

ИСТОРИЯ БЕЛОГО МОРЯ В ПАЛЕОАРХИВАХ ОЗЕР И БОЛОТ ЕГО ПОБЕРЕЖЬЯ

УДК 551.89

ХРОНО- И ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОСТРОВА АНЗЕР (СОЛОВЕЦКИЕ ОСТРОВА) В КОНТЕКСТЕ ПОСЛЕЛЕДНИКОВОЙ ИСТОРИИ БЕЛОГО МОРЯ

© 2022 г. Д. Д. Кузнецов^{а, *}, А. В. Лудикова^а, Д. А. Субетто^б, П. А. Леонтьев^б, И. М. Греков^б,
М. С. Потахин^{с, d}, Т. В. Сапелко^а, Л. С. Сырых^б, Д. С. Толстобров^е

^аИнститут озераведения РАН – СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

^бРоссийский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

^сКарельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия

^дПетрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

^еГеологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

*e-mail: dd_kuznetsov@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2022 г.

После доработки 16.06.2022 г.

Принята к публикации 18.08.2022 г.

Проведены палеолимнологические работы на 9 внутренних озерах о. Анзер (Соловецкие острова, Белое море). Выявленные изменения в литостратиграфии и содержании органического вещества в донных отложениях отражают изменения условий осадконакопления, связанные с изоляцией от крупных бассейнов. Изучение голоценовой динамики накопления озерных органических отложений (органонакопления) в озерах, расположенных ниже 22 м над ур. м., позволило выделить три периода, соответствующих основным стадиям развития озер. Ранняя стадия соответствует вхождению в состав крупного бассейна (приледникового или морского) и характеризуется наиболее низким содержанием органического вещества. На стадии изоляции отмечено формирование тонкослоистых отложений, в которых содержание органического вещества резко возрастает. Для стадии изолированного озера характерно накопление высокоорганических осадков. Скорость накопления гиттии составила около 0.2–0.3 мм/год. В озерах Соловецкого архипелага, расположенных на отметках 22–35 м над ур. м., озерное осадконакопление происходило, начиная с 10 500–11 000 кал. л. н. Выявлена зависимость возраста изоляции озер от их высотного положения. Установление времени изоляции озер и начала озерного осадконакопления позволило построить кривую перемещения береговой линии Белого моря во второй половине голоцена для о. Анзер. Около 4800–4400 кал. л. н. относительный уровень моря находился на отметках ниже 11 м над ур. м., а около 1900–1700 кал. л. н. береговая линия отступила ниже 2 м над ур. м. Скорость отступления береговой линии (регрессии) составила около 2–3 мм/год. Скорректировано положение верхней морской границы для данного региона в диапазоне 17–21 м.

Ключевые слова: голоцен, изоляционные бассейны, озерное осадконакопление, органическое вещество в донных отложениях, потери при прокаливании, перемещение береговой линии моря

DOI: 10.31857/S2587556622060085

ВВЕДЕНИЕ

Послеледниковое развитие Белого моря имеет сложную историю, на которую здесь накладывались эвстатические изменения уровня Мирового океана и тектонические движения, амплитуда которых менялась в широких пределах. К настоящему времени накоплен значительный массив данных, посвященных различным аспектам голоценовой палеогеографии как самого Белого моря, так и прилежащих областей (например, Колька, Корсакова, 2017; Лаврова, 1968; Полякова и др., 2014; Рыбалко и др., 2017). Важным направлением

исследований является установление хронологии голоценового перемещения береговой линии моря. Установлено, что скорости и направления этого перемещения значительно отличаются в пространстве и времени, что обусловлено неоднородностью голоценовых тектонических движений. Принципиальным методом для детализации перемещения береговой линии служит метод изоляционных бассейнов, при котором датируются переходные горизонты отложений озер, бывших на определенных этапах своей истории частью морского бассейна. Данный метод широко применяется в палеогеографических исследованиях

на Белом море последние 20 лет (например, Колька, Корсакова, 2017; Колька и др., 2018; Романенко, Шилова, 2012; Субетто и др., 2012; Ludikova et al., 2021).

Дегляциация котловины Белого моря происходила в период от 18000–17000 до 11500 кал. л. н. (Svendsen et al., 2004). По мере отступления ледника в котловине Белого моря образовалась серия приледниковых озер. Проникновение морских вод в центральную и северо-западную части Белого моря произошло уже в позднем аллереде (например, Евзеров и др., 2007). В результате позднедрасового похолодания (невская стадия валдайского оледенения, ~13000 кал. л. н.) ледник снова распространился на большую часть беломорской котловины, а Соловецкий архипелаг и Онежский полуостров являлись ледоразделом между Онежской и Двинской ледниковыми лопастями (Demidov et al., 2006). Примерно в это же время на Соловецком архипелаге сформировался мощный покров ледниковых отложений (Рыбалко и др., 2017).

Разница в глубинах северо-западной и центральной частей Белого моря (>100–200 м) и Онежского залива (<50 м) позволила предположить разные сценарии их дегляциации. Глубоководные обстановки северо-западного и центрального районов способствовали всплыванию ледникового языка, и как следствие, более быстрому его таянию и разрушению (Лаврова, 1968). В свою очередь, в мелководном Онежском заливе глыбы и поля мертвого льда могли сохраняться более длительное время (Белое ..., 1977), что замедляло ход дегляциации. Это объясняет различия в амплитудах и скоростях относительного перемещения береговой линии в указанных районах беломорского побережья.

Остров Анзер – второй по площади остров Соловецкого архипелага, находящегося на границе между мелководным Онежским заливом и центральной глубоководной впадиной Белого моря. Благодаря своему расположению, он является ключевой площадкой для реконструкции относительного перемещения береговой линии в южной части беломорского бассейна в послеледниковое время.

Динамика содержания органического вещества в колонках донных отложений озер позволяет реконструировать переход от условий крупного бассейна (морского или пресноводного) к обстановкам малого изолированного озера. Анализ содержания органического вещества, оцениваемого через потерю массы после прокаливания, представляет собой экономичный и эффективный метод изучения отложений изоляционных бассейнов, широко используемый во всем мире (например, Cayer and Bhiry, 2014; García-Rodríguez et al., 2001; Long et al., 2011; Miettinen et al.,

1999; Snyder et al., 1997; Sterken et al., 2012). Несмотря на растущее количество исследований, посвященных эволюции изоляционных бассейнов беломорского региона, содержание органического вещества в донных отложениях изучалось здесь недостаточно широко. Так, результаты определения потерь при прокаливании (ППП) были использованы для реконструкции изоляции серии малых водоемов, расположенных в районе Беломорска (Lunkka et al., 2012), на о. Большом Соловецком (Кузнецов и др., 2018; Ludikova et al., 2021), Онежском полуострове (Леонтьев и др., 2016; Кузнецов и др., 2018), а также при изучении донных осадков современных изоляционных бассейнов (Вахрамеева, Лосюк, 2021).

В настоящей статье представлены результаты хроно- и литостратиграфического изучения и анализа содержания органического вещества в донных отложениях малых озер о. Анзер. Цель данного исследования: выявление динамики содержания органического вещества в ядрах донных отложений в результате смены условий – от крупного бассейна к малому озеру, и установление хронологических рамок основных этапов осадконакопления в озерах о. Анзер. Датирование переходных горизонтов из отложений озер, расположенных на разных высотных отметках, позволило в первом приближении реконструировать динамику береговой линии о. Анзер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Соловецкий архипелаг расположен во внешней части Онежского залива Белого моря (рис. 1), в пределах Кандалакшской рифтовой зоны, на границе Балтийского щита и Русской плиты (Макаров и др., 2007). Кристаллический фундамент Соловецкого архипелага имеет архей-раннепротерозойский возраст и представляет собой разбитый разломами горст. По данным магнитометрического изучения, породы верхней части фундамента представлены гранитогнейсами, амфиболитами и брекчиями (Природная ..., 2007). Породы фундамента перекрыты мощным чехлом рыхлых четвертичных образований, представленных ледниковыми, водно-ледниковыми и озерно-ледниковыми осадками позднего плейстоцена и морскими, озерными и болотными отложениями голоценового возраста.

Современный рельеф Соловецкого архипелага является результатом наложения тектонических и ледниковых процессов, а также перемещения относительного уровня моря (Природная ..., 2007). Ледниковые формы рельефа представлены холмами и грядами различной ориентировки, сложенными суглинисто-песчаным материалом с галькой и щебнем кристаллических пород. Водно-ледниковые формы рельефа сложены слоистыми песками с гравием и галькой (Соловецкие ...,

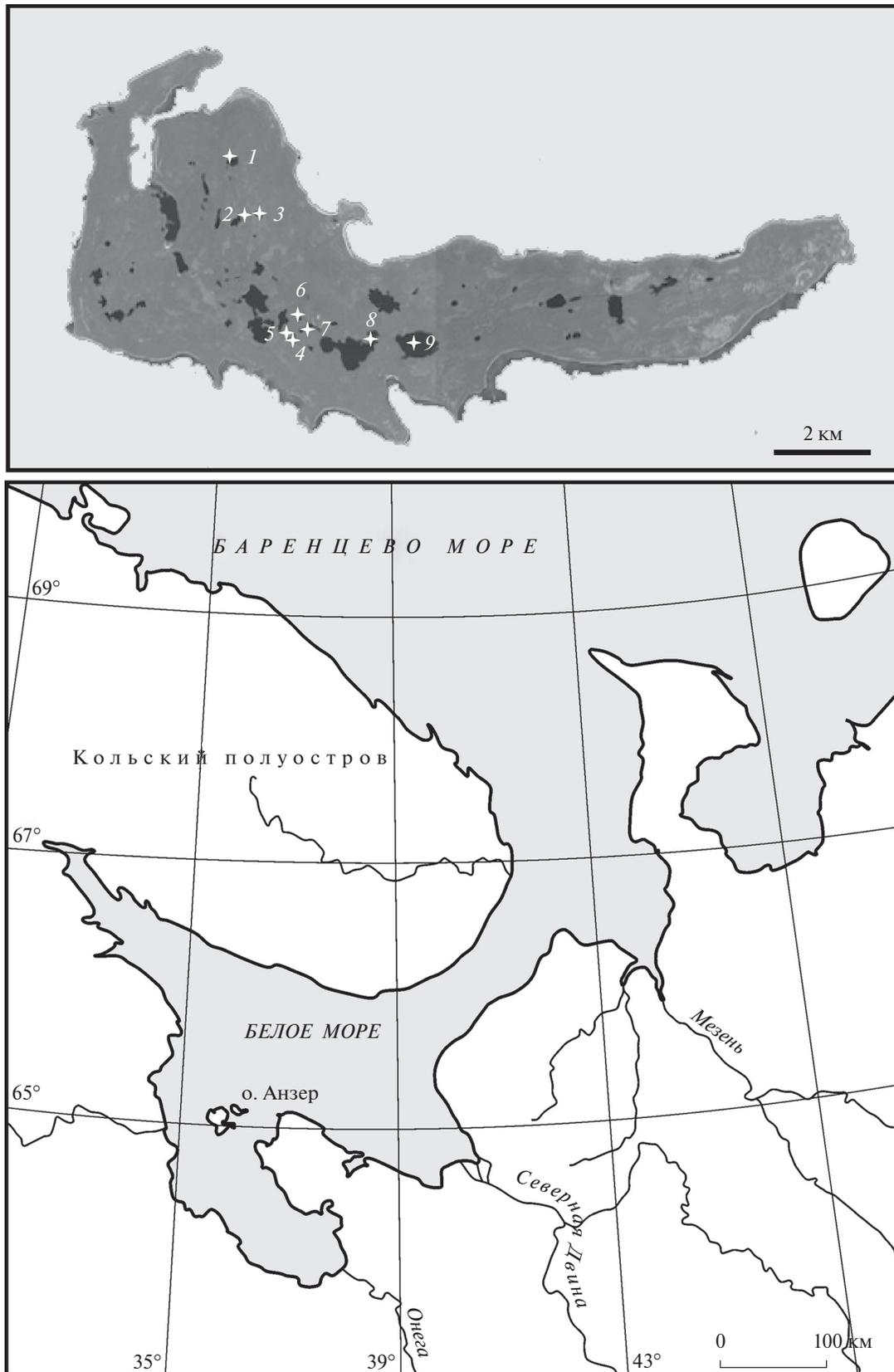


Рис. 1. Остров Анзер, Соловецкий архипелаг, Белое море. Озера: 1 – Большое Вербокольское, 2 – Кривое, 3 – Островное, 4 – Каменное, 5 – № 2, 6 – № 1, 7 – Банное, 8 – Голгофское, 9 – Капорское. Каменное и Капорское озера на некоторых картах встречаются под названиями Третье Каменное и Капельское соответственно.

2006). Не менее 2/3 площади архипелага занимает морская террасированная равнина (Никишин, 1984), с преобладающими высотами 5–23 м. Здесь широко распространены береговые валы и дюны (Соловецкие ..., 2006). Данные геоморфологического профилирования позволили выделить в пределах Соловецкого архипелага 5 террасовых уровней, свидетельствующих о постоянном, хотя и неравномерном поднятии территории архипелага в послеледниковое время. Наиболее высокая терраса прослеживается на отметках 20.5–23.5 м над ур. м., время ее формирования было отнесено к бореальному периоду (Никишин, 1984). В настоящее время средняя скорость поднятия Соловецкого архипелага составляет около 1.05 мм/год, что в 3–5 раз меньше, чем скорости поднятия берегов Кандалакшского залива (Природная ..., 2007). Амплитуда приливно-отливных колебаний на Соловецком архипелаге составляет около 1 м (Гидрометеорология ..., 1991).

Соловецкий архипелаг состоит из 6 крупных и более чем 110 мелких островов (Природная ..., 2007). Наибольшую площадь имеет о. Большой Соловецкий (225 км²). Остров Анзер (48.5 км²), второй по величине остров Соловецкого архипелага, расположен в его северо-восточной части и отделен от о. Большого Соловецкого проливом Анзерская Салма. Протяженность острова с запада на восток составляет около 16 км, с севера на юг – от 6 км в западной части до менее 1 км в восточной. Большая часть территории острова лежит на отметках выше 20 м над ур. м. Западная часть острова занята холмисто-моренной и озерно-ледниковой равниной с абсолютными отметками 30–50 м (Соловецкие ..., 2006). В северо-западной части острова расположена его самая высокая точка – гора Вербокольская (86.5 м). Отрицательные формы рельефа представлены ложбинами стока талых ледниковых вод, днища которых сложены глинистыми, плохо сортированными песками и алевритами. В центральной части о. Анзер отмечены камовые возвышенности, достигающие значительной высоты (г. Голгофа (63.8 м) и ее окрестности). В крайнем восточном секторе острова сформированы флювиогляциальные террасы. На открытых участках юго-восточного и в центральной части северного побережья о. Анзер распространены эоловые формы рельефа (Соловецкие ..., 2006).

Из 376 озер Соловецкого архипелага 31 расположено на о. Анзер (Природная ..., 2007). Наиболее крупные из них (Большое Елизарово, Голгофское и Капорское) приурочены к его центральной части, и имеют отметки уреза менее 20 м над ур. м. Соловецкие озера, преимущественно бессточные, характеризуются замедленным водообменом, выраженной вертикальной термической, газовой и химической стратификацией, и низким содержа-

нием биогенных элементов (Шварцман и др., 2005).

В ходе полевых работ 2011 и 2015 гг. было проведено бурение донных отложений на девяти внутренних озерах о. Анзер (см. рис. 1, табл. 1). Бурение русским торфяным буром, позволяющим отбирать последовательно ненарушенные колонки по 1 м с максимальной возможной мощностью до 12 м, проводилось с плавучей платформы или с берега со сплавины. Учитывая достаточно большие глубины некоторых озер, бурение с платформы проводилось не на максимальной глубине, а на глубинах ~3–6 м. Отбор проводился по стандартной методике (Субетто, 2009).

Абсолютные отметки урезов воды снимались с топографических карт или устанавливались по данным барометрического нивелирования от известной отметки с использованием GPS-навигаторов Garmin. Сведения на топографических картах разных лет и масштаба имеют значительный разброс, поэтому в табл. 1 они приведены в виде диапазона значений. За высотные отметки порогов стока были приняты отметки уровня озер в Балтийской системе высот.

Большое Вербокольское, Кривое и Островное озера расположены в наиболее возвышенной северо-западной части о. Анзер, выше верхнего террасового уровня V (20.5–23.5 м), прослеженного по данным геоморфологической съемки (Никишин, 1984). Остальные исследованные водоемы расположены в центральной части острова. Высотное положение озер № 2, Каменного и № 1¹ соответствует верхнему террасовому уровню V, относительно к бореальному времени (Никишин, 1984). Банное и Голгофское озера относятся к террасовым уровням II–III (6.5–13 м), оз. Капорское – к террасовому уровню I (3–5 м) (Никишин, 1984).

Большое Вербокольское оз. расположено в понижении между моренными холмами с отметками >75 м. Озеро бессточное, с крутыми склонами дна и максимальной глубиной 17.5 м. В западной части – узкий мелководный залив (глубина до 1.5 м). В залив впадает ручей, вытекающий из оз. Малого Вербокольского. Пробоотбор проводился в северо-восточной части озера с глубины 4 м.

Кривое озеро находится южнее оз. Большого Вербокольского, на заболоченной равнине. Озеро вытянуто с севера на юг, имеет крутые берега высотой до 0.5–1 м, в южной части соединяется ручьем с оз. Круглым. Глубины у берега 0.5–1.8 м. Пробоотбор проводился с берега с глубины 0.5 м.

Островное озеро расположено в 150 м восточнее оз. Кривого на заболоченной равнине. Пробоотбор проводился с берега с глубины 0.7 м.

¹ Здесь и далее два изученных безымянных озера описываются под номерами.

Таблица 1. Сведения об изученных озерах

| Название (количество точек отбора) | Площадь, км ² | Высота уреза воды над ур. м., м | Глубина в точке отбора, м | Мощность вскрытых отложений (мощность органогенных отложений), м | Координаты точки пробоотбора |
|--|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|
| Большое Вербокольское (1) | 0.04 | 67 | 4.0 | 1.7 (1.7) | 65°10.432' с.ш., 36°00.250' в.д. |
| Кривое (1) | 0.01 | 55–57.5 | 0.5 | 1.5 (1.4) | 65°09.804' с.ш., 36°00.450' в.д. |
| Островное (1) | 0.02 | 52.8 | 0.7 | 3.2 (2.9) | 65°09.847' с.ш., 36°00.768' в.д. |
| Каменное (5) | 0.02 | 22–22.5 | Сплавина – 0.7 | 1.4–4.9 (1.4–4.9, включая торф) | 65°8.6154' с.ш., 36°1.7136' в.д. |
| № 2 (1) | 0.001 | 22–22.5 | Сплавина | 5.5 (5.5, включая торф) | 65°8.6268' с.ш., 36°1.596' в.д. |
| № 1 (3) | 0.005 | 20–21.5 | 4.2; 6.4; 4.2 | 1.9 (1.8); 2.9 (2.9); 2.8 (2.7) | 65°8.8026' с.ш., 36°1.8666' в.д. |
| Банное (1) | 0.03 | 13.7 | 2.7 | 2.4 (1.3) | 65°8.7012' с.ш., 36°2.3028' в.д. |
| Голгофское (2) | 0.45 | 11.2–11.6 | 3.2; 2.8 | 0.8 (0.8); 1.7 (1.2) | 65°8.5416' с.ш., 36°3.8772' в.д. |
| Капорское (2) | 0.35 | 2.5–3.3 | 5.1 | 1.5 (0.2); 3.9 (1.9) | 65°8.5236' с.ш., 36°4.9926' в.д. |

Озеро № 2 – наименьшее из исследованных озер, расположено на возвышенной заболоченной равнине. Юго-западный и южный берега заболочены, в юго-восточной части – исток небольшого ручья, соединяющего оз. № 2 с оз. Каменным. Пробоотбор проводился со сплавины у южного берега озера. Отбиралась только нижняя часть отложений.

Озеро Каменное – небольшой водоем треугольной формы. Берега озера заболочены, в юго-восточной части из него вытекает ручей. Колонки донных отложений были отобраны с берега и со сплавины в северной и юго-восточной частях озера. Отбиралась только нижняя часть отложений.

Озеро № 1 представляет собой небольшое озеро каплевидной формы с глубинами до 9 м, имеющее поверхностный сток только в периоды половодья. Колонки донных отложений были отобраны в трех точках с глубин 4.2–6.4 м.

Озеро Банное вытянуто с запада на восток и имеет изогнутую форму. Пробоотбор осуществлялся в восточной части водоема с глубины 2.7 м.

Озеро Голгофское является одним из наиболее крупных озер о. Анзер. Озеро имеет сложную конфигурацию, в северо-западной и северо-восточной частях расположены крупные заливы. Отмечены глубины до 15 м. Пробоотбор проводился в северо-восточном заливе с глубин 2.8 и 3.2 м.

Озеро Капорское также относится к наиболее крупным озерам о. Анзер. Озеро имеет овальную форму, длинная ось ориентирована с запада на восток. В юго-западной части имеется узкий залив, здесь же расположен исток ручья, соединяющего озеро с заливом Капельская губа. Пробоотбор проводился в двух точках – в северной прибрежной и центральной частях озера с глубины 5.1 м.

Во всех озерах отбирались метровые колонки донных отложений с перекрытием в 10–20 см для облучения последующей корреляции. Литологическое описание и фотографирование проводилось в поле и корректировалось в дальнейшем в лаборатории. Корреляция кернов проводилась по характерным литологическим границам и результатам анализа ППП.

Анализ ППП выполнен для озер Каменного, № 1, Банного, Голгофского и Капорского. В озерах, где бурение проводилось в нескольких точках, анализировались наиболее полные разрезы. Определение ППП проводилось по стандартной методике (прокаливание при 550°C в течение 6 ч с последующим взвешиванием).

Датирование переходных горизонтов выполнено для четырех исследованных озер – № 1, Банного, Голгофского и Капорского. Возраст отложений определялся радиоуглеродным методом в Лаборатории радиоуглеродного датирования

СПБГУ. Датировалась валовая органика из переходных горизонтов (от минерогенных к органическим отложениям) и из вышележащей гиттии. В полученных результатах отмечено несколько инверсионных дат, однако при калибровке все они выстраиваются в ненарушенную последовательность. Калибровка дат осуществлялась в программе OxCal 4.2 с использованием калибровочной кривой IntCal 13 (Ramsey, 2009).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Большое Вербокольское озеро. Отложения представлены однородной гиттией, общей мощностью 1.7 м, в нижней части с незначительным количеством неразложившихся волокон мхов (рис. 2). В забое отмечены глина с песком и дресвой.

Кривое озеро. Отложения представлены гиттией с большим количеством неразложившихся макроостатков общей мощностью 1.5 м (см. рис. 2). Отмечено чередование горизонтов с преобладанием грубого детрита и более однородных. В основании колонки вскрыт маломощный слой (7 см) бурого глинистого песка с гравием и растительными макроостатками.

Островное озеро. Нижняя часть отложений представлена бурой плотной глинистой гиттией мощностью 27 см, в нижней части с песком (см. рис. 2). Верхняя часть сложена торфом и торфянистой гиттией общей мощностью 2.9 м.

Озеро № 2. В основании разреза вскрыт сантиметровый слой песка, перекрытый торфянистой гиттией, мощностью 8 см, постепенно переходящей в однородную гиттию (см. рис. 2). Общая мощность разреза составила 5.5 м.

Каменное озеро. В нижней части колонок вскрыты песчано-глинистые отложения, иногда с гравием и галькой (см. рис. 2), максимальная мощность которых достигает 28 см. Выше лежит маломощный (2–12 см) слой торфянистой гиттии, иногда с фрагментами древесины, который перекрывает однородная гиттия, нечетко полочатая в своей нижней части. На противоположном юго-восточном берегу озера в колонке, отобранной со сплавины, над серым алевритом лежит слой торфа мощностью 30 см, перекрытый торфянистой гиттией. Общая мощность отложений, включая сплавину, составила от 1.5 до 4.9 м. Наименьшая вскрытая мощность отмечена в истоке ручья, где основание разреза сложено торфянистой гиттией, в нижней части опесчаненной, с единичной грубоокатанной галькой.

Динамика органического вещества в керне № 3 (точка № 2) соответствует литостратиграфии. Низкие значения ППП отмечены в минеральных отложениях нижней части колонки. При этом минимальные значения (<1%) отмечены в верхней части, представленной песком, глинистые

отложения в основании разреза характеризуются значениями 4–6%. В вышележащем торфянистом горизонте содержание органического вещества достигает 43%, затем отмечен резкий вброс минерального материала, после чего рост содержания органического вещества возобновляется. Накопление его в нижней части гиттии нестабильно и также сопровождается несколькими минимумами, при сохранении тренда к росту (21–37%).

Вскрытые отложения в озерах, расположенных на более низких отметках (ниже 22 м над ур. м.), в генерализованном виде представлены тремя горизонтами (см. рис. 2). Данные по динамике ППП позволяют выделить в них 3 периода осадконакопления. Результаты датирования представлены в табл. 2.

Озеро № 1. Нижняя часть разреза представлена плотной вязкой серой глиной, иногда опесчаненной. Замыкает разрез толща однородной гиттии мощностью до 3 м. Между ними лежит переходный горизонт, представленный светло- и темно-бурой слоистой гиттией с глинистыми прослоями, общей мощностью 12–15 см. В переходном горизонте отмечена четкая граница по цвету. Слоистая светло-бурая глинистая гиттия с четкой границей переходит в слоистую темно-бурую глинистую гиттию.

Возраст формирования переходного горизонта лежит в интервале 10200–11200 кал. л. н. Время его формирования составило около 600 лет.

По динамике содержания органического вещества выделяются три периода (см. рис. 2). Первый период с низкими (3–4%) значениями ППП выделен в нижней части разреза, он совпадает с литологическим горизонтом глин. Второй период с резким ростом ППП от 5 до 22% выделен в горизонте слоистой гиттии. Третий период со стабильно высоким содержанием органического вещества и общим трендом к росту совпадает с горизонтом однородной гиттии. Значения ППП увеличиваются вверх по разрезу, достигая в верхней части 78%, после чего происходит отчетливо выраженный спад до 64% и возобновление роста.

Банное озеро. Отложения представлены серой опесчаненной глиной в нижней части колонки и бурой однородной гиттией в верхней части колонки (см. рис. 2). Между ними расположен горизонт слоистой зеленовато-черной глинистой гиттии, мощностью 19 см. В забое колонки отмечен гравий.

Отмечена инверсия полученных радиоуглеродных дат, образец из гиттии LU-8218 древнее образца с верхней границы слоистого горизонта LU-8217 на 100 лет, но при калибровке полученные диапазоны возрастов позволяют построить ненарушенную кривую осадконакопления. В этом случае время завершения формирования слоистого гори-

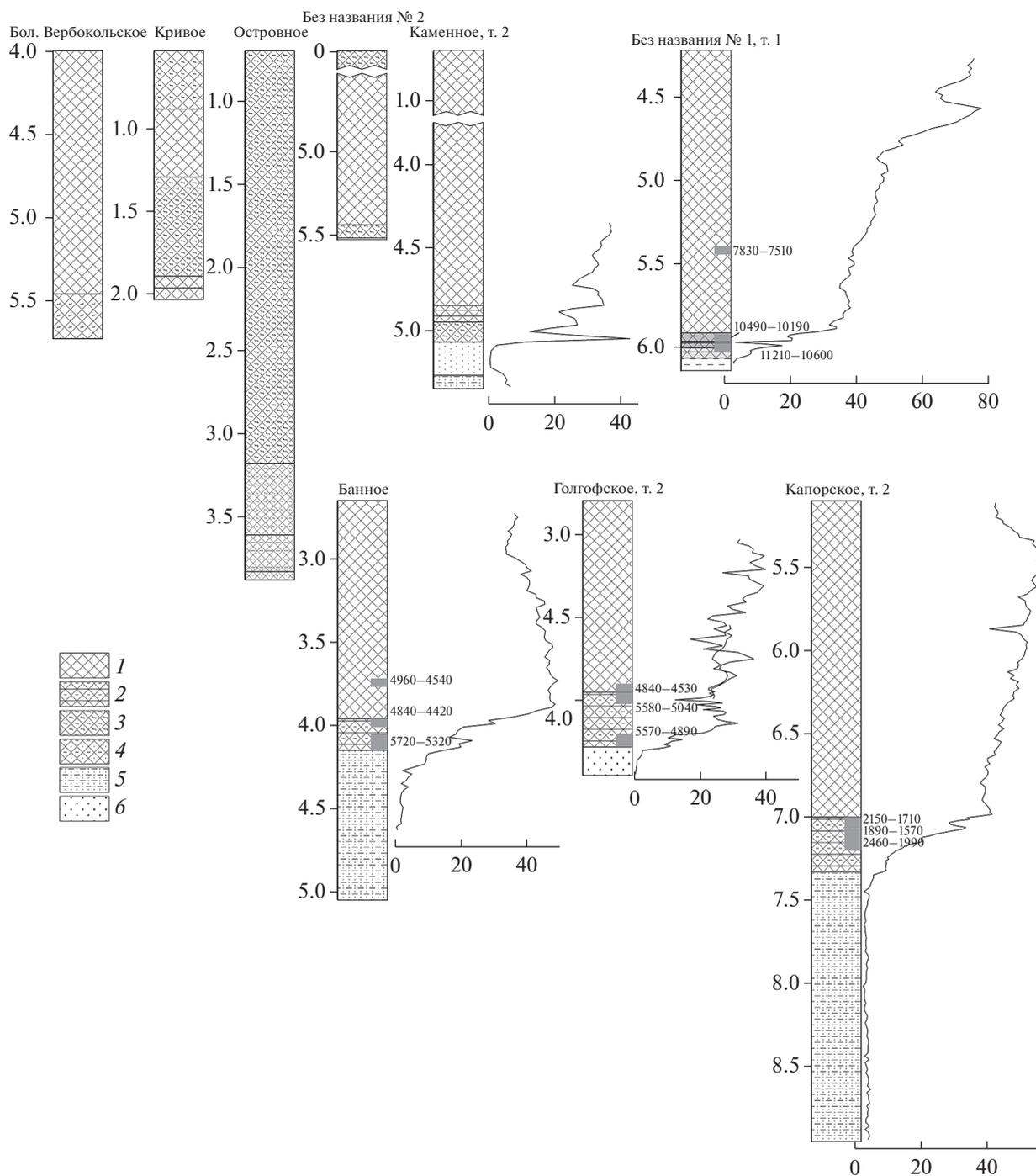


Рис. 2. Литостратиграфическая схема отложений изученных разрезов (глубина отмечена от поверхности воды, м; потери при прокаливании, %). 1 – однородная гиттия; 2 – слоистая глинистая гиттия; 3 – грубодетритовая (торфянистая) гиттия/торф; 4 – глинистая/опесчаненная гиттия; 5 – глина/опесчаненная глина; 6 – песок.

зонта можно оценить в 4700–4800 кал. л. н., а общее время его формирования в 700–800 лет.

Мощность гиттии составила около 1.3 м, возраст начала ее формирования лежит в диапазоне 4500–4800 кал. л. н.

По динамике содержания органического вещества выделяется три периода (см. рис. 2). Для нижнего литологического горизонта глин характерны низкие значения содержания органического вещества (0.5–5%) с незначительным трендом

Таблица 2. Результаты радиоуглеродного датирования отложений исследованных озер

| № | Озеро | Интервал глубин, м | ¹⁴ C дата, л. н. | Калиброванный возраст, л. н. (1σ) |
|---------|------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| LU-8213 | № 1 | 6.00–6.05 | 9590 ± 110 | 11 211–10602 |
| LU-8214 | № 1 | 5.94–5.99 | 9120 ± 70 | 10493–10185 |
| LU-8215 | № 1 | 5.40–5.45 | 6800 ± 80 | 7825–7509 |
| LU-8216 | Банное | 4.05–4.15 | 4810 ± 90 | 5723–5320 |
| LU-8217 | Банное | 3.95–4.00 | 4110 ± 90 | 4838–4424 |
| LU-8218 | Банное | 3.70–3.75 | 4230 ± 70 | 4960–4535 |
| LU-8219 | Голгофское | 4.20–4.28 | 4550 ± 90 | 5567–4886 |
| LU-8220 | Голгофское | 4.00–4.07 | 4590 ± 70 | 5575–5040 |
| LU-8221 | Голгофское | 3.95–4.00 | 4160 ± 60 | 4838–4530 |
| LU-8222 | Капорское | 7.14–7.20 | 2230 ± 90 | 2460–1992 |
| LU-8223 | Капорское | 7.07–7.14 | 1820 ± 70 | 1892–1569 |
| LU-8224 | Капорское | 7.00–7.07 | 1970 ± 90 | 2150–1707 |

к росту. Второй период характеризуется резким ростом содержания органического вещества до 47%. На этот период приходится верхняя часть глинистого горизонта, переходный горизонт и нижняя часть гиттиевых горизонтов. В переходном горизонте отмечены нестабильные условия седиментации органического вещества. Третий период выделен по стабилизации накопления органического вещества на уровне около 47% с последующим постепенным его снижением. В верхней части гиттии фиксируется четкий спад в содержании органического вещества.

Голгофское озеро. Отложения представлены тонкозернистым серым песком в нижней части и бурой однородной гиттией в верхней части, разделенными слоистым переходным горизонтом, представленным глинистой слабоопесчаненной гиттией мощностью 33 см (см. рис. 2). Мощность однородной гиттии составила чуть более 1 м.

Датированные образцы с верхней и нижней границы слоистого горизонта (LU-8219 и LU-8220) имеют практически одинаковый возраст, а пограничный образец с нижней границы гиттии (LU-8221) отличается от смежного с ним почти на 600 лет, что может свидетельствовать о резком падении скорости осадконакопления после завершения изоляции. Калибровка дат позволяет построить ненарушенную кривую осадконакопления. Время формирования слоистого горизонта лежит в диапазоне 5580–4890 кал. л. н. и могло занимать до 600 лет. Однако, учитывая спад в содержании органического вещества на верхней границе переходного горизонта, вызванного эрозионными процессами, можно допустить удревнение даты LU-8220. Соответственно, возраст верхней границы переходного горизонта, определен в 4800–4900 кал. л. н., а начало формирования гиттии – 4500–4800 кал. л. н.

По динамике содержания органического вещества выделяется три периода (см. рис. 2). Для песка характерны низкие значения ППП с постепенным ростом от 0.3 до 2%. Второй период, совпадающий с литологическим горизонтом слоистой гиттии, отмечен резким ростом содержания органического вещества от 8 (на нижней границе) до 23% (на верхней границе). При этом седиментационные условия нестабильны. Отмечены значительные флуктуации в содержании органического вещества, максимум в 31% достигнут в середине слоистого горизонта. Третий период осадконакопления с высоким накоплением органического вещества совпадает с горизонтом однородной гиттии. Условия органонакопления остаются нестабильными, при общем тренде к росту отмечены значительные флуктуации в содержании органического вещества (17–40%).

Капорское озеро. Отложения сложены серой и зеленовато-серой опесчаненной глиной с прослоями и линзами тонкого песка, прослоями битой ракушки, единичной галькой в нижней части и бурой и рыжеватой-бурой однородной гиттией в верхней части (см. рис. 2). Между ними лежит слой зеленовато-бурой и черной слоистой глинистой гиттии мощностью 33–34 см. Переходный горизонт отмечен в одной точке, в другой гиттия залегает на глине с резкой границей. Мощность гиттии составила от 0.2 до 1.9 м.

Датированный образец LU-8223 несколько моложе вышележащего образца LU-8224, но, принимая во внимание результаты калибровки, возраст верхней границы переходного горизонта оценивается в 1700–1800 кал. л. н. Время формирования верхних 20 см слоистого горизонта составило около 400 лет и укладывается в диапазон 1700–2500 кал. л. н. Временные рамки заверше-

ния формирования переходного горизонта составили около 1700–1900 кал. л. н.

По динамике содержания органического вещества выделяется три периода (см. рис. 2). Для горизонта глин характерны низкие значения ППП (около 3%), только в верхней части отмечен незначительный рост до 4–6%. Второй период, во время которого образовалась слоистая толща, характеризуется резким ростом значений ППП от 8 до 34%. Для третьего периода характерна стабилизация содержания органического вещества на значениях около 40% с последующим трендом к росту. В верхней части гиттии фиксируется отчетливый спад содержания органического вещества от 54–55 до 42–43%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Структура донных отложений. Поздненеоплейстоценовые-голоценовые озерные отложения севера Европейской России в основном представлены следующей (упрощенной) литологической последовательностью: минерогенные, глинистые или песчаные отложения—глинистая гиттия—гиттия. В некоторых случаях переход от минерогенных к органогенным отложениям происходит через формирование на минерогенных осадках торфянистого (грубодетритового) прослоя (Кузнецов, Субетто, 2019). Такая последовательность отражает региональные закономерности изменения природно-климатических обстановок позднеледниковья-голоцена (Субетто, 2009).

Подобная трехчленная структура характерна и для отложений изоляционных бассейнов (Long et al., 2011). Здесь эта последовательность отражает изменения условий осадконакопления в связи с изоляцией от крупного водоема и установлением условий малого изолированного озера.

Обобщенная литологическая последовательность, отмечаемая в прибрежных озерах Прибеломорья, имеет свою специфику, которая, однако, также характеризуется постепенным уменьшением доли минерального компонента и увеличением содержания органического вещества. Изучение литологических характеристик беломорских изоляционных бассейнов позволило выделить шесть основных фаций осадочных толщ (Колька, Корсакова, 2017): I — озерно-ледниковые неслоистые, неясно-слоистые или ленточные глины, или слоистые пески, залегающие непосредственно на коренных породах или морене; II — фация переходная от озерно-ледниковой к морской, представленная переслаиванием органосодержащих песков и алевроитов, и алевроитов, не содержащих органики; III — морские пески и алевроиты; IV — фация переходная от морской к озерной, представленная переслаивающимися гиттиями и алевроитами, неслоистыми, неясно-слоистыми или алевроитистыми гиттиями;

V — озерная (пресноводная) гиттия, и VI — субаэральная фация (торф).

Палеолимнологические исследования на о. Большом Соловецком показали, что после дегляциации архипелага в котловинах современных озер накапливались отложения приледникового бассейна, уровень которого превышал современную отметку 34 м над ур. м. (Ludikova et al., 2021). В озерах северо-западной части о. Анзер, расположенных на отметках >50 м над ур. м., озерно-ледниковые отложения не были встречены: озерная гиттия здесь подстилается опесчаненной глиной с древесной (Большое Вербокольское оз.), которая предположительно интерпретируется как морена. Бурая глинисто-песчаная гиттия в основании разрезов отложений озер Кривого и Островного, возможно, формировалась также на моренном субстрате. Раннеголоценовый возраст имеют органо-минеральные отложения (глинистая гиттия) со значениями ППП 6–18% (Кузнецов и др., 2018), отмеченные в оз. Большом Зеленом на о. Большом Соловецком. Начало их формирования относится к ~10400 кал. л. н. (Ludikova et al., 2021).

Сценарий перехода от минерального осадконакопления к органогенному может осуществляться различными способами. Присутствие песка в подошве разреза донных отложений озера № 2 указывает на условия прибрежной мелководной зоны более крупного водоема. Дальнейший переход к накоплению торфянистой гиттии и далее — однородной гиттии является результатом резкой смены обстановок осадконакопления вследствие изоляции и установления условий малого зарастающего водоема. Сходную литологическую последовательность имеет разрез донных отложений оз. Каменного. Формирование глинистого песка со сравнительно высокими значениями ППП, отмечаемого в основании разреза, относится к стадии крупного бассейна, регрессия которого фиксируется образованием песчаного горизонта.

Литологическая последовательность, вскрытая в озерах, расположенных на абсолютных отметках ниже 22 м, — № 1, Банном, Голгофском и Капорском, — имеет сходные черты и характеризуется сходной динамикой содержания органического вещества.

Нижняя часть разрезов донных отложений представлена аллохтонным минеральным осадком с низким содержанием органического вещества (ППП не более 6%), что, наряду с присутствием песчаной составляющей, указывает на формирование этих отложений в мелководной литоральной зоне крупного водоема. Отложения морского этапа осадконакопления в изоляционных бассейнах, как правило, характеризуются низкими значениями ППП (например, Snyder et al., 1997).

Накопление минерогенных, преимущественно аллохтонных отложений характерно также для крупных пресноводных бассейнов. В частности, низкое содержание органического вещества (ППП <4%) отмечалось в нижней части разрезов донных осадков оз. Большого Зеленого (33.7 м над ур. м., о. Большой Соловецкий) и озер, расположенных в районе Беломорска на западном побережье Онежского залива на отметках 72–134 м над ур. м. В вышеуказанных разрезах эти отложения были интерпретированы как озерно-ледниковые (Ludikova et al., 2021; Lunkka et al., 2012). Сравнительно низкие значения ППП (<10%) отмечались также в алевритовых и песчано-алевритовых отложениях озер о. Большого Соловецкого, накапливавшихся на этапе существования в их котловинах морского залива (Кузнецов и др., 2018; Ludikova et al., 2021).

В отличие от озер Каменного и № 2, переход от более древних, минеральных осадков к озерным гиттиям происходит в озерах № 1, Банном, Голгофском и Капорском через формирование тонкослоистых органоминеральных отложений (глинистых гиттий). Эти слоистые отложения характеризуются резким увеличением содержания органического вещества (ППП >20%). Цвет, мощность слоев, содержание органического вещества в пределах данного горизонта имеют значительные вариации. Формирование слоистого горизонта маркирует установление переходных обстановок осадконакопления в ходе изоляции от крупного бассейна, когда возникают сезонные анаэробные условия у дна и формируются черные, насыщенные гидротроилитом, слои. Этот переходный этап связан (1) с сокращением притока вод крупного водоема и приносимого с ними взвешенного вещества, и (2) с формированием химической стратификации в толще воды в озере, где тяжелые соленые воды, перекрываются слоем легкой пресной воды. В донных отложениях начало переходного этапа соответствует “седиментологическому изоляционному контакту” (по Kjømpereud, 1986), который отмечает уменьшение поступления в котловину изоляционного бассейна аллохтонного, преимущественно минерального материала, и усилением роли автохтонного компонента. В процессе изоляции возрастает роль автохтонного органоаккумуляции в результате повышения продуктивности водоема (Long et al., 2011), что фиксируется через увеличение содержания органического вещества в донных отложениях изоляционных бассейнов на переходном этапе (Кузнецов и др., 2018; Dreßler et al., 2009; Eronen et al., 2001).

Формирование тонкослоистых органоминеральных осадков, представленных глинистыми или алевритовыми гиттиями, как правило, характерно для морских изоляционных бассейнов. При изоляции от моря образованию слоистости в осадках переходного этапа способствует верти-

кальная стратификация водной толщи, возникающая в результате разности плотностей осоложенных придонных вод и опресненных поверхностных. Подобные тонкослоистые осадки, характеризующиеся резким увеличением значений ППП, отмечались в озерах о. Большого Соловецкого (Субетто и др., 2012; Ludikova et al., 2021). Известны многочисленные находки переходных тонкослоистых отложений (фашия IV по Колька, Корсакова, 2017) в других разрезах изоляционных бассейнов Беломорского побережья.

Однако переход от морских к пресноводным условиям не всегда сопровождается формированием слоистости в донных осадках. В частности, в одном из изоляционных бассейнов о. Большого Соловецкого переходный горизонт представлен массивным гиттиевым алевритом (Субетто и др., 2012; Ludikova et al., 2021).

Динамика органогенного осадконакопления. Осадочная последовательность озер о. Анзер, расположенных на отметках ниже 22 м над ур. м. отражает изменения условий осадконакопления в связи с изоляцией от крупного водоема и установлением условий малого изолированного озера. Динамика содержания органического вещества в отложениях исследованных озер позволяет выделить три периода органоаккумуляции, в общем совпадающих с выделенными литостратиграфическими горизонтами: 1 – низкое содержание (отложения крупного бассейна, 0.3–10%); 2 – рост (отложения переходного этапа, 5.5–41%); 3 – высокое содержание (отложения малого изолированного озера, 17–49%). Не всегда литостратиграфические горизонты и периоды органоаккумуляции полностью совпадают. В оз. Банном содержание органического вещества начинает расти еще в верхней части глинистого горизонта. Этот рост продолжается в слоистой пачке и заканчивается уже в нижней части однородной гиттии.

Горизонт слоистой гиттии, разделяющий минерогенные и органогенные осадки, был встречен в четырех озерах о. Анзер (рис. 3). Общая мощность переходного горизонта составила 12–15 см (№ 1), 19 см (Банное), 34 см (Капорское, Голгофское). Содержание органического вещества в нем меняется в значительных пределах – 5–22% (№ 1), 15–30% (Банное), 8–34% (Капорское), 8–31% (Голгофское).

Слоистый переходный горизонт характеризуется ростом содержания органического вещества, на который накладывается локальный спад ближе к верхней границе (в оз. Банном в средней части), после которого происходит возобновление роста. Этот спад отмечен во всех четырех разрезах, где встречен слоистый горизонт (№ 1, Банное, Голгофское и Капорское), а также в слоистом горизонте в оз. Большое Корзино (Ludikova et al., 2021). Во всех озерах, кроме оз. № 1, падение

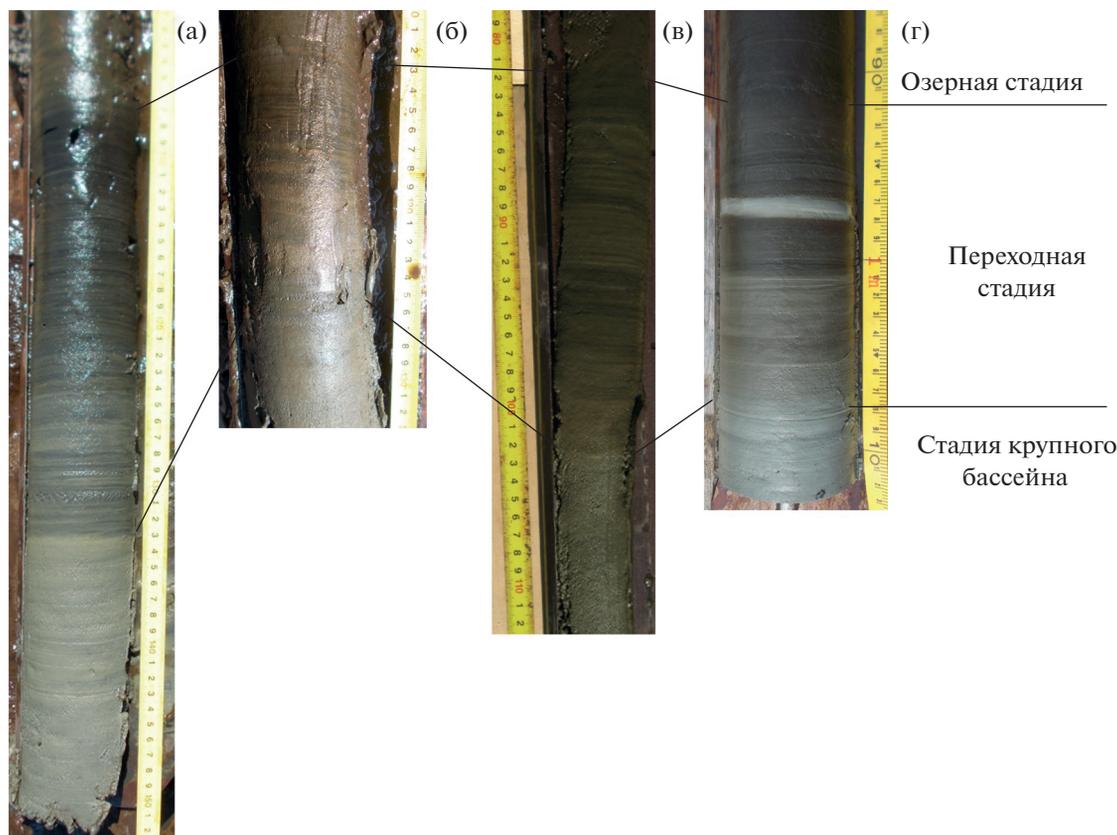


Рис. 3. Переходные горизонты в озерах: (а) Капорское (~3 м над ур. м.), (б) Голгофское (~11 м над ур. м.), (в) Банное (~14 м над ур. м.), (г) № 1 (~21 м над ур. м.).

содержания органического вещества не выражено в изменении литологического состава и связано, видимо, с переформированием береговой линии малого водоема на финальной стадии изоляции и, соответственно, увеличением поступления минеральной составляющей. В оз. № 1 этот спад приурочен к отчетливо выделяющемуся серому глинистому прослою мощностью около 3 мм, прослеживаемому по всей акватории озера. Его происхождение имеет ту же природу, как и в остальных озерах, но видимо проявившуюся в более выраженном масштабе. В Капорском и Голгофском озерах локальный спад отмечен в верхней части слоистого горизонта, где слоистость становится менее выраженной.

Исчезновение слоистости в донных осадках, начало формирования горизонта однородной гиттии, характеризующейся стабильно высоким содержанием органического вещества (ППП >40%), свидетельствует о завершении процесса изоляции, установлении пресноводных условий и начале собственно озерного этапа развития рассматриваемых озер о. Анзер. Отложения озерной стадии всегда значительно более богаты органическим веществом по сравнению с осадками морского этапа, поскольку озерные экосистемы име-

ют более высокий трофический статус (García-Rodríguez et al., 2001). То же можно сказать и о водоемах, изолировавшихся от крупных пресноводных бассейнов (Кузнецов и др., 2015).

Датирование отложений из переходного горизонта позволило построить возрастную модель для четырех изученных озер (рис. 4) и оценить скорость осадконакопления на озерном этапе развития. В трех озерах она составила около 0.2–0.3 мм/год (0.25 мм/год – Голгофское, 0.3 мм/год – Банное, 0.2–0.3 мм/год – № 1), что соотносится со средними значениями скоростей осадконакопления для озер северной гумидной зоны (Субетто, 2009). Из ряда выделяется оз. Капорское, где скорость осадконакопления в точке № 2 превысила 1 мм/год, а в точке № 1 составила около 0.1 мм/год. Высокая скорость осадконакопления здесь объясняется тем, что озеро, находясь на наиболее низкой отметке, имеет наибольшую площадь водосбора и принимает в себя сток в том числе и из перечисленных выше озер, а его соединение с морем через вытекающий ручей затруднено из-за небольшого уклона.

Реконструкция перемещения береговой линии. Полученные результаты позволили воссоздать в первом приближении характер и скорость пере-

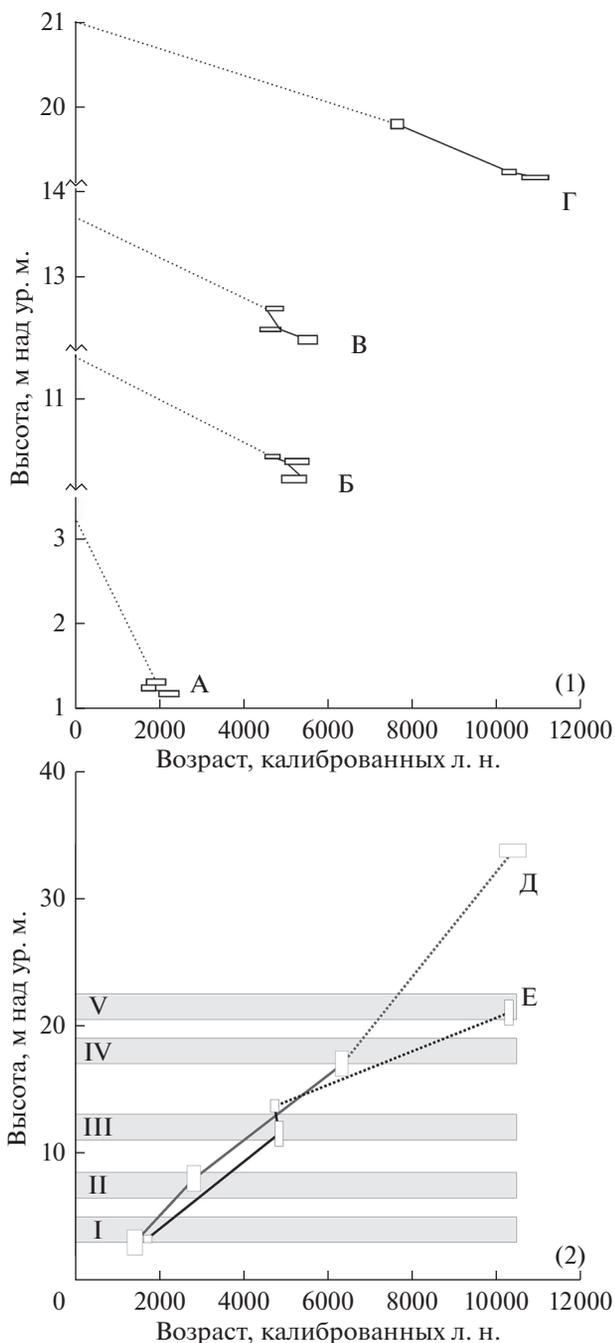


Рис. 4. Возрастная модель вскрытых отложений (1): А – Капорское; Б – Голгофское, В – Банное; Г – № 1; кривые вертикального перемещения береговой линии (2) для о. Большого Соловецкого (Д) и о. Анзер (Е). Серыми прямоугольниками показано высотное расположение морских террас по (Никишин, 1984). Данные по о. Большому Соловецкому по (Субетто и др., 2012).

мещения береговой линии Белого моря в районе о. Анзер в голоценовое время.

Отложения крупных палеобассейнов не были встречены в котловинах озер Большого Вербокольского, Кривого и Островного, что позволяет

предположить, что эти водоемы развивались самостоятельно в течение всей послеледниковой истории. В свою очередь, палеолимнологические исследования на о. Большом Соловецком показали, что после дегляциации архипелага в котловинах озер, расположенных на отметках >33 м, накапливались отложения приледникового водоема (Ludikova et al., 2021). Возможно, уровень приледникового водоема в районе Соловецкого архипелага не превышал современной 50-метровой отметки.

В оз. Большом Вербокольском органонакопление началось непосредственно на морене, слагающей его котловину, тогда как в озерах Кривом и Островном на ранних этапах развития аккумуляровались бурые органоминеральные осадки. Отсутствие датировок не позволяет установить время начала здесь органогенного осадконакопления. Однако по данным Субетто и др. (2012), органонакопление в озерных котловинах о. Большого Соловецкого на отметках ~35 м над ур. м. началось уже в раннем голоцене, около 10800 кал. л. н.

На о. Анзер наиболее раннее начало органогенного осадконакопления датировано в разрезе донных отложений озера № 1, расположенного на отметках около 21–22 м над ур. м. После 11200 кал. л. н. здесь происходит резкое увеличение содержания органического вещества и формирование тонкослоистых органоминеральных осадков (глинистой гиттии), переходящих в гиттию. По-видимому, близкий возраст могут иметь органогенные отложения в озерах № 2 и Каменном, расположенных на отметке ~23 м над ур. м. Можно предположить, что смена терригенного осадконакопления органогенным во всех трех озерах была связана с регрессией береговой линии, сформировавшей наиболее высокий террасовый уровень V (20.5–23.5 м над ур. м.), прослеженный по данным геоморфологической съемки. Ранее формирование этого террасового уровня было отнесено к бореальному времени (Никишин, 1984). Однако наши результаты показывают, что регрессия крупного водоема имела место в начале пребореала, около 11200 кал. л. н.

В озерах западного побережья Онежского залива (Поморский берег Белого моря), находящихся на отметках 24–49 м над ур. м., органогенные отложения, залегающие на озерно-ледниковых осадках, также имеют пребореальный возраст, что позволяет сделать косвенный вывод о времени спуска приледникового водоема, существовавшего в котловине Онежского залива (Колька и др., 2018). Регрессия приледникового бассейна привела к установлению условий малого изолированного водоема в озерных котловинах побережья Онежского залива, о. Большого Соловецкого (Ludikova et al., 2021) и, вероятно, в ряде озер о. Анзер. Обобщение материалов, полученных

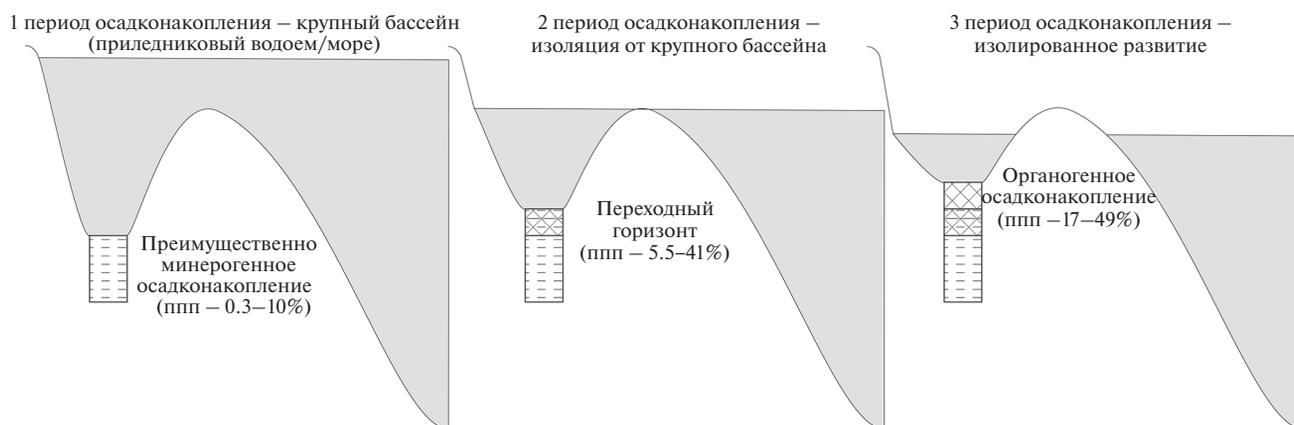


Рис. 5. Стадии органонакопления в изоляционных бассейнах о. Анзер.

ранее в ходе изучения изоляционных бассейнов, морских террас, древних береговых линий и т.д., позволило говорить о масштабной регрессии береговой линии, фиксируемой во всем восточном секторе беломорского побережья, включая Онежский залив и Соловецкие острова в позднеледниковое-раннеголоценовое время (Baranskaya et al., 2018). К регрессии раннего голоцена (~11500–9500 кал. л. н.) отнесено также осушение палеопротоливов на отметках 29–30 м над ур. м. в северо-западной части Онежского полуострова, возникших во время позднеледниковой трансгрессии (Репкина и др., 2020).

Озеро № 1 изолировалось около 10200–10500 кал. л. н., это возрастной диапазон верхней части слоистого горизонта, после чего началось накопление гиттии. Этим же возрастом датируется нижний органогенный слой в оз. Большом Зеленом на соседнем о. Большом Соловецком, расположенном более чем на 10 м выше. Начало изоляции озера № 1 датируется в интервале 10600–11200 кал. л. н. Возраст формирования нижней части гиттии в оз. Верхнем Зеленом, расположенном на о. Большом Соловецком, но на более высоких абсолютных отметках (35 м над ур. м.), определен в 10600–11100 кал. л. н. (Субетто и др., 2012). Таким образом, органическое осадконакопление во всех этих озерах началось синхронно, несмотря на значительную разницу по высоте. Следовательно, спуск приледникового бассейна, приведший к формированию малых изолированных озер Соловецкого архипелага, расположенных на высоких отметках, произошел не позднее 11000 кал. л. н. Причем на отметках 20–22 м над ур. м. уровень приледникового водоема стабилизировался, что привело к формированию в оз. № 1 слоистого переходного горизонта. Важно отметить, что при изоляции от приледникового бассейна в котловине оз. № 1 накапливались слоистые осадки, как визуально, так и по содержанию органического вещества, аналогичные

отложениям, сформировавшимся при изоляции от морского бассейна в озерах на более низких отметках (рис. 5).

Непрерывное, начиная с раннего голоцена, накопление гиттии в котловине оз. № 1 на о. Анзер, позволяет говорить о том, что уровень голоценовых морских трансгрессий не достигал здесь отметок 20–22 м над ур. м., т.е. современной высотной отметки данного озера. В то же время, обнаружение морских отложений среднеголоценовой трансгрессии Тапес в котловине оз. Большое Корзино (16.6 м над ур. м.) на о. Большом Соловецком (Ludikova et al., 2021) позволяет говорить о том, что максимальный уровень морского бассейна на Соловецком архипелаге, по-видимому, находился в диапазоне ~17–21 м. В этот период был сформирован террасовый уровень IV (17–19 м над ур. м.), прослеженный по всему Соловецкому архипелагу по данным геоморфологических наблюдений и датированный временем ~7500–6300 кал. л. н. (Никишин, 1984). Отчетливые береговые линии, соответствующие трансгрессии Тапес, отмечены также в северо-западной части Онежского полуострова на отметках 14–18.5 м (Репкина и др., 2020).

Продолжающееся гляциоизостатическое поднятие привело к постепенному осушению прибрежных территорий о. Анзер. Так, около 4800–4400 кал. л. н. относительный уровень моря находился на отметках ниже 11 м над ур. м. (приблизительный порог стока оз. Голгофского), а около 1700–1900 кал. л. н. береговая линия отступила ниже 2 м над ур. м. (приблизительный порог стока оз. Капорского).

В ходе изоляции от моря озера Банное и Голгофское являлись единым заливом. Порог стока оз. Банного находится несколько выше, чем у оз. Голгофского, и, соответственно, его изоляция должна была произойти раньше. Полученные данные находятся в некотором противоречии с

данным утверждением. Формирование однородной гиттии, являющееся сигналом окончательной изоляции от большого бассейна, в расположенном ниже оз. Голгофском началось ранее. Это может быть связано с более длительным существованием анаэробных условий в придонных горизонтах в небольшой и замкнутой котловине оз. Банного, в котором уже после завершения связи с морем продолжали сохраняться условия, способствующие формированию слоистых осадков. В целом, время формирования переходного горизонта в оз. Банном превышает аналогичное в оз. Голгофском по меньшей мере в 1.5 раза. Это объясняется тем, что в большем по площади оз. Голгофском в ходе и после изоляции от моря перемешивание водной массы происходило интенсивнее, тогда как в небольшой котловине оз. Банного застойные явления в придонной части водной толщи сохранялись еще несколько сотен лет после прекращения связи с морем. Таким образом, возраст начала формирования гиттии не всегда совпадает с возрастом окончательной изоляции от моря, так как эта изоляция могла произойти и ранее [для сравнения см. (Corner and Naugane, 1993)].

ВЫВОДЫ

На основе изучения отложений девяти малых озер на о. Анзер (Соловецкие острова, Белое море) установлено, что осадконакопление в их котловинах началось в позднеледниковье и имеет ряд общих особенностей.

Котловины большинства внутренних озер на ранних этапах своего развития входили в состав крупных бассейнов (озерно-ледникового или морского). По мере регрессии этих крупных бассейнов их заливы изолировались, и в них начиналось озерное осадконакопление. В зависимости от своего гипсометрического положения этот переход происходил на протяжении всего голоцена. Наиболее долгую самостоятельную историю имеют озера, расположенные на более высоких абсолютных отметках.

Смена условий осадконакопления выражена в литостратиграфии разрезов и в содержании органического вещества. Динамика содержания органического вещества в донных отложениях озер, расположенных на отметках до 22 м над ур. м., позволяет выделить три периода органонакопления, в общем совпадающих с выделенными литостратиграфическими горизонтами: 1) низкое содержание органического вещества (0.3–10%), 2) рост содержания органического вещества (5.5–41%), 3) высокое содержание органического вещества (17–49%). Переход от преимущественно минерального (аллохтонного) к преимущественно органогенному (автохтонному) осадконакоплению свидетельствует об ослаблении вплоть до

полного прекращения притока морских вод в котловину изоляционного бассейна.

Начало органогенного осадконакопления в озерах, расположенных на высоких абсолютных отметках, история которых не связана с изоляцией от моря, происходило синхронно вне зависимости от их высотного положения. Уже с 10500–11000 кал. л. н. формирование гиттии отмечено в озерах Большом и Верхнем Зеленых (о. Большой Соловецкий) и оз. № 1 (о. Анзер), имеющих абсолютные отметки 22–35 м над ур. м. Таким образом, верхнее положение морской границы голоцена для данного района находится в диапазоне высот 17–21 м над ур. м.

Изоляция как от приледникового бассейна, так и от моря, как правило, маркируется формированием тонкослоистого горизонта мощностью 12–34 см, в котором происходит рост содержания органического вещества. Абсолютные значения в каждом из разрезов могут отличаться, общий отмеченный диапазон для слоистой толщи составил 5–34%.

Для четырех озер рассчитана скорость осадконакопления гиттии, которая составила в основном 0.2–0.3 мм/год. Только в оз. Капорском, расположенном на наиболее низкой отметке, в одной из точек отмечена скорость осадконакопления, превышающая 1 мм/год.

Время начала формирования однородной гиттии зависит от высотной отметки озера. Завершение изоляции от моря озер на о. Анзер проходило несколько ранее аналогичного процесса на соседнем о. Большом Соловецком. Скорость регрессии береговой линии составила около 2–3 мм/год.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № 0154-2019-0004 (Д.Д. Кузнецов, А.В. Лудикова, Т.В. Сапелко) и ИВПС КарНЦ РАН по теме № 0218-2019-0050 (М.С. Потахин). Работа Д.А. Субетто, П.А. Леонтьева, И.М. Грекова, Л.С. Сырых, Д.С. Толстоброва осуществлена в рамках государственного задания Министерства просвещения РФ (№ FSZN-2020-0016) и РФФ № 22-17-00081.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают большую благодарность Анзерскому скиту Спасо-Преображенского Соловецкого монастыря и его инокам и трудникам, Соловецкому государственному музею-заповеднику, команде НИС “Эколог” и всем участникам полевых и лабораторных работ за помощь. Отдельная благодарность – научному сотруднику Соловецкого музея-заповедника А.Н. Соболеву за его ценные советы и комментарии, а также труднику Анзерского скита Анатолию, служившему

нам проводником в 2011 г. Дискуссии с заведующим лабораторией геологии и минерагии новейших отложений Геологического института Кольского научного центра РАН В.В. Колькой (1957–2020) были полезны в научном отношении, а его помощь в ходе полевых работ в 2015 г. значительна.

FUNDING

The research of Denis Kuznetsov, Anna Ludikova, and Tatiana Sapelko contributes to the State Research Program of the Institute of Limnology – SPC RAS (no. 0154-2019-0004) and Maksim Potakhin to the State Research Program of NWPI KRC RAS (no. 0218-2019-0050). The work of Dmitry Subetto, Petr Leont'ev, Ivan Grekov, Liudmila Syrykh, and Dmitry Tolstobrov was supported by Ministry of Education of the Russian Federation (FSZN-2020-0016) and RSF no. 22-17-00081.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their great gratitude to the Anzerskaya skete of Spaso-Preobrazhensky Solovetsky Monastery, the Solovetsky State Museum-Reserve, the research vessel “Ecolog” team, and all participants of field and laboratory work, and personally to Dr. Aleksandr Sobolev, monastery laborer Anatoly, Dr. Vasilii Kol'ka (1957–2020), for their support and assistance.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене / Е.Н. Невеский, В.С. Медведев, В.В. Калинин. М.: Наука, 1977. 236 с.
- Вахрамеева Е.А., Лосюк Г.Н. Распределение органического вещества в донных отложениях меромиктического озера Трехцветное (Кандалакшский залив Белого моря) // География: развитие науки и образования. СПб.: Изд-во РГПУ им. Герцена, 2021. Т. 1. С. 290–293.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
- Евзеров В.Я., Колька В.В., Корсакова О.П. История развития морских бассейнов в Беломорской депрессии за последние 130 тысяч лет (состояние вопроса и перспективы исследований) // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода. 2007. № 67. С. 54–65.
- Колька В.В., Корсакова О.П. Положение береговой линии Белого моря и неотектонические движения на северо-востоке Фенноскандии в позднеледниковье и голоцене // Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история / отв. ред. А.П. Лисицин. М.: Научный мир, 2017. С. 214–241.
- Колька В.В., Корсакова О.П., Лаврова Н.Б., Шелехова Т.С., Толстоброва А.Н., Толстобров Д.С., Зарецкая Е.Н. Стратиграфия донных осадков малых озер и палеогеография западного берега Онежского залива Белого моря в позднеледниковье и голоцене // Геоморфология. 2018. № 2. С. 48–59.
- 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. 2015. № 1. С. 54–69.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-1-54-69>
- Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. Стратиграфия донных отложений озер Карельского перешейка. М.: ГЕОС, 2019. 120 с.
- Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А., Леонтьев П.А. Органическое осадконакопление в малых озерах Беломорского бассейна в голоцене: Материалы Всерос. науч. конф. “Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология”: Сб. статей. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. С. 74–79.
- Лаврова М.А. Позднеледниковая и послеледниковая история Белого моря / Неогеновые и четвертичные отложения Западной Сибири. М.: Наука, 1968. С. 140–163.
- Леонтьев П.А., Греков И.М., Субетто Д.А., Кузнецов Д.Д., Колька В.В., Лудикова А.В., Потахин М.С., Сапелко Т.В., Сырых Л.С., Толстобров Д.С. Стратиграфия озерных отложений Онежского полуострова, Белое море // Общество. Среда. Развитие. 2016. № 3. С. 125–129.
- Макаров В.И., Шукин Ю.К., Юдахин Ф.Н. Позиция Соловецких островов в неотектонической структуре Беломорья, их природа и современная геодинамика // Литосфера. 2007. № 3. С. 86–94.
- Никишин Н.А. Особенности развития берегов Соловецких островов в голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1984. № 5. С. 55–57.
- Полякова Е.И., Новичкова Е.А., Лисицын А.П., Баух Х.А., Рыбалко А.Е. Современные данные по био-стратиграфии и геохронологии донных осадков Белого моря // ДАН. 2014. Т. 454. № 4. С. 467–473.
<https://doi.org/10.7868/S0869565214040203>
- Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / ред. Ю.Г. Шварцман, И.Н. Болотов. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007. 184 с.
- Репкина Т.Ю., Романенко Ф.А., Лудикова А.В., Зарецкая Н.Е. Северо-западные берега Онежского полуострова Белого моря в голоцене: условия развития, динамика, хронология // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 6. С. 888–904.
<https://doi.org/10.31857/S2587556620060096>

- Романенко Ф.А., Шилова О.С.* Последледниковое поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озерно-болотных отложений п-ова Киндо // ДАН. 2012. Т. 442. № 4. С. 544–548.
- Рыбалко А.Е., Журавлев В.А., Семенова Л.Р., Токарев М.Ю.* Четвертичные отложения Белого моря и история развития современного Беломорского бассейна в позднем неоплейстоцене – голоцене // Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история / отв. ред. А.П. Лисицин. М.: Научный мир, 2017. С. 84–127.
- Соловецкие острова: духовное, культурное и природное наследие. М., 2006. 680 с.
- Субетто Д.А.* Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. 343 с.
- Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Сапелко Т.В., Лисицын А.П., Евзеров В.Я., П. ван Беек, Суо М., Субетто Г.Д.* Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // ДАН. 2012. Т. 446. № 2. С. 183–190.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X12090140>
- Шварцман Ю.Г., Болотова Г.Н., Болотов И.Н., Изловский С.А.* Структура и пространственное распределение компонентов природных комплексов Соловецкого архипелага // Вестн. Поморского ун-та. 2005. Сер. 1. Естественные и точные науки. № 1. С. 4–17.
- Baranskaya A.V., Khan N.S., Romanenko F.A., Roy K., Pelrier W.R., Horton B.P.* A postglacial relative sea-level database for the Russian Arctic coast // Quat. Sci. Rev. 2018. Vol. 199. P. 188–205.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.033>
- Cayer D., Bhiry N.* Holocene climate and environmental changes in western subarctic Québec as inferred from the sedimentology and the geomorphology of a lake watershed // Arctic, Antarctic and Alpine Res. 2014. Vol. 46. Iss. 1. P. 55–65.
<https://doi.org/10.1657/1938-4246.46.1.55>
- Corner G.D., Haugane E.* Marine-lacustrine stratigraphy of raised coastal basins and postglacial sea-level change at Lyngen and Vanna, Troms, northern Norway // Norsk Geologisk Tidsskrift. 1993. Vol. 73. P. 175–197.
- Demidov I.N., Houmark-Nielsen M., Kjær K.H., Larsen E.* The last Scandinavian Ice Sheet in northwestern Russia: ice flow patterns and decay dynamics // Boreas. 2006. Vol. 35. P. 425–443.
<https://doi.org/10.1080/03009480600781883>
- Dreßler M., Schult M., Schubert M., Buck J.* Basin elevation and salinity changes: late Holocene development of two freshwater lakes at the Karelian White Sea coast, north-west Russia as reflected in their sediments // Hydrobiologia. 2009. Vol. 631. P. 247–266.
<https://doi.org/10.1007/s10750-009-9814-9>
- Eronen M., Glückert G., Hatakka L., van de Plassche O., van der Plicht J., Rantala P.* Rates of Holocene isostatic uplift and relative sea-level lowering of the Baltic in SW Finland based on studies of isolation contacts // Boreas. 2001. Vol. 30. P. 17–30.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2001.tb00985.x>
- García-Rodríguez F., del Puerto L., Inda H., Castineira C., Bracco R., Sprechmann P., Scharf B.* Preliminary paleolimnological study of Rocha lagoon, SE Uruguay // Limnologia. 2001. Vol. 31. P. 221–228.
- Kjemperud A.* Late Weichselian and Holocene shoreline displacement in the Trondheimsfjord area, central Norway // Boreas. 1986. Vol. 15. P. 61–82.
- Long A.J., Woodroffe S.A., Roberts D.H., Dawson S.* Isolation basins, sea-level changes and the Holocene history of the Greenland Ice Sheet // Quat. Sci. Rev. 2011. Vol. 30. P. 3748–3768.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.10.013>
- Ludikova A.V., Subetto D.A., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V.* From a large basin to a small lake: Siliceous microfossils stratigraphy of the isolation basins on Big Solovetskiy Island (the White Sea, NW Russia) and its implication for paleoreconstructions // Quat. Int. (Available online 13 July 2021). (In press).
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.07.007>
- Lunkka J.-P., Putkinen N., Miettinen A.* Shoreline displacement in the Belomorsk area, NW Russia during the Younger Dryas Stadial // Quat. Sci. Rev. 2012. Vol. 37. P. 26–37.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.01.023>
- Miettinen A., Eronen M., Hyvärinen H.* Land uplift and relative sea-level changes in the Loviisa area, southeastern Finland, during the last 8000 years // Posiva Rep. 1999. Vol. 99. Iss. 28. P. 1–26.
- Ramsey C.* Bayesian analysis of radiocarbon dates // Radiocarbon. 2009. Vol. 51. Iss. 1. P. 337–360.
<https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
- Snyder J.A., Forman S.L., Mode W.N., Tarasov G.A.* Postglacial relative sealevel history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia // Boreas. 1997. Vol. 26. P. 329–346.
- Sterken M., Roberts S.J., Hodgson D.A., Vyverman W., Balbo A.L., Sabbe K., Moreton S.G., Verleyen E.* Holocene glacial and climate history of Prince Gustav Channel, northeastern Antarctic Peninsula // Quat. Sci. Rev. 2012. Vol. 31. P. 93–111.
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al.* Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quat. Sci. Rev. 2004. Vol. 23. P. 1229–1271.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>

Chrono- and Lithostratigraphy of Lake Sediments of Anzer Island (Solovetsky Islands) in the Context of the Post-Glacial History of the White Sea

D. D. Kuznetsov¹, *, A. V. Ludikova¹, D. A. Subetto², P. A. Leontev², I. M. Grekov², M. S. Potakhin^{3, 4}, T. V. Sapelko¹, L. S. Syrykh², and D. S. Tolstobrov⁵

¹*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – SPC RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia*

³*Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

⁴*Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia*

⁵*Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

*e-mail: dd_kuznetsov@mail.ru

Paleolimnological studies have been performed at 9 lakes at the Anzer Island (Solovetsky Islands, the White Sea). Changes in lithostratigraphy and organic matter content in the sediment sequences reflect changes in sedimentation environments related to the isolation from larger basins. Based on the Holocene dynamics of organic matter content, three periods of the organic accumulation were distinguished in the lakes located below 22 m a.s.l. corresponding to the main stages of the lakes' evolution. At the earliest stage, lake basin was incorporated into a larger basin (glaciolacustrine or marine), and the lowest organic matter content is characteristic for its sediments. At the isolation stage, laminated sediments form, and organic matter content rapidly increases. At the isolated-lake stage, organic-rich sediments are accumulated. The calculated rate of the lacustrine (gyttja) sedimentation is ca. 0.2–0.3 mm year⁻¹. Organic sedimentation in the lakes located at 22–35 m a.s.l. at Solovetsky Islands have been taking place since 10500–11000 cal. years BP. The age of the lakes' isolation was found to correlate to their elevation above sea level. Based on the time of the isolation and the onset of the lacustrine sedimentation, the shoreline displacement curve for the Anzer Island was constructed for the second half of the Holocene. Ca. 4800–4400 cal. years BP, the relative sea level was below 11 m a.s.l., while ca. 1900–1700 cal. years BP the shoreline regressed below 2 m a.s.l. The calculated rate of the shoreline retreat is ca. 2–3 mm year⁻¹. The Holocene marine limit at the Solovetsky Islands was corrected, and established at 17–21 m a.s.l.

Keywords: White Sea, Solovetsky Islands, Anzer, the Holocene, isolation basins, lake sediments, lacustrine sedimentation, organic matter in sediments, loss on ignition, seashore displacement

REFERENCES

- Baranskaya A.V., Khan N.S., Romanenko F.A., Roy K., Peltier W.R., Horton B.P. A postglacial relative sea-level database for the Russian Arctic coast. *Quat. Sci. Rev.*, 2018, vol. 199, pp. 188–205.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.033>
- Beloe more. Sedimentogenez i istoriya razvitiya v golotsene* [The White Sea. Sedimentogenesis and History of Development in the Holocene]. Nevevskii E.N., Medvedev V.S., Kalinenko V.V., Eds. Moscow: Nauka Publ., 1977. 236 p.
- Cayer D., Bhiry N. Holocene climate and environmental changes in western subarctic Québec as inferred from the sedimentology and the geomorphology of a lake watershed. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 2014, vol. 46, no. 1, pp. 55–65.
<https://doi.org/10.1657/1938-4246.46.1.55>
- Corner G.D., Haugane E. Marine-lacustrine stratigraphy of raised coastal basins and postglacial sea-level change at Lyngen and Vanna, Troms, northern Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 1993, vol. 73, pp. 175–197.
- Demidov I.N., Houmark-Nielsen M., Kjær K.H., Larsen E. The last Scandinavian Ice Sheet in northwestern Russia: ice flow patterns and decay dynamics. *Boreas*, 2006, no. 35, pp. 425–443.
<https://doi.org/10.1080/03009480600781883>
- Dreßler M., Schult M., Schubert M., Buck J. Basin elevation and salinity changes: late Holocene development of two freshwater lakes at the Karelian White Sea coast, northwest Russia as reflected in their sediments. *Hydrobiol.*, 2009, vol. 631, pp. 247–266.
<https://doi.org/10.1007/s10750-009-9814-9>
- Eronen M., Glückert G., Hatakka L., van de Plassche O., van der Plicht J., Rantala P. Rates of Holocene isostatic uplift and relative sea-level lowering of the Baltic in SW Finland based on studies of isolation contacts. *Boreas*, 2001, vol. 30, pp. 17–30.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2001.tb00985.x>
- Evzerov V.Ya., Kol'ka V.V., Korsakova O.P. The history of the development of marine basins in the White Sea depression over the past 130 thousand years (state of the question and prospects for research). *Byull. Komissii po Izucheniyu Chetvertichnogo Perioda*, 2007, vol. 67, pp. 54–65. (In Russ.).
- García-Rodríguez F., del Puerto L., Inda H., Castineira C., Bracco R., Sprechmann P., Scharf B. Preliminary paleolimnological study of Rocha lagoon, SE Uruguay. *Limnologica*, 2001, vol. 31, pp. 221–228.
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR* [Hydrometeorology and Hydrochemistry of the Seas of the USSR]. Vol. 2: *Beloe more* [The White Sea]. Part. 1: *Gidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorological Conditions]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1991. 240 p.

- Kjemperud A. Late Weichselian and Holocene shoreline displacement in the Trondheimsfjord area, central Norway. *Boreas*, 1986, vol. 15, pp. 61–82.
- Kol'ka V.V., Korsakova O.P., Lavrova N.B., Shelekhova T.S., Tolstobrova A.N., Tolstobrov D.S., Zaretskaya E.N. Stratigraphy of bottom sediments of small lakes and paleogeography of the western shore of the Onega Bay of the White Sea in the Late Glacial and Holocene. *Geomorfologiya*, 2018, no. 2, pp. 48–59. (In Russ.).
- Kol'ka V.V., Korsakova O.P. The position of the White Sea coastline and neotectonic movements in the northeast of Fennoscandia in the Late Glacial and Holocene. In *Sistema Belogo morya* [System of the White Sea]. Vol. 4: *Protessy osadkoobrazovaniya, geologiya i istoriya* [Sedimentation Processes, Geology and History]. Lisitsin A.P., Ed. Moscow: Nauchnyi Mir Publ., 2017, pp. 214–241. (In Russ.).
- Kuznetsov D.D., Subetto D.A. *Stratigrafiya donnykh otlozhenii ozer Karel'skogo peresheika* [Stratigraphy of Lake Sediments of the Karelian Isthmus]. Moscow: GEOS Publ., 2019. 120 p.
- Kuznetsov D.D., Subetto D.A., Leont'ev P.A. Organic sedimentation in small lakes of the White Sea basin in the Holocene. In *Mater. Vseross. nauchn. konf. "Pozdne- i postglyatsial'naya istoriya Belogo morya: geologiya, tektonika, sedimentatsionnye obstanovki, khronologiya"* [Proc. All-Russ. Sci. Conf. "Late and Postglacial History of the White Sea: Geology, Tectonics, Sedimentation Conditions, Chronology"]. Moscow: Univ. Kniga Publ., 2018, pp. 74–79. (In Russ.).
- Kuznetsov D.D., Subetto D.A., Sapelko T.V., Ludikova A.V. Hydrographic network of the northern part of the Karelian Isthmus in the Holocene according to data on the structure of sediments of small lakes. *Geomorfologiya*, 2015, no. 1, pp. 54–69. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-1-54-69>
- Lavrova M.A. Late glacial and post-glacial history of the White Sea. In *Neogenovye i chevertichnye otlozheniya Zapadnoi Sibiri* [Neogene and Quaternary Deposits of Western Siberia]. Moscow: Nauka Publ., 1968, pp. 140–163. (In Russ.).
- Leont'ev P.A., Grekov I.M., Subetto D.A., Kuznetsov D.D., Kol'ka V.V., Ludikova A.V., Potakhin M.S., Sapelko T.V., Syrykh L.S., Tolstobrov D.S. Stratigraphy of lake sediments of the Onega Peninsula, White Sea. *Obschestvo. Sreda. Razvitie*, 2016, no. 3, pp. 125–129. (In Russ.).
- Long A.J., Woodroffe S.A., Roberts D.H., and Dawson S. Isolation basins, sea-level changes and the Holocene history of the Greenland Ice Sheet. *Quat. Sci. Rev.*, 2011, vol. 30, pp. 3748–3768.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.10.013>
- Ludikova A.V., Subetto D.A., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V. From a large basin to a small lake: Siliceous microfossils stratigraphy of the isolation basins on Big Solovetskiy Island (the White Sea, NW Russia) and its implication for paleoreconstructions. *Quat. Int.*, 2021. (In press).
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.07.007>
- Lunkka J.-P., Putkinen N., Miettinen A. Shoreline displacement in the Belomorsk area, NW Russia during the Younger Dryas Stadial. *Quat. Sci. Rev.*, 2012, vol. 37, pp. 26–37.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.01.023>
- Makarov V.I., Shchukin Yu.K., Yudakhin F.N. The position of the Solovetsky Islands in the neotectonic structure of the White Sea, their nature and modern geodynamics. *Litosfera*, 2007, no. 3, pp. 86–94. (In Russ.).
- Miettinen A., Eronen M., Hyvärinen H. Land uplift and relative sea-level changes in the Loviisa area, southeastern Finland, during the last 8000 years. *Posiva Report*, 1999, vol. 99-28, pp. 1–26.
- Nikishin N.A. Features of the development of the shores of the Solovetsky Islands in the Holocene. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1984, no. 5, pp. 55–57. (In Russ.).
- Polyakova E.I., Novichkova E.A., Lisitsyn A.P., Baukh H.A., Rybalko A.Ye. Modern data on the biostratigraphy and geochronology of White Sea sediments. *Dokl. Earth Sci.*, 2014, vol. 454, part 2, pp. 169–174.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X14020032>
- Prirodnaya sreda Solovetskogo arhipelaga v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [The Environment of the Solovetsky Archipelago in a Changing Climate]. Shvartsman Yu.G., Bolotov I.N., Eds. Yekaterinburg: RAN, 2007. 184 p.
- Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 2009, no. 51-1, pp. 337–360.
<https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
- Repkina T.Yu., Romanenko F.A., Ludikova A.V., Zaretskaya N.E. The northwestern shores of the Onega Peninsula of the White Sea in the Holocene: development conditions, dynamics, chronology. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 6, pp. 888–904. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587556620060096>
- Romanenko F.A., Shilova O.S. Postglacial uplift of the Karelian coast of the White Sea according to radiocarbon and diatom analyses of lake-marsh deposits of the Kindo Peninsula. *Dokl. Akad. Nauk*, 2012, vol. 442, no. 4, pp. 544–548. (In Russ.).
- Rybalko A.E., Zhuravlev V.A., Semenova L.R., Tokarev M.Yu. Quaternary sediments of the White Sea and the history of the development of the modern White Sea basin in the late Pleistocene – Holocene. In *Sistema Belogo morya* [System of the White Sea]. Vol. 4: *Protessy osadkoobrazovaniya, geologiya i istoriya* [Sedimentation Processes, Geology and History]. Lisitsin A.P., Ed. Moscow: Nauchnyi Mir Publ., 2017, pp. 84–127. (In Russ.).
- Shvartsman Yu.G., Bolotova G.N., Bolotov I.N., Iglovskii S.A. Structure and spatial distribution of components of natural complexes of the Solovetsky Archipelago. *Vestn. Pomorskogo Univ., Ser. Estestv. Tochn. Nauki*, 2005, no. 1, pp. 4–17. (In Russ.).
- Snyder J.A., Forman S.L., Mode W.N., Tarasov G.A. Post-glacial relative sealevel history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia. *Boreas*, 1997, vol. 26, pp. 329–346.
- Solovetskie ostrova: dukhovnoe, kul'turnoe i prirodnoe nasledie* [Solovetsky Islands: Spiritual, Cultural and Natural Heritage]. Moscow, 2006. 680 p.
- Sterken M., Roberts S.J., Hodgson D.A., Vyverman W., Balbo A.L., Sabbe K., Moreton S.G., Verleyen E. Holocene glacial and climate history of Prince Gustav

- Channel, northeastern Antarctic Peninsula. *Quat. Sci. Rev.*, 2012, vol. 31, pp. 93–111.
- Subetto D.A. *Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii* [Lake Sediments: Paleolimnological Reconstructions]. St. Petersburg: Ross. Gos. Pedagog. Univ. im. Gertsena, 2009. (In Russ.).
- Subetto D.A., Shevchenko V.P., Ludikova A.V., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V., Lisitsyn A.P., Evzerov V.Ya., Beek P. van, Suo M., Subetto G.D. Chronology of isolation of the lakes of the Solovetsky Archipelago and the rate of modern lake sedimentation. *Dokl. Akad. Nauk*, 2012, vol. 446, no. 2, pp. 183–190.
- (In Russ.).
<https://doi.org/10.1134/S1028334X12090140>
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quat. Sci. Rev.*, 2004, vol. 23, pp. 1229–1271.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>
- Vakhrameeva E.A., Losyuk G.N. Distribution of organic matter in the bottom sediments of the meromictic lake Trekhtsvetnoe, Kandalaksha Bay of the White Sea). In *Geografiya: razvitiye nauki i obrazovaniya* [Geography: Development of Science and Education]. St. Petersburg: Ross. Gos. Pedagog. Univ. im. Gertsena, 2021, vol. 1, pp. 290–293. (In Russ.).