

УДК 551.351(470.2)

ГОЛОЦЕНОВОЕ НАКОПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

© 2021 г. Д. Д. Кузнецов^{1,*}, Д. А. Субетто^{2,**}

¹ СПб ФИЦ РАН, Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: dd_kuznetsov@mail.ru

**E-mail: subettoda@herzen.spb.ru

Поступила в редакцию 21.09.2020 г.

После доработки 10.11.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

В десяти колонках донных отложений, отобранных в разных частях Ладожского озера, было проанализировано содержание органического вещества методом измерения потерь при прокаливании. Мощность колонок составила от 0.7 до 1.7 м. Нижняя часть вскрытых отложений формировалась в позднем неоплейстоцене – раннем голоцене, либо в период голоценового климатического оптимума. Во всех разрезах по динамике содержания органического вещества выделено до 5 периодов осадконакопления, имеющих близкие характеристики. Выявлено два периода повышенного накопления органического вещества – в среднем голоцене и в последние 1500 лет. Первый максимум завершается резким снижением содержания органики, также снижение органики отмечено перед началом второго максимума. Данные периоды накопления органического вещества связаны, в основном, с интенсивностью продукционных процессов в Ладожском озере, которые, в свою очередь, являются производной климатических изменений в голоцене. Из палеогеографических событий регионального масштаба (трансгрессивно-регрессивные стадии Балтики, ладожская трансгрессия) лишь стадия Балтийского ледникового озера и его последующая регрессия наиболее отчетливо проявляются в изменениях органогенного осадконакопления. Изменения уровня Ладожского озера, связанные с раннеголоценовой анциловой и среднеголоценовой ладожской трансгрессиями, выражены не столь явно. Выявленные изменения содержания органического вещества зачастую литостратиграфически не выражены, однако, несмотря на хронологическую неполноту отдельных разрезов, общие закономерности изменения содержания органического вещества прослеживаются во всех изученных колонках. Это позволяет использовать данный подход для корреляции разрезов из разных частей озерной котловины.

Ключевые слова: донные отложения, озерное осадконакопление, органическое вещество в отложениях, потери при прокаливании

DOI: 10.31857/S043542812102005X

ВВЕДЕНИЕ

Динамика накопления органического вещества в голоценовых отложениях Ладожского озера подробно изучалась во второй половине XX века [1–3]. Соотношение содержания минерального и органогенного вещества в озерных отложениях и его изменение во времени дают возможность реконструировать периоды максимальной биологической продуктивности водных экосистем и периоды ее спада, которые тесно связаны с колебаниями ряда климатических параметров, в первую очередь температуры [4–6]. Существенную роль могут играть и денудационные процессы на водосборном бассейне озера. Например, резкое увеличение содержания минерального вещества в голоценовых озерных осадках может

свидетельствовать об усилении эрозионных процессов на водосборе [7].

Целями проводимого исследования являются выявление слабых флуктуаций накопления органического вещества в отложениях Ладожского озера в голоцене за счет более высокого разрешения при пробоотборе и выделение общих закономерностей динамики содержания органического вещества в озерных осадках из разных частей котловины, что позволяет обнаружить относительно кратковременные или слабо выраженные изменения палеогеографических условий.

МЕТОДЫ

Колонки донных отложений отбирались в 2016–2017 гг. (кроме колонки со станции 304,

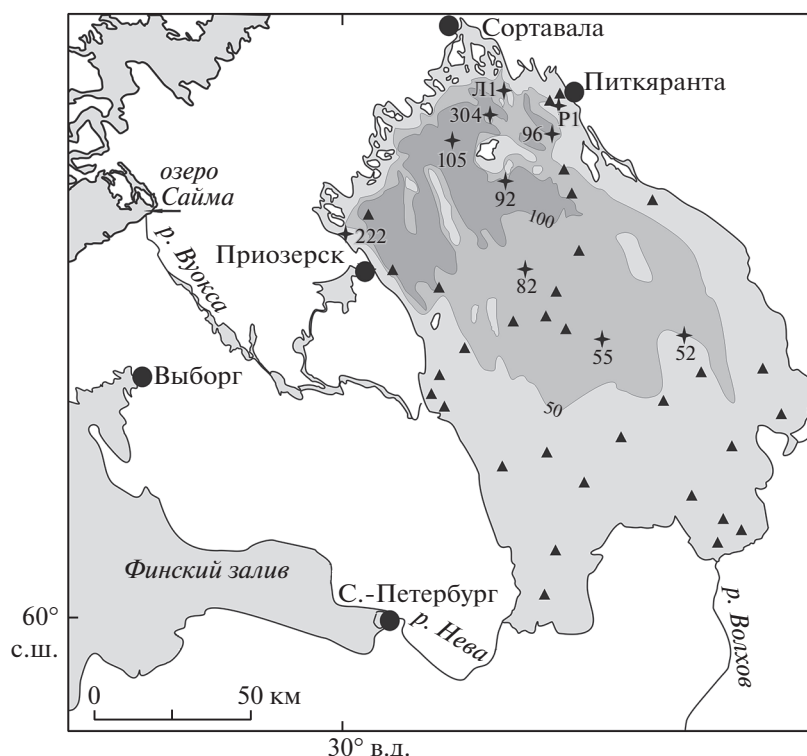


Рис. 1. Местоположение станций пробоотбора (звездочки — колонки, треугольники — поверхностные пробы). Цифрами обозначены номера станций.

отобранной ранее) с научно-исследовательского судна “Эколог” гравитационной грунтовой трубкой типа ГОИН (длина 1.0 или 1.5 м, диаметр 5 см). Далее колонки разбирались по образцам сплошными сегментами по 2 см (за несколькими исключениями). Пробоотбор проводился непрерывно, что исключило потерю данных, возможную при дискретном пробоотборе, когда колонка разбирается на образцы по пакетам, а далее на анализ берется только часть материала.

Поверхностные пробы донных отложений отбирались с помощью дночерпателя Экмана–Берджи; образец брался из наилка мощностью не более 2–3 мм.

Обработан материал из 10 колонок и 40 поверхностных проб со станций, расположенных в различных частях озерной котловины (рис. 1, табл. 1).

Содержание органического вещества оценивалось по потерям при прокаливании (далее ППП). Анализ осуществлялся по следующей методике: перетертый в порошок образец массой 1–2 г сушился при температуре 105°C в течение 2 ч, остужался в эксикаторе до комнатной температуры, взвешивался, прокаливался в течение 6 ч при температуре 500°C, остужался в эксикаторе до комнатной температуры, взвешивался.

Для контроля анализ ППП был повторен для ряда поверхностных проб, которые отбирались на одних и тех же станциях дважды (в 2016 и в 2017 г.).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вскрытые отложения в общем виде представлены гиттиевыми глинами (алеувритами) и глинистыми (алеувритовыми) гиттиями. Иногда в нижних глинистых горизонтах отмечена тонкая слоистость. При общей тонкой размерности отложений в нижних горизонтах колонок иногда встречаются единичные галька и гравий. В большинстве кернов в однородных илах отмечены черные прослои гидротроилита, в некоторых колонках встречены белые вкрапления вивианита. По цвету в нижней части разрезов преобладают серые оттенки, в верхней части цвет меняется в сторону бурого или зеленовато-бурого. Границы постепенные, без резких контактов. В верхних горизонтах иногда встречены железистые корки.

Полученные значения ППП находятся в диапазоне 1.9–12.1%. При этом амплитуда колебаний в пределах одной колонки значительно меньше и составляет не более 4.2%, за исключением двух разрезов из центральной части озера, где диапазон значений составил 9.3 и 8.5%. Отмечена зависимость ($r^2 = 0.53$) между средним значением

Таблица 1. Сведения о станциях и отобранных колонках

Номер станции	Глубина в точке пробоотбора, м	Расстояние от ближайшего берега, км	Вскрытая мощность отложений, м	Среднее значение ППП, %	Минимальное значение ППП, %	Максимальное значение ППП, %
105	182	17	1.20	8.2	6.6	10.2
92	94	26	1.53	7.5	6.6	9.1
Л1	90	1.5	1.45	5.7	4.6	8.5
96	85	12	1.10	7.2	6.0	10.2
55	70	53	1.65	8.3	6.6	10.8
82	66	40	1.27	7.0	2.8	12.1
52	50	34	1.30	4.7	1.9	10.4
222	40	1.5	0.98	3.3	2.1	6.6
P1	39	1	0.95	3.8	2.9	5.3
304	30	13	0.67	2.2	2.0	2.5

ППП в колонке и глубиной озера в точке пробоотбора (рис. 2).

Изучение особенностей накопления органического вещества позволило выделить в каждой из колонок несколько периодов с определенной динамикой органогенного осадконакопления (рост, снижение, стабилизация и т.п.), которые были типичны для всех разрезов; они обозначены буквенными индексами А, В, С, D, Е (рис. 3, табл. 2).

С целью сопоставить полученные результаты голоценовой динамики органогенного осадконакопления с современными условиями был произведен анализ проб с поверхности отложений из 40 точек в разных частях озера.

Диапазон значений ППП в поверхностных пробах донных отложений Ладожского озера составляет 0.19–20.5%. Четко выделяются три области значений в зависимости от глубины (рис. 2). Первая область (№ 1 на рис. 2) со значениями ППП не выше 1.5% (среднее значение 0.5%) отмечена на глубинах от 5 до 40 м. Вторая область (№ 2 на рис. 2) объединяет значения ППП от 0.5 до 9% (среднее 4%) в отложениях, пробы которых отобраны с глубины 30–40 м. В третьей области (№ 3 на рис. 2) значения ППП составляют от 8 до 12% (среднее 10.5%) в отложениях с глубин 35–210 м. В единственной пробе (№ 4 на рис. 2), выделяющейся из данных трех групп, отмечено мак-

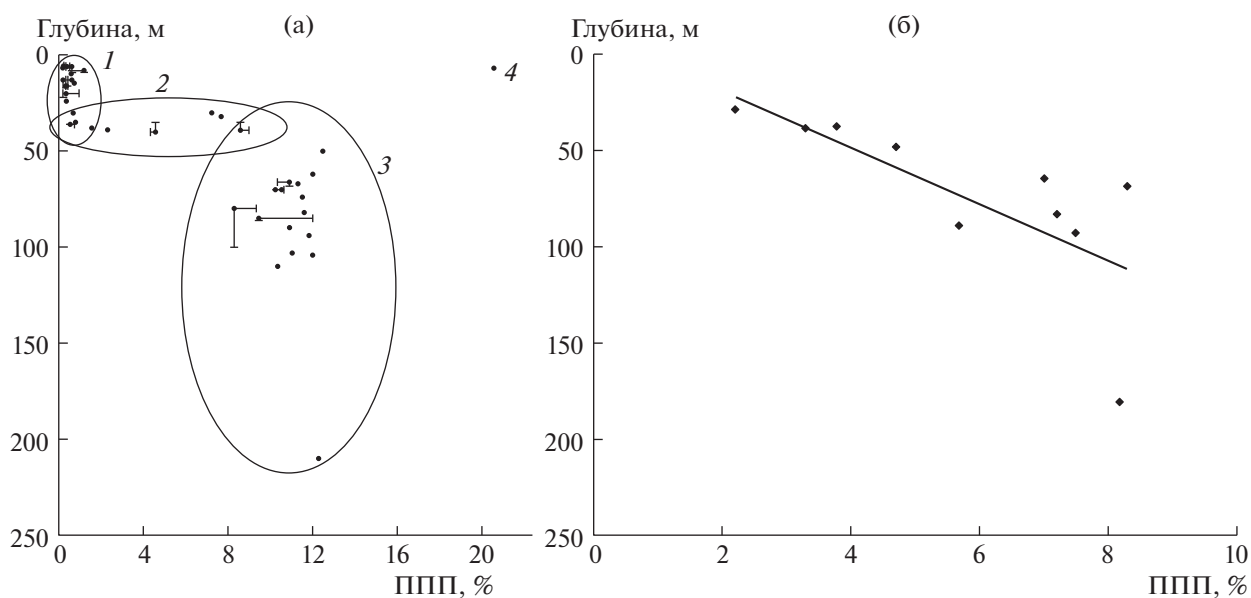


Рис. 2. Зависимость значений ППП поверхностных проб отложений (а) и средних значений ППП в колонках (б) от глубины.

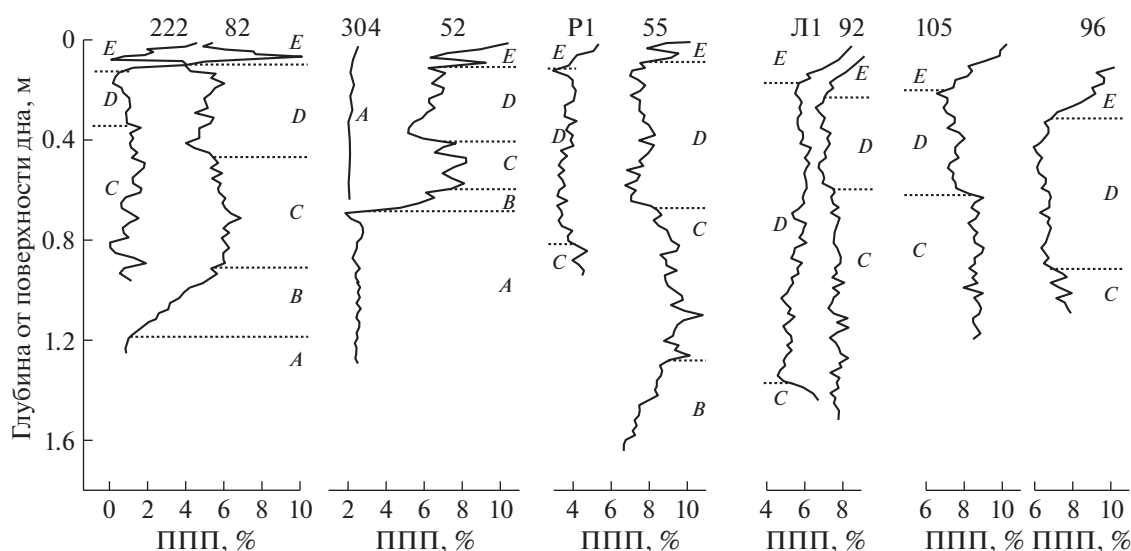


Рис. 3. Динамика содержания органического вещества в исследованных колонках.

симальное (для всех отложений Ладожского озера) содержание органического вещества — 20.5%.

ОБСУЖДЕНИЕ

В исследованных колонках донных отложений Ладожского озера по динамике содержания органического вещества выделено 5 периодов осадконакопления (интервалы А—Е на рис. 3); все они прослеживаются только в колонках, отобранных на 82-й и 52-й станциях (ст.). В колонке, отобранной на 55-й ст., отмечены только 4 периода (В—Е), на 304-й — только один — А. В остальных колонках выделены периоды С, D и Е.

Несмотря на долгую историю изучения отложений Ладожского озера, ранее хронологическая привязка осуществлялась в основном по резуль-

татам спорово-пыльцевого анализа [8, 9], радиоуглеродные датировки осадков были единичны, и только в последнее время их число увеличилось [10–12]. Исходя из радиоуглеродных дат дублирующей колонки станции 82 [12], определен возраст основных периодов осадконакопления.

Период осадконакопления А. Характерно стабильно низкое содержание органического вещества. Значения ППП не превышают 3%, что характерно для позднеплейстоценовых и раннеголоценовых ленточных и гомогенных глин, залегающих в глубоководных частях Ладожского озера под голоценовыми гиттиями (пелитовыми илами) [13]. Граница между периодами А и В отмечена только в двух колонках. В колонке из ЮВ части озера (ст. 52) эта граница эрозионная, с резким спадом значений ППП, что свидетельствует о размыве части отложений, возможно, во время спуска Балтийского ледникового озера около 11600 лет назад [14] (здесь и далее приводится калиброванный возраст). Песчано-алевритовые горизонты между ленточными глинами и перекрывающими их гиттиями ранее отмечались в колонках из южной мелководной части озера. Их формирование также связывалось с эрозией во время спуска Балтийского ледникового озера [3], но назывались и другие причины, как, например, пониженный уровень бассейна в конце пребореала [15], или увеличение общей увлажненности на границе бореального и атлантического времени [1]. В центральной части озера (ст. 82) переход от стабильно низкого накопления органики к росту происходит постепенно, из чего можно сделать вывод, что спуск Балтийского ледникового озера привел к размыву отложений только в периферийной части акватории.

Таблица 2. Значения ППП в выделенных периодах органического осадконакопления

Номер станции	Диапазон значений ППП, %				
	А	В	С	Д	Е
105	—	—	7.9–9.0	6.6–8.0	7.4–10.2
92	—	—	7.2–8.3	6.6–7.4	6.9–9.1
Л1	—	—	5.9–6.7	4.6–6.3	6.1–8.5
96	—	—	6.9–7.9	6.0–6.9	6.9–10.2
55	—	6.6–9.0	8.2–10.7	6.7–8.3	7.8–10.1
82	2.8–3.0	3.3–7.7	7.2–8.9	6.0–8.0	6.9–12.1
52	1.9–2.8	4.7–7.5	6.6–8.2	5.2–7.1	6.3–10.4
222	—	—	2.1–3.9	2.2–3.1	2.1–6.6
P1	—	—	4.0–4.7	2.9–4.2	3.8–5.3
304	2.0–2.5	—	—	—	—

Период осадконакопления В. Характерен устойчивый рост содержания органического вещества, постепенный в центральной части озера (ст. 82 и 55) и резкий в юго-восточной части (ст. 52). Голоценовое потепление привело к постепенному повышению продуктивности озерной экосистемы [16]. В это время Ладожское озеро, отделившись от Балтийского моря (стадия Иольдиевого моря в Балтике), развивается самостоятельно. Соединение с последним происходит в северной части Карельского перешейка через систему сообщающихся озер и проток [17]. После возникновения и трансгрессии Анцилового озера север Карельского перешейка и Ладожское озеро становятся его частью. Спуск Анцилового озера приводит к началу автономного развития Ладожского озера, пролив на севере Карельского перешейка превращается в озерно-речную систему. Все эти события, происходившие в период 11600–9800 л. н. [14], сопровождаются значительными изменениями площади акватории Ладоги. Считается, что южная часть современной ладожской котловины в некоторые периоды первой половины голоцена полностью осушалась [15]. В этой связи важно отметить, что характер органического осадконакопления при переходе от иольдиевой стадии к анциловой и далее к собственно ладожской в изученных разрезах существенно не меняется. Устойчивый рост содержания органического вещества в осадках происходит равномерно, лишь на графике значений ППП ст. 55 в середине данного периода отмечена небольшая ступень, возможно связанная с окончательной изоляцией Ладожского озера.

Период осадконакопления С. Рост содержания органического вещества в отложениях прекращается, происходит его относительная стабилизация на высоких значениях, но с сохранением значительных флуктуаций ППП. Это период климатического голоценового оптимума. В предыдущих исследованиях отложения с максимальным содержанием органического вещества, опираясь на данные спорово-пыльцевого анализа, были датированы атлантическим оптимумом голоцена [15, 2]. При этом мощность этих отложений колеблется от 0.4 до 1.5 м [15]. В колонке со ст. 82 отложения с повышенным содержанием органического вещества (период С) по данным радиоуглеродного анализа формировались в интервале 9000–4800 л. н., их мощность составляет 0.5 м [12]. В атлантическом периоде для исследуемой территории выделены многочисленные фазы потепления/похолодания [9]. Данный временной промежуток в целом совпадает с голоценовым термическим оптимумом, выделенным для колонки со ст. 1309 во временном интервале 9500–4500 л. н. [11]. Из региональных событий, близких по времени и, возможно, повлиявших на характер осадконакопления, надо отметить прорыв реки

Вуоксы, произошедший около 6000 лет назад [18]. Возможно, именно с ним связан перелом на кривых распределения ППП, наиболее отчетливый в центральной части озера (станции 82 и 55); после чего, несмотря на по-прежнему высокие значения содержания органического вещества, отмечается тренд к его снижению. Однако возрастная модель (последовательность имеющихся радиоуглеродных датировок) формирования отложений со ст. 82 [12] дает более ранний возраст этого перелома, что свидетельствует, возможно, в пользу общеклиматических причин последнего.

Граница между периодами С и D выделена по резкому падению значений ППП, после чего органическое вещество накапливалось в гораздо меньшем, относительно предыдущего периода, количестве. Не во всех разрезах этот спад выражен настолько ясно, чтобы быть однозначно определяемым в качестве границы между периодами (станции 222, Р1, Л1). Это связано с близким (до 2 км) расположением данных станций от берега и, соответственно, с возрастанием роли локальных денудационных процессов в соотношении “минеральное/органическое вещество”. На станциях, расположенных в центральной части озера (станции 52, 55, 82), влияние на осадконакопление процессов, происходящих на водосборе и в области прибрежно-волновой активности, минимально. Тем не менее здесь падение содержания органического вещества в разрезах донных отложений на границе периодов С и D выражено настолько заметно, что свидетельствует о значительной перестройке гидродинамических и гидробиологических условий в озере. Данный спад объясняется уменьшением продуктивности экосистемы озера, связанным с суббореальным похолоданием, на которое наложились резкие гидродинамические изменения, приведшие к привносу и осаждению большого количества тонкого минерального материала.

Период осадконакопления D. Содержание органического вещества в отложениях стабилизируется на относительно низких значениях, но флуктуации значений ППП сохраняются. В некоторых разрезах отмечен выраженный подъем содержания органики в середине или ближе к концу периода. Временные границы для этого периода по полученным для отложений ст. 82 радиоуглеродным датировкам составляют 4800 и 1800 л. н. В начале суббореального времени здесь происходило похолодание, далее отмечается несколько периодов потепления/похолодания [9]. Суббореальная ладожская трансгрессия приводит к затоплению обширных территорий в южной части современной котловины и прибрежных низменностей, в первую очередь, южного побережья Ладоги. Отмечается несколько эпизодов трансгрессии, последний из которых закончился образованием

Невы (около 3400 л. н.) и спуском уровня озера до современных отметок [17, 19, 20].

Граница между периодами D и E отмечена по падению значений ППП до минимума и началу их резкого устойчивого роста. Здесь, в отличие от границы C/D, спад выражен не настолько явно, за исключением колонки со ст. 82.

Спад в содержании органического вещества в донных отложениях при падении уровня Ладожского озера после образования реки Невы отмечался ранее [15]. Резкое падение уровня озера может отразиться на соотношении минерального и органического вещества следующим образом. Первоначально в озере, особенно в его литоральной зоне, происходит увеличение доли минерального вещества в осадках, вызванное переформированием береговой линии, сопровождающимся увеличением эрозии. В пелагиали этот сценарий может быть выражен не явно. Далее за счет уменьшения глубины и, соответственно, сокращения времени осаждения детрита на дно возможно увеличение в осадках доли органического вещества. При таком сценарии падение уровня Ладоги после прорыва реки Невы можно связать с границей между периодами D и E, но этому противоречат радиоуглеродные датировки, полученные для колонки со ст. 82, по которым резкий спад значений ППП произошел не ранее 1800 л. н. [12].

Период осадконакопления E. Происходит быстрый или умеренный рост содержания органики в донных отложениях до максимальных значений. Возраст начала этого периода не ранее 1700 л. н. Пик содержания органического вещества отмечается или в поверхностных горизонтах отложений, или в иногда ожелезненных горизонтах, расположенных на глубине 0.06–0.10 м от поверхности воды. В колонках из центральной части озера (52, 55, 82) и со ст. 222 резкий рост ППП прерывается резким же их падением с последующим быстрым возобновлением роста. Высокие значения содержания органического вещества в кровле отложений и их некоторое сокращение в нижележащих осадках (мощность периода E составляет 10–20 см) отчасти связаны с деструкцией органики в ходе диагенетических преобразований. Этими же процессами обусловлены образование рудных корок и двойной пик значений ППП, отмеченные в ряде разрезов в их верхних частях. Эти процессы не исключают природно-климатических причин роста органического вещества на последнем этапе развития озера, так как рост продуктивности озерной экосистемы и повышение его трофического статуса отмечены в субатлантическое время [16].

В целом полученные результаты хорошо согласуются с данными предыдущих исследований. Средние значения ППП для поверхностного слоя

отложений в открытой части Ладожского озера в тонких осадках составляют 5–8%, при диапазоне от 2 до 12% [1, 13]. Реже отмечались более высокие значения – 10–24% [21].

Важно отметить значительную разницу в мощности отложений, соответствующих выделенным периодам. В самой глубоководной части озера, где должна формироваться максимальная толщина отложений, осадки могут иметь мощность меньше, чем в точке с меньшей глубиной, что подчеркивает мозаичный характер осадконакопления в Ладожском озере, зависимость от локальных морфометрических особенностей озерной котловины, гидродинамических условий и пр.

Особенностью изученных разрезов является частое отсутствие визуально выраженной литологической границы между разными периодами осадконакопления.

Диапазон значений ППП в колонках донных отложений в 2–12% в целом совпадает с диапазоном значений ППП в поверхностных пробах.

Выявленная зависимость между глубиной точки пробоотбора и содержанием органического вещества в поверхностных пробах напрямую зависит от гранулометрического состава отложений, который, в свою очередь, связан с морфометрическими характеристиками озерной котловины и гидродинамическими процессами. В мелководной части озера (до глубин 20–30 м) преобладают крупные песчано-алевритовые осадки, и, соответственно, в них значения ППП минимальны. В глубоководной части озера происходит аккумуляция преимущественно тонкого взвешенного материала, в том числе и органического, что отражается в повышении значений ППП. Участки озера с глубинами 30–40 м являются в этом смысле переходными, где осадконакопление может происходить по обоим сценариям.

В современных поверхностных пробах на глубинах свыше 40 м значения ППП составляют 8–12%, а на глубинах до 25–30 м – преимущественно 0.2–1.5%. В целом средние значения ППП в колонке тем выше, чем глубоководнее станция пробоотбора. Если не принимать во внимание раннеголоценовые этапы осадконакопления, то колонки со станций 82, 92, 96, 105 (т.е. с глубин свыше 66 м) сложены глинистой гиттией (ППП > 6%). Колонки со станций 222, P1, (т.е. с глубин около 40 м) и значительная часть колонки Л1 (с глубины 90 м) сложены гиттиевой глиной (ППП от 2 до 6%). При этом общий диапазон значений ППП в колонках может достигать 9%. Если в современных поверхностных пробах на глубинах свыше 40 м значения ППП превышают 8%, то в течение голоцена на аналогичных глубинах могли формироваться осадки с гораздо меньшим содержанием органического вещества. Таким образом, наблюдаемая в настоящее время в поверхностных

пробах зависимость ППП от глубины, в образцах из изученных колонок не подтверждается.

В каждой точке озерной котловины характер осадконакопления зависит от наложения общерегиональных факторов, связанных с гидродинамическими, гидрохимическими и гидробиологическими условиями в озере, на местные особенности данной части котловины, такие как рельеф и уклон дна, глубина, расстояние от берега и т.п. Для Ладожского озера отмечена очень большая мозаичность в структуре осадков, что объясняется его сложной голоценовой историей со значительными изменениями уровня, площади, характера проточности, тектоническими движениями. Все это, в сочетании со сложным рельефом дна, приводит к тому, что на расстоянии в несколько километров характер отложений может быть принципиально разным. В этой связи крайне важной с точки зрения дальнейшего исследования голоценовой истории озера представляется детализация общих для всей акватории эпизодов в динамике содержания органического вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В колонках, отобранных на станциях, расположенных в различных частях Ладожского озера, обнаружено отчетливое сходство в голоценовой динамике накопления органического вещества. Это позволило выделить 5 периодов органического осадконакопления. В большинстве колонок донных отложений отмечено два периода повышенного накопления органического вещества — в среднем голоцене и в последние 1500 лет. Выделены и эпизоды резкого спада содержания органики — завершающий первый максимум и предвещающий второй. Наибольшее сходство в динамике органического вещества отмечено в колонках, отобранных из центральной части озера, где влияние береговых процессов на осадконакопление минимально.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность всем участникам экспедиций на Ладожском озере, коллегам из Института озероведения РАН, команде судна “Эколог”, студентам СПбГУ и РГПУ им. А.И. Герцена, оказавшим большую помощь при проведении данного исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН по теме № 0154-2019-0001 (Д.Д. Кузнецов) и в рамках государственного задания Министерства просвещения России по проекту № FSZN-2020-0016 (Д.А. Субетто) при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-05-80087 — Опасные явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера. М.—Л.: Наука, 1966. 124 с.
2. Subetto D.A., Davydova N.N., and Rybalko A.E. Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1998. No. 140. P. 113–119.
3. Субетто Д.А. Строение, особенности и история формирования донных отложений // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 122–136.
4. Россолимо Л.Л. Озерное накопление органического вещества и возможности его типизации // Типология озерного накопления органического вещества. М.: Наука, 1976. С. 3–10.
5. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Н.А. Петрова. Л.: Наука, 1982. 304 с.
6. Методические аспекты лимнологического мониторинга / И.С. Трифонова. Л.: Наука, 1988. 180 с.
7. Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А., Сапелько Т.В., Лудикова А.В. Гидрографическая сеть северной части Карельского перешейка в голоцене по данным о строении отложений малых озер // *Геоморфология*. 2015. № 1. С. 54–69.
8. Абрамова С.А., Давыдова Н.Н., Квасов Д.Д. История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов // История озер Северо-Запада. 1967. С. 113–132.
9. Delusin I. The Holocene pollen stratigraphy of Lake Ladoga and vegetational history of its surroundings // *Annales Academiae Scientiarum Fennicae*. 1991. Series A III 153. 66 p.
10. Арсланов Х.А., Гей Н.А., Давыдова Н.Н., Джиноридзе Р.Н., Кошечкин Б.И., Пушенко М.Я., Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Субетто Д.А., Хомутова В.И. Новые данные по позднеплейстоценовой и голоценовой истории Ладожского озера // *Изв. РГО*. 1996. Т. 128. С. 12–21.
11. Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Savellieva L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., and Melles M. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // *Boreas*. 2019. Vol. 48. P. 330–348.
12. Sapelko T., Pozdnyakov S., Kuznetsov D., Ludikova A., Ivanova E., Guseva M., and Zazovskaya E. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga // *Quaternary International*. 2019. Vol. 524. P. 67–75.
13. Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. 343 с.
14. Björck S. The late Quaternary development of the Baltic Sea basin // *Assessment of climate change for the Baltic Sea Basin*. Berlin, Heidelberg, 2008. P. 398–407.
15. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Д.Д. Квасов, Г.Г. Мартинсон, А.В. Раукас. Л.: Наука, 1990. 280 с.
16. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли — индикаторы экологических условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
17. Dolukhanov P.M., Subetto D.A., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Zaitseva G.I., Djinoridze E.N., Kuznetsov D.D.,

- Ludikova A.V., Sapelko T.V., and Savelieva L.A.* The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia // Quaternary International. 2009. Vol. 203. P. 33–51.
18. *Saarnisto M.* The Late Weichselian and Flandrian history of the Saimaa Lake Complex // Societas Scientiarum Fennica, Commentationes Physico-Mathematicae. 1970. Vol. 37. 107 p.
19. *Saarnisto M. and Grönlund T.* Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 205–215.
20. *Александровский А.Л., Арсланов Х.А., Давыдова Н.Н., Долуханов П.М., Зайцева Г.И., Кирпичников А.Н., Кузнецов Д.Д., Лавенто М., Лудикова А.В., Носов Е.Н., Савельева Л.А., Сапелко Т.В., Субетто Д.А.* Новые данные относительно трансгрессии Ладожского озера, образования реки Невы и земледельческого освоения Северо-запада России // ДАН. 2009. Т. 424. № 5. С. 682–687.
21. *Белкина Н.А., Субетто Д.А., Ефременко Н.А., Потахин М.С., Кулик Н.В.* Химический состав донных отложений северной части Ладожского озера как показатель многолетней изменчивости экосистемы водоема // Тр. Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 53–61.

Holocene organic sedimentation in Lake Ladoga

D. D. Kuznetsov^{a,#} and D. A. Subetto^{b,##}

^a Institute of Limnology of the RAS, Saint-Petersburg, Russia

^b Herzen State Pedagogical University, Saint-Petersburg, Russia

[#]E-mail: dd_kuznetsov@mail.ru

^{##}E-mail: subettoda@herzen.spb.ru

Organic matter content was analyzed in 10 sediment cores retrieved from different parts of Lake Ladoga using the loss on ignition (LOI). The thickness of retrieved sediments varies from 0.7 to 1.7 m. The lower part of the sediment sequences was formed in the Late Pleistocene – Early Holocene, or during the Holocene climatic optimum. Up to five periods of organic sedimentation were recognized in all studied cores. Two periods of higher organic content were distinguished corresponding to the Mid Holocene and the recent 1500 years, respectively. The first maximum in the Mid Holocene ends with a sharp decrease in the content of organic matter; a decrease in organic matter occurred before the beginning of the second maximum. All recognized periods are believed to primarily result from changing productivity of the Lake Ladoga ecosystem, which relates in turn to climatic changes during the Holocene. Among regional-scale paleogeographic events (transgressive and regressive stages of the Baltic paleobasins, Ladoga transgression) only the Baltic Ice Lake stage and its regression can be clearly recognized in changing organic sedimentation. Lake-level changes resulted from the Early Holocene Ancylus transgression and the Mid Holocene Ladoga level rise are less visible in the organic matter content. Similar trends in organic concentrations can be identified in all studied sediment sequences even though some of them are incomplete. Since the changes in organic matter content are often not expressed in lithology, this approach can be applied for correlation of the sediment sequences from different parts of the lake.

Keywords: lake sediments, lacustrine sedimentation, organic matter in sediments, loss on ignition

ACKNOWLEDGMENTS

Authors are grateful to all participants of expeditions to Lake Ladoga, the colleagues of Institute of Limnology, the crew of the research vessel Ecolog, the students of SPbGU and RGPU, whose help was incredible.

The study contributes to the State Research Project of IL RAS No. 0154-2019-0001 (D. Kuznetsov) and to the State Research Project of Ministry of Education No. FSZN-2020-0016 (D. Subetto) and is partly supported by the RFBR project No. 18-05-80087 – Opasnye javleniya.

REFERENCES

1. *Semenovich N.I.* *Donnye otlozheniya Ladozhskogo ozera* (Bottom sediments of Lake Ladoga). M.–L.: Nauka (Publ.), 1966. 124 p. (in Russ.)
2. *Subetto D.A., Davydova N.N., and Rybalko A.E.* Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1998. No. 140. P. 113–119. (in Russ.)
3. *Subetto D.A.* *Stroenie, osobennosti i istoriya formirovaniya donnykh otlozhenii* (Structure, features, and history of bottom sediment formation). *Ladozhskoe ozero: proshloe, nastoyashchee, budushchee* (Lake Ladoga: past, present, future). SPb.: Nauka (Publ.), 2002. P. 122–136. (in Russ.)
4. *Rossolimo L.L.* *Ozernoe nakoplenie organicheskogo veshchestva i vozmozhnosti ego tipizatsii* (Lake accumulation of organic matter and the possibility of its typification). *Tipologiya ozernogo nakopleniya organicheskogo veshchestva* (Typology of lake accumulation of organic matter). M.: Nauka (Publ.), 1976. P. 3–10. (in Russ.)
5. *Antropogennoe evtrofirovanie Ladozhskogo ozera* (Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga). N.A. Petrova (Ed.). L.: Nauka (Publ.), 1982. 304 p. (in Russ.)

6. *Metodicheskie aspekty limnologicheskogo monitoringa* (Methodological aspects of limnological monitoring). I.S. Trifonova (Ed.). L.: Nauka (Publ.), 1988. 180 p. (in Russ.)
7. Kuznetsov D.D., Subetto D.A., Sapelko T.V., and Ludikova A.V. *Gidrograficheskaya set' severnoi chasti Karel'skogo peresheika v golotsene po dannym o stroenii otlozhenii malykh ozer* (North Karelian hydrographic system in the Holocene according to new data on small lakes sediment structure). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2015. No. 1. P. 54–69. (in Russ.)
8. Abramova S.A., Davydova N.N., and Kvasov D.D. *Istoriya Ladozhskogo ozera v golotsene po dannym sporovopyl'tsevo i diatomovogo analizov* (History of Lake Ladoga in the Holocene according to spore-pollen and diatom analyses). *Istoriya ozer Severo-Zapada*. 1967. P. 113–132. (in Russ.)
9. Delusin I. The Holocene pollen stratigraphy of Lake Ladoga and vegetational history of its surroundings. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae*. 1991. Series A III 153. 66 p.
10. Arslanov Kh.A., Gei N.A., Davydova N.N., Dzhinoridze R.N., Koshechkin B.I., Pushenko M.Ya., Rybalko A.E., Spiridonov M.A., Subetto D.A., and Khomutova V.I. *Novye dannye po pozднеpleistotsenovoi i golotsenovoi istorii Ladozhskogo ozera* (New data on the late Pleistocene and Holocene history of Lake Ladoga). *Izvestiya RGO*. 1996. Vol. 128. P. 12–21. (in Russ.)
11. Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Saveliya L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., and Melles M. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments *Boreas*. 2019. Vol. 48. P. 330–348.
12. Sapelko T., Pozdnyakov S., Kuznetsov D., Ludikova A., Ivanova E., Guseva M., and Zazovskaya E. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga. *Quaternary International*. 2019. Vol. 524. P. 67–75.
13. Subetto D.A. *Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii* (Lake bottom sediments: paleolimnological reconstructions). SPb.: Izd-vo RGPU im. A.I. Gertsena (Publ.), 2009. 343 p. (in Russ.)
14. Björck S. The late Quaternary development of the Baltic Sea basin. *Assessment of climate change for the Baltic Sea Basin*. Berlin, Heidelberg. 2008. P. 398–407.
15. *Istoriya Ladozhskogo, Onezhskogo, Pskovsko-Chudskogo ozer, Baikala i Khanki* (History of the USSR lakes. The history of the Ladoga, Onega, Peipsi, Baikal and Khanka lakes). D.D. Kvasov, G.G. Martinson, A.V. Raukas (Eds.). L.: Nauka (Publ.), 1990. 280 p. (in Russ.)
16. Davydova N.N. *Diatomovye vodorosli – indikatory ekologicheskikh uslovii vodoemov v golotsene* (Diatoms as indicators of ecological conditions of lakes in the Holocene). L.: Nauka (Publ.), 1985. 244 p. (in Russ.)
17. Dolukhanov P.M., Subetto D.A., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Zaitseva G.I., Djinnoridze E.N., Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Sapelko T.V., and Savel'eva L.A. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia. *Quaternary International*. 2009. Vol. 203. P. 33–51.
18. Saarnisto M. The Late Weichselian and Flandrian history of the Saimaa Lake Complex. *Societas Scientiarum Fennica, Commentationes Physico-Mathematicae*. 1970. Vol. 37. 107 p.
19. Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari. *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 205–215.
20. Aleksandrovskii A.L., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Dolukhanov P.M., Zaitseva G.I., Kirpichnikov A.N., Kuznetsov D.D., Lavento M., Ludikova A.V., Nosov E.N., Savel'eva L.A., Sapelko T.V., and Subetto D.A. *Novye dannye otnositel'no transgressii Ladozhskogo ozera, obrazovaniya reki Nevy i zemledel'cheskogo osvoeniya Severo-zapada Rossii* (New data on the transgression of Lake Ladoga, the formation of the Neva river, and agricultural development in the North-West of Russia). *Doklady Akademii nauk*. 2009. Vol. 424. No. 5. P. 682–687. (in Russ.)
21. Belkina N.A., Subetto D.A., Efremenko N.A., Potakhin M.S., Kulik N.V. *Khimicheskii sostav donnykh otlozhenii severnoi chasti Ladozhskogo ozera kak pokazatel' mnogoletnei izmenchivosti ekosistemy vodoema* (Chemical composition of bottom sediments of the Northern part of Lake Ladoga as an indicator of long-term variability of lake ecosystem). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2015. No. 9. P. 53–61. (in Russ.)