементов вследствие небольшой площади водосбора. Кроме того, уменьшение значений рН вод привело к нарушению круговорота биогенных веществ, и водоём начал приобретать черты дистрофии. Также подкисление вод, вероятно, обусловило преобладание планктона над ранее доминировавшими эпифитными видами в виду деградации большей части водной растительности в слабокислых условиях, либо замещении её сфагновыми мхами. В современности воды Витальевского озера имеют рН в районе 7,4-6,2 (Степанова и др., 2010), потому можно предположить, что в пост-изоляцияционный период развития водоёма факторы, влияющие на формирование его экологической среды, не претерпели значительных изменений (рис. 5).

В точки зрения литологического состава эта зона представлена грубой однородной гиттией, которая может формироваться только в условиях спокойного гидрологического режима с достаточным количеством органического вещества, что совпадает со сменой в составе диатомовых комплексов и экологических сообществ, которые маркируют момент полной изоляции водоёма и образования самостоятельного озера. Согласно данным радиоуглеродного датирования, это произошло 2790 ± 90 С¹⁴ л.н. (Saarnisto, 2012) или в калиброванном и усреднённом варианте – 2800 ± 200 кал.л.н. (Сапелко и др., 2018) (рис. 6). Предположительно, на тот момент глубина озера составляла < 3,5 м (рис. 6), и к сегодняшнему дню уменьшилась до 1,9 м вследствие заполнения котловины донными осадками.

Заключение

По данным диатомового анализа колонки донных отложений озера Витальевского, было выделено 3 этапа его эволюции, обусловленных изменениями уровня Ладожского озера.

На первом этапе озеро Витальевское являлось частью глубоко врезанного в сушу залива Ладожского озера. Об этом свидетельствует высокое содержание видов – индикаторов поступления ладожских вод в составе диатомовых комплексов. Залив характеризовался слабощелочной реакцией среды, достаточно высоким трофическим статусом, развитием прибрежной растительности, активными гидродинамическими условиями. Последнее заключение подтверждается также литологическим составом донных отложений.

На втором этапе резкое снижение доли индикаторных “ладожских” видов в составе диатомовых комплексов указывает на ослабление связи залива с основной акваторией вследствие падения уровня Ладожского озера. В результате происходит снижение гидродинамической активности в заливе. Водная среда постепенно слабо подкисляется. Проявляются признаки активного зарастания залива, что находит отражение и в изменении литологического состава донных отложений.

Третий этап знаменует полную изоляцию оз. Витальевское от Ладожского озера и начало развития этого водоёма как самостоятельной водной экосистемы. На это указывает полное исчезновение из состава диатомовых комплексов “ладожских” видов, установление доминирования видов-обитателей малых озер. Озеро закисляется, приобретает черты дистрофии. В составе диатомовых комплексов находит отражение смена водной и прибрежной растительности. С этого момента озеро начало активно зарастать, а его котловина – заполняться органическими осадками.

Таким образом, цель текущей работы - реконструкция изменения физико-химических характеристик Витальевского озера в период

постепенного изолирования от Ладожского озера после среднеголоценовой трансгрессии по данным диатомового анализа – была достигнута.

Результаты, полученные с помощью диатомового анализа колонки донных отложений одного из внутренних озёр о.Валаам, способствуют накоплению сведений об эволюции водных экосистем в ходе изменений уровня Ладожского озера.

Благодарности

Автор выражает огромную благодарность к.г.н. Лудиковой Анне Валерьевне (Институт озероведения РАН) за обучение основам диатомового анализа, ценные советы, помощь, в т.ч. в обсуждении результатов, и моральную поддержку, а также сотрудникам ИНОЗ РАН за организацию и проведение летней палеолимнологической экспедиции 2019 г. Кроме того, хочется выразить большую признательность к.г.н. доценту кафедры геоморфологии Института наук о Земле Савельевой Ларисе Анатольевне за проявленное терпение.

Список использованных материалов

1. Бискэ Г. С. Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск: Государственное изд-во Карельской АССР, 1959 г. – 321 с.
2. Воякина Е.Ю. Фитопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: автореф. дисс. ... к.б.н. СПб. – 2007. – 23 с.
3. Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. – Л.: Наука, 1985. – 243 с.
4. Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные Т. 1. Отв. ред. А. И. Прошкина-Лавренко. Л: Наука, 1974. – 403 с.
5. Диатомовый анализ. Книга 1. Отв. ред. А. И. Прошкина-Лавренко. – Л: Госгеоиздат, 1949 – 239 с.
6. Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. Книга 3. Порядок Pennales. Отв.ред. А. И. Прошкина-Лавренко. М.-Л.: Госгеоиздат, 1950 – 398 с.
7. Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина Лавренко А. И., Шешукова В. С. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4. Диатомовые водоросли. – М: Советская наука, 1951 – 619 с.
8. Кирцидели Е.Ю. Пространственное распределение и сезонная динамика мейобентосных сообществ водоемов Валаамского архипелага: автореф. дисс. ... к.б.н. СПб. – 2002. – 23 с.
9. Клейменова Г.И., Вишневская Е.М., Севастьянов Д.В., Латышева Н.М. Новые данные по палеогеографии и палеоэкологии Северо-Западного Приладожья. // Длительные изменения и современное состояние ландшафтов Приладожья. СПб.: Изд-во СПбГУ. – 1995. – 80-90 с.
10. Кошечкин Б.И., Экман И.М. Голоценовые трансгрессии Ладожского озера. // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб: Изд-во РГО, 1993. – 49–60 с.

11. Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Сапелко Т. В., Лудикова А. В.
Гидрографическая сеть северной части Карельского перешейка в голоцене по данным о строении отложений малых озер. // Геоморфология, №1 Геоморфология. – 2015. – № 1. – 54-69 с.
12. Куликова Т. П. Изученность зоопланктона водных объектов республики Карелия. // Труды Карельского научного центра РАН. – 2013. – № 6. – 63-75 с.
13. Куликовский М. С. Диатомовые водоросли некоторых сфагновых болот Европейской части России: автореф. дисс. ... к.б.н. СПб. – 2007 – 26 с.
14. Кучко А. А., Белоусова Н. А., Курхинен Ю. П., Лазарева И. П., Морозова Р. М. Валаам – феномен природы. Петрозаводск.: Изд-во “Карелия”, 1988. – 107 с.
15. Лудикова А. В. История развития и современное состояние водоемов Карельского перешейка и г. Санкт-Петербурга по материалам диатомового анализа донных отложений: Автореф. дисс. ... к.г.н. СПб. – 2008 – 25 с.
16. Лудикова А. В., Субетто Д. А., Давыдова Н. Н., Сапелко Т. В., Арсланов Х. А. Колебания уровня Ладожского озера в голоцене (на основе палеолимнологических исследований оз. Святого Сергия на острове Путсаари). // Известия РГО. – 2005. – Т.137. – № 6. – 34-40 с.
17. Лудикова А. В. Свидетельства среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера по данным диатомового анализа. // Известия РГО. – 2015. – Т. 147. – Вып. 4. – 38-51 с.
18. Маринич М. А. Альгофлора Водной системы Валаамского архипелага. : автореф. дисс. ... к.б.н. СПб. – 1994. – 15 с.
19. Марков В. Е. Геоэкологические исследования донных отложений внутренних водоёмов Валаамского архипелага. // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2011. – № 138. – 95-100 с.

20. Марков К.К., Порецкий В.С., Шляпина Е.В. О колебаниях уровня Ладожского и Онежского озер в послеледниковое время. // Тр. ком. по изуч. четвертич. периода. – 1934. – Т. IV. – Вып. 1. – 71-113 с.
21. Марков К.К. Послеледниковая история юго-восточного побережья Ладожского озера // Вопр. Географии. – 1949 – Вып. 12. – 213–220 с.
22. Матинян Н. Н., Урусевская И. С. Почвы острова Валаам. СПб: Изд-во С-Петербургского университета, 1999. – 32 с
23. Назарова Л. Е. Климат Республики Карелия (Россия): температура воздуха, изменчивость и изменения. // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10. – № 1. – 746-749 с.
24. Распопов И. М. Видовое разнообразие высших водных и прибрежно-водных растений в литоральной зоне Ладожского озера. // Фиторазнообразие Восточной Европы. – 2007. – № 7 – 173-180 с.
25. Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). М: Журнал “Молодая Россия”, 1994 – 367 с.
26. Сапелко Т. В., Кузнецов Д. Д., Корнеев Н. Ю., Денисенков В. П., Лудикова А. В. Палеолимнология внутренних озёр острова Путсаари (Ладожское озеро). // Изв. РГО. – 2014. – Т. 146. – Вып. 3. – 29-40 с.
27. Сапелко Т. В., Терехов А. В., Амантов А. В, Ладожская трансгрессия: реконструкция финальной стадии и последующего спада в северной части озера. // Региональная геология и металлогения. – 2018. – № 75. – 23-24 с.
28. Свириденко Л. П., Светов А. Я. Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008 – 123 с.
29. Степанова А.Б. Зоопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: автореф. дисс. ... к.б.н. СПб. – 1998. – 20 с.

30. Степанова А.Б., Шарафутдинова Г.Ф., Воякина В.Ю. Гидрохимические особенности малых озёр о. Валаам. // Учёные записки Российского Государственного Гидрометеорологического Университета. – 2010. – № 12. – 97-109 с.
31. Субетто Д. А. История формирования Ладожского озера и его соединения с Балтийским морем. // Общество. Среда. Развитие. – 2007. – №1. – 111-120 с.
32. Субетто Д. А., Т. В. Сапелко, Д. Д. Кузнецов, А. В. Лудикова, П. М. Долуханов, Г. И. Зайцева. История формирования стока из Ладожского озера: новые палеолимнологические данные. // Радиоуглерод в археологических и палеоклиматических исследованиях: Материалы конф. К 50-летию радиоуглеродной лаборатории Института истории материальной культуры РАН – 2007. – 381-403 с.
33. Шешукова А. А., Шибина Т. Д., Матинян Н. Н. Минеральный состав магматических почвообразующих пород острова Валаам. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. – 2005. – № 1. – 122-127 с.
34. Bennion H. Surface-sediment diatom assemblages in shallow, artificial, enriched ponds, and implication for reconstructing trophic status // *Diatom Research*. – 1995. – Vol. 10. – 1-19 с.
35. Hedenström A. Early Holocene shore-displacement in southern central Sweden as recorded in elevated isolated basins. // *Boreas*. – 1999. – Vol. 28. – 490-504 с.
36. Juggins S. C2 Version 1.7 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle upon Tyne, UK. 2007.
37. Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae. Süßwasser flora von Mitteleuropa. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1986. – 876 с.

38. Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. Bacillariophyceae. 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa, . Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1998. – 596 c.
39. Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1991a. – 576 c.
40. Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. Bacillariophyceae. 4. Teil: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema, Gesamtliteraturverzeichnis Teil 1-4. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1991b. – 437 c.
41. Renberg I., Hellberg T. The pH History of Lakes in Southwestern Sweden, as Calculated from the Subfossil Diatom Flora of the Sediments. // *Ambio*. – 1992. – Vol. 11. – No. 1. – 30-33.
42. Saarnisto M. Late Holocene land uplift/neotectonics on the Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia. // *Quaternary International*. – 2012. – №260 – 143-152 c.
43. Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari. // *Hydrobiologia*. – 1996. – Vol. 322. – 205-215 c.
44. Sayer C., Roberts N. , Sadler J., David C. and Wade P. M. Biodiversity Changes in a Shallow Lake Ecosystem: A Multi-Proxy Palaeolimnological Analysis. // *Journal of Biogeography*. – 1999. – Vol. 26. – No. 1. – 97-114 c.
45. Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. // *Netherlands journal of aquatic ecology*. – 1994. – Vol. 28 – 117-133 c.

Интернет-ресурсы

1. Валаамский архипелаг. ООПТ: <http://oopt.aari.ru/oopt/Валаамский-архипелаг> (Дата обращения: 24.02.2020)
2. Учебно-научная станция “Валаам”: <http://valaam.rshu.ru> (Дата обращения: 27.02.2020)