

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ:
ОТ КАЛИНИНГРАДА ДО КАМЧАТКИ

УДК 556.56→574(470.12)

СОЗДАНИЕ ОПОРНОЙ ТРАНСЕКТЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ
ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ВОДНО-БОЛОТНЫХ УГОДИЙ
ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРИОНЕЖСКОЙ НИЗМЕННОСТИ[#]

© 2023 г. П. А. Рязанцев^{1,*}, П. А. Игнашов^{2,**}

¹Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

²Институт биологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

*E-mail: chthonian@yandex.ru

**E-mail: paul.ignashov@gmail.com

Поступила в редакцию 19.04.2023 г.

После доработки 10.08.2023 г.

Принята к публикации 08.09.2023 г.

Постледниковая история развития побережья Онежского озера в совокупности с современными процессами создает условия для формирования сложных прибрежных экосистем, которые могут быть уязвимы из-за возможных климатических изменений и антропогенного влияния. К таким системам относятся водно-болотные угодья, протянувшиеся вдоль восточного и южного побережья Онежского озера. Научный интерес представляет территория в районе устья р. Андомы, так как здесь сочетается влияние русловых процессов крупной реки, динамика побережья Онежского озера, а также развитие верховых торфяников. Целью исследований было детальное изучение структуры голоценовых отложений на северном берегу р. Андомы, которая отражает этапы формирования и изменчивость природных условий приозерной низменности. Для этого была проложена опорная трансекта, включающая профиль георадиолокационных наблюдений протяженностью 4800 м, дополненный скважинами. На основе данных георадиолокации в сочетании с исследованием торфа по скважинам получен комплексный разрез, характеризующий внутреннее строение торфяника. Вдоль профиля обнаружены аккумулятивные структуры, такие как погребенные береговые валы и палеодюны. Также установлено платоподобное поднятие коренного ложа болота, обрамленное локальными понижениями. Подобную структуру можно рассматривать как деформацию, связанную с гляциодислокациями или неотектоническим воздействием. Кроме основных структурных элементов найдены локальные эрозионные врезы в кровле лимноаллювия, сопровождающиеся песчаными отложениями, которые могут быть приурочены к погребенным палеоруслам р. Андомы. Анализ комплексной трансекты в совокупности с описанием растительности показал существование зон, отличающихся по биолого-экологическим условиям, которые способствуют биологическому разнообразию в районе работ. В перспективе создание подобных опорных трансектов обеспечивает базу для первичного выявления уязвимостей и долгосрочного мониторинга экологической трансформации экосистем.

Ключевые слова: Онежское озеро, река Андома, георадарные образы, торфяник, биоразнообразие, экологический градиент

DOI: 10.31857/S2949178923040096, **EDN:** YCAWCP

ВВЕДЕНИЕ

Постледниковая история развития побережья Онежского озера в совокупности с современным природным и антропогенным воздействием создает условия для формирования сложных при-

брежных экосистем (Кауфман, 1990; Филиппов, 2008), которые в свою очередь обладают высокой уязвимостью из-за возможных климатических изменений и роста антропогенной нагрузки в пределах водосбора Онежского озера (Filatov et al., 2019; Палеолимнология ..., 2022). К таким системам относятся водно-болотные угодья, протянувшиеся вдоль восточного и южного побережья Онежского озера. Большой научный интерес представляет территория, расположенная в районе устья р. Андомы, так как здесь сочетается влияние русловых процессов крупной реки, динамика

[#] Ссылка для цитирования: Рязанцев П.А., Игнашов П.А. (2023). Создание опорной трансекты на основе данных георадиолокации для водно-болотных угодий юго-восточной части Прионежской низменности // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 4. С. 57–71. <https://doi.org/10.31857/S2949178923040096>. <https://elibrary.ru/YCAWCP>

побережья Онежского озера, а также развитие верховых торфяников. Следует отметить научно обоснованное предложение рассматривать данную территорию в качестве ключевого элемента “экологического каркаса” Вологодской области (Иванищева, 2010), а также наличие в районе уникального общегеологического памятника природы Андомская гора (Иванов и др., 2003).

Цель представленных исследований заключалась в создании опорной трансекты, проходящей по болоту от русла р. Андомы к урезу Онежского озера, которая отражает изменение природных условий и описывает взаимодействие разных уровней экосистемы для изучаемой приозерной низменности. Так как рассматриваемый объект имеет значительный масштаб, в качестве основы для анализа торфяника и подстилающих его минеральных грунтов вдоль трансекты было предложено использовать данные георадиолокационных зондирований. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при изучении болотных систем, так как позволяет определять глубину залегания минерального основания залежи, а также выделять стратиграфические слои, обусловленные неоднородностями торфа (Comas et al., 2005; Sass et al., 2010; Proulx-McInnis et al., 2013; Walter et al., 2016; Бричёва и др., 2017; Рязанцев, Игнашов, 2019; Pezdir et al., 2021). Кроме того, изучение грунтов, подстилающих торф, позволяет определить факторы, влияющие на форму и толщину залежи. Ранее было продемонстрировано, что георадарные данные могут быть использованы в качестве основы для реконструкций латерального развития торфяников относительно морфологии ландшафта (Kettridge et al., 2012; Loisel et al., 2013); исследований постледниковых образований и их роли в формировании залежи торфа (Leopold, Völkel, 2003; Comas et al., 2011); гидрогеологического контроля подземных вод в торфянике (Hare et al., 2017; Trappe, Kneisel, 2019). Весомое преимущество метода георадиолокации — получение непрерывных данных о строении приповерхностной части геологического разреза при исследовании достаточно крупных морфологических единиц ландшафтов, таких как урочища и подурочища, за счет высокой производительности.

На сегодняшний день актуальная задача для георадиолокации при обследовании торфяников связана с оценкой запасов углерода (Parsekian et al., 2012; Comas et al., 2017; Carless et al., 2021). Это обусловлено возможностью точного определения мощности торфа по георадарным данным на достаточно большой площади. При этом возрастает роль общего экосистемного анализа, в том числе лучшего понимания взаимосвязи растительного покрова с гидрологией и внутренним строением подстилающих грунтов. В свете чего задачи научно-исследовательских работ включали следующие пункты: выполнение непрерывно-

го профиля георадиолокационных наблюдений от р. Андомы к побережью Онежского озера; анализ строения торфяника с опорой на заверочные скважины; выявление особенностей осадочных пород вдоль заданной трансекты, с последующей их привязкой к этапам регрессии Онежского озера в голоцене; определение биолого-экологической зональности вдоль трансекты и ее взаимосвязи с геологическим строением.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА РАБОТ

С физико-географической точки зрения полевые работы проведены на части сложной болотной системы в нижнем течении р. Андомы — Сухоялецком болоте (рис. 1). Территория болота относится к Южно-Прионежскому болотному району (Абрамова, 1965), степень его заболоченности составляет 12.8% (Филоненко, Филиппов, 2013). В данном районе преобладают переходные кустарничково-пушицевые с сосной и березой, и низинные топяные хвощево-осоковые и осоково-гипновые с ивами болота, преимущественно сформированные путем озерного заболачивания (Абрамова, 1965). По данным (Филлипов, 2008) на основной площади болота преобладают мезоолиготрофные и олиготрофные болотные участки, а в приречной части встречаются евтрофные и мезотрофные. В структуре торфяной залежи отмечаются все типы торфов, но доминируют переходные, зольность торфов в пределах 3.1–6.5% (в среднем 4.9%). Средняя глубина залежи — 2.2 м (максимальная 5.1 м). Во флоре болотной системы отмечено около 85 видов сосудистых растений и более 40 видов мхов. Болото подлежит охране в границах “нулевой” залежи как типичное верховое облесенное болото и ценный природный объект.

Базовая информация о четвертичных образованиях района работ была получена на основе листа Р-37-XXV и пояснительной записки к нему (Государственная геологическая карта, 2021). В соответствии с геологической картой, на участке исследований на дочетвертичных образованиях залегает морена ошашковского горизонта (gPpos2), сложенная преимущественно валунными суглинками. Морену покрывают осадки голоцена в составе: лимноаллювий (laH) — пески, алевриты, глины мощностью 2.5–15.0 м; озерный ундальювий (lvH) — пески разнозернистые мощностью до 7.7 м; эолий (vH) — слагает песчаные дюны мощностью 3–5 м; аллювий (aH) — пески, галечники, супеси мощностью до 8.6 м; палиюстрий (pH) — торф. Полная мощность четвертичных отложений в районе оценивается в 20 м.

Район работ в геоморфологическом плане представляет собой плоскую равнину с абс. отметками 30–50 м. Современный рельеф сформировался на протяжении поздневалдайского оле-

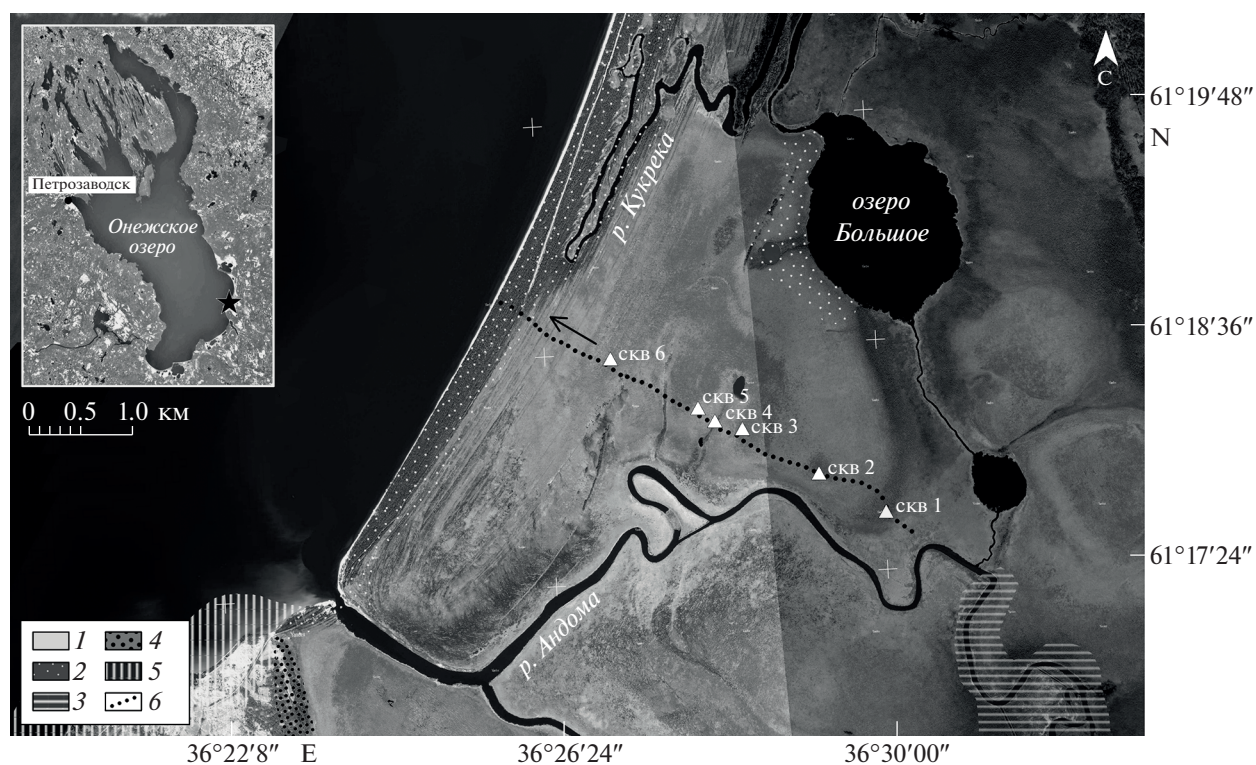


Рис. 1. Обзорная схема района работ на основе космоснимка.

1 – палюстрий (pIH) – торф; 2 – эолий (vH) – песчаные дюны; 3 – аллювий поймы и надпойменных террас (α H) – галька, пески с гравием, супеси, суглинки; 4 – лимноаллювий (laH) – пески, алевроиты, глины; 5 – выходы дочетвертичных образований; 6 – расположение трансекты.

Fig. 1. Overview scheme of the study site based on a satellite image.

1 – peat (pIH); 2 – eolian sand dunes (vH); 3 – alluvium of the floodplain terraces – pebbles, sands with gravel, sandy loams, loams (α H); 4 – limno-alluvial sands, silts, clays (laH); 5 – outcrops of pre-Quaternary bedrocks; 6 – location of the transect.

денения, когда в пределах района располагалась Онежско-Белозерская ледниковая лопасть. Границами последней, отличавшейся большой активностью, служили ледоразделы, приуроченные к Мегорской гряде и Андомской возвышенности (Государственная геологическая карта, 2021). На основании палеорекострукции развития Онежского озера исследуемый район относится к озерной террасе, начиная с бореала (Палеолимнология Онежского озера, 2022). Следует отметить, что покров палюстрия, несмотря на относительно небольшую мощность, выступает фактором, сдерживающим изучение четвертичных отложений прибрежной территории и, соответственно, трансгрессии Онежского озера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод георадиолокации основан на излучении коротких электромагнитных импульсов с последующей регистрацией сигнала, отраженного от геологических неоднородностей среды (Владов, Старовойтов, 2004). В благоприятных условиях георадиолокация характеризуется высокой производительностью и разрешающей способно-

стью, вследствие чего активно используется при изучении стратиграфии осадочных пород, реконструкции условий осадконакопления и характера осадочных процессов (Neal, 2004). При работе на болотах эффективность метода связана с достаточно высоким контрастом электрофизических свойств торфа и подстилающего минерального грунта. Так, относительная диэлектрическая проницаемость торфа варьирует в диапазоне 30–65 единиц, тогда как минеральные грунты имеют диапазон 5–30 в зависимости от состава и влажности. В результате подошва торфяной залежи характеризуется интенсивным отражением зондирующего георадарного сигнала. Следует отметить, что изменчивость внутренних свойств торфа, таких как плотность, влажность и степень разложения также формирует дополнительные отражающие границы (Рязанцев, Игнашов, 2019).

Исследования методом георадиолокации осуществлялись при помощи георадара ОКО-2 (Логис-Геотех, Россия) с антенным блоком 100М, центральная частота которого составляет 100 МГц. Для такой частоты длина электромагнитной волны в среде с $\epsilon = 40$ –60 составляет 0.3–0.4 м, это



Рис. 2. Фотография процесса выполнения георадарной съемки.

Fig. 2. Photo of the process of performing a GPR survey.

обеспечивает вертикальную разрешающую способность 0.3 м. Шаг сканирования по профилю составлял 0.1 м, пройденное расстояние определялось датчиком перемещения. Регистрация сигнала осуществлялась на временной развертке 400 нс с 12-типовторным накоплением сигнала. Профиль георадиолокационных наблюдений вдоль трансекты фиксировался GPS-приемником (рис. 2).

В программе GeoScan32 радарограммы обрабатывались с использованием процедур вычитания среднего, частотной фильтрации, коррекции яркости и усиления, коррекции высоты. Далее выполнялся анализ радарограммы, отмечались отдельные седиментационные комплексы и им присваивались значения относительной диэлектрической проницаемости. Средняя скорость электромагнитного сигнала в торфяном массиве составила 4.7 см/нс, что обеспечило эффективную глубину исследования до 7 м. Для песчаных отложений береговой линии скорость была выше — 6.0 см/нс, а глубина зондирования достигала 11 м.

За счет сопоставления георадарных рефлекторов и фаций со стратиграфическими слоями и их последующего прослеживания вдоль опорной трансекты, определялось положение структурных элементов четвертичного покрова, пространственное распространение и мощность его элементов. Установленные на радарограмме неоднородности строения торфяной залежи заверялись ручным бурением торфяным буром конструкции Инсторфа. Скважины бурились вплоть до минерального основания болота. Всего было выполнено шесть скважин глубиной от 2.5 до 6.3 м с отбором и описанием образцов торфа. В лаборатории болотных экосистем ИБ КарНЦ выполнен ботанический анализ торфа. Стратиграфические ко-

лонки торфяной залежи построены с использованием программы “Kogri” (Кутенков, 2013). Дополнительно вдоль трансекты было проведено выделение участков, отличающихся по происхождению, условиям водно-минерального питания и составу растительного покрова. На каждом участке на временных пробных площадях 10×10 м проводились геоботанические описания по общепринятой методике (Шенников, 1964) с составлением списка видов, растущих на пробной площади и указанием их проективного покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате работ был выполнен непрерывный георадарный профиль, проходящий с юго-востока на северо-запад (аз. 302°), от излучины р. Андомы к побережью Онежского озера, общей протяженностью 4800 м. Координаты начала профиля 61.29318° с.ш. 36.50467° в.д., окончания 61.31505° с.ш. 36.43136° в.д. Первичный анализ записи показал четкий рефлектор, сформированный на границе торфяной залежи и минерального основания (рис. 3). При этом по морфологии, отражающей границы, характеру волнового поля и степени затухания сигнала были получены сведения об изменчивости подстилающих грунтов. На начальном этапе на радарограмме можно выделить два фрагмента обследуемой торфяной залежи, обусловленных типом подстилающих осадков. Первый фрагмент на профиле имеет протяженность порядка 1600 м и мощность торфа 2—3 м, он залегает на песчаном ундулативии. Тогда как второй фрагмент профиля протяженностью 3200 м пересекает преимущественно торфяной массив Сухоялецкого болота с глубинами от 3 до 8 м, который подстилается глинистым лимноаллювием и аллювием.

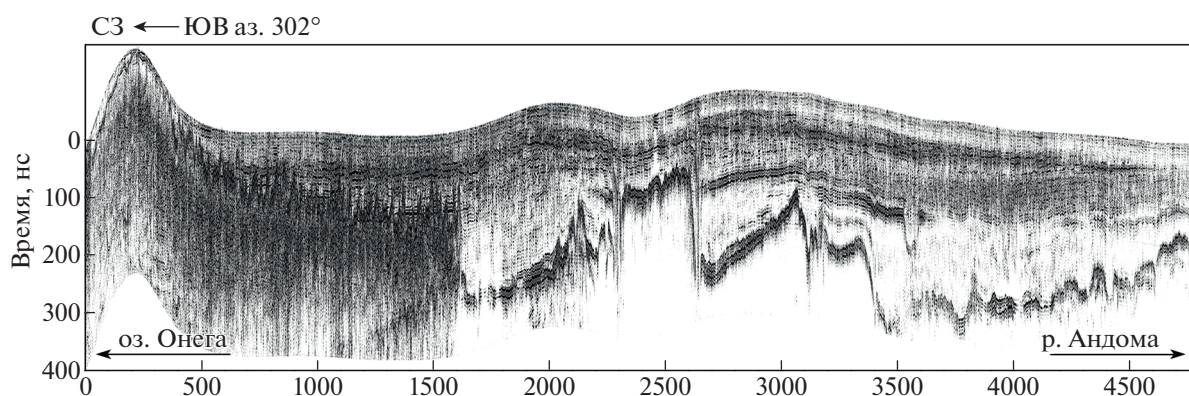


Рис. 3. Временной георадарный разрез, полученный вдоль трансекты.

Fig. 3. GPR time section obtained along the transect.

Дальнейшая интерпретация георадарных данных проводилась с использованием анализа георадарных фаций — выявления фрагментов волнового поля, характерных для определенного типа осадков (рис. 4). В результате были получены основные георадарные образы — паттерны, которые отражают генеральные изменения строения четвертичных отложений вдоль трансекты (табл. 1).

Интересно наличие платоподобного поднятия минерального основания болота на пикетах 2300–2600, воздымающегося на 2–4 м и обрамляемого зонами разрывов и смещения с сопутствующими водотоками. Исследование внутренних георадарных фаций этого плато показывает присутствие наклонных рефлекторов, которые прилегают под углом 7–8° к своеобразному ядру на пикете 2 640, для которого фиксируется локальное затухание сигнала. Далее, на глубине порядка 6–7 м обнаружена ось синфазности, маркирующая нижнюю границу георадарного комплекса (рис. 5). Установленные особенности позволяют рассматривать выделенный участок как деформацию минерального ложа торфяника. Подобная деформация может быть обусловлена гляциодислокацией или неотектоническим воздействием, затрагивающим всю толщу четвертичных отложений. Впоследствии эта структура была частично эродирована, а ее форма повлияла на развитие болота.

Также в толще торфяной залежи в юго-восточной части трансекты были выявлены отдельные интенсивные рефлекторы, которые в скважинах были идентифицированы как глинистые прослойки между торфами (рис. 4, (е)). Образование подобных горизонтов в торфе может быть связано с эпизодическими разливами р. Андомы в период уже сформировавшегося торфяника. Верхняя граница глинистых прослоек практически совпадает с периодом перехода болота с низинной стадии развития на переходную, т.е. пока уровень

болота был ниже или совпадал с уровнем р. Андомы и Онежского озера, на него во время половодья и с паводками поступали питательные вещества. Позже уровень болота стал выше и аллювиальное влияние прекратилось. Сейчас центр болота получает воду и питательные вещества только с осадками, за исключением проточных топей, там, вероятно, есть выход подземных вод и питание более богатое.

Следующий этап работы заключался в проведении эколого-биологической типизации отдельных зон, отличающихся по внутреннему строению торфяной залежи, составом минерального основания, условиям водно-минерального питания и составу растительного покрова. Всего было выделено пять основных биолого-экологических зон, с учетом растительного покрова, строения торфяной толщи и минерального основания (рис. 6). Зона № 1 находится в области затопления поймы р. Андомы во время сезонного разлива. Зоны 2 и 3 образовались на прибрежной и мелководной части оз. Большое. Зона 4 приурочена к локальным зонам водонасыщения торфа, связанного с дислокациями в минеральном основании. Зона 5 образовалась на песчаных береговых валах Онежского озера. Далее приводится развернутое описание каждой из зон (см. дополнительные материалы)¹.

Зона 1. Участок болота, примыкающий к р. Андоме, и заливаемый ее водами в половодье. Покров мезоевтрофными осоково-травяными сообществами с участием ив, и слабо выраженным моховым покровом. Мощность торфяных отложений от 2 до 4 м, торф преимущественно низинного типа.

¹ Дополнительный материал публикуется на сайте журнала «Геоморфология и палеогеография» — <https://geomorphology.igras.ru/jour/pages/view/dopmat>

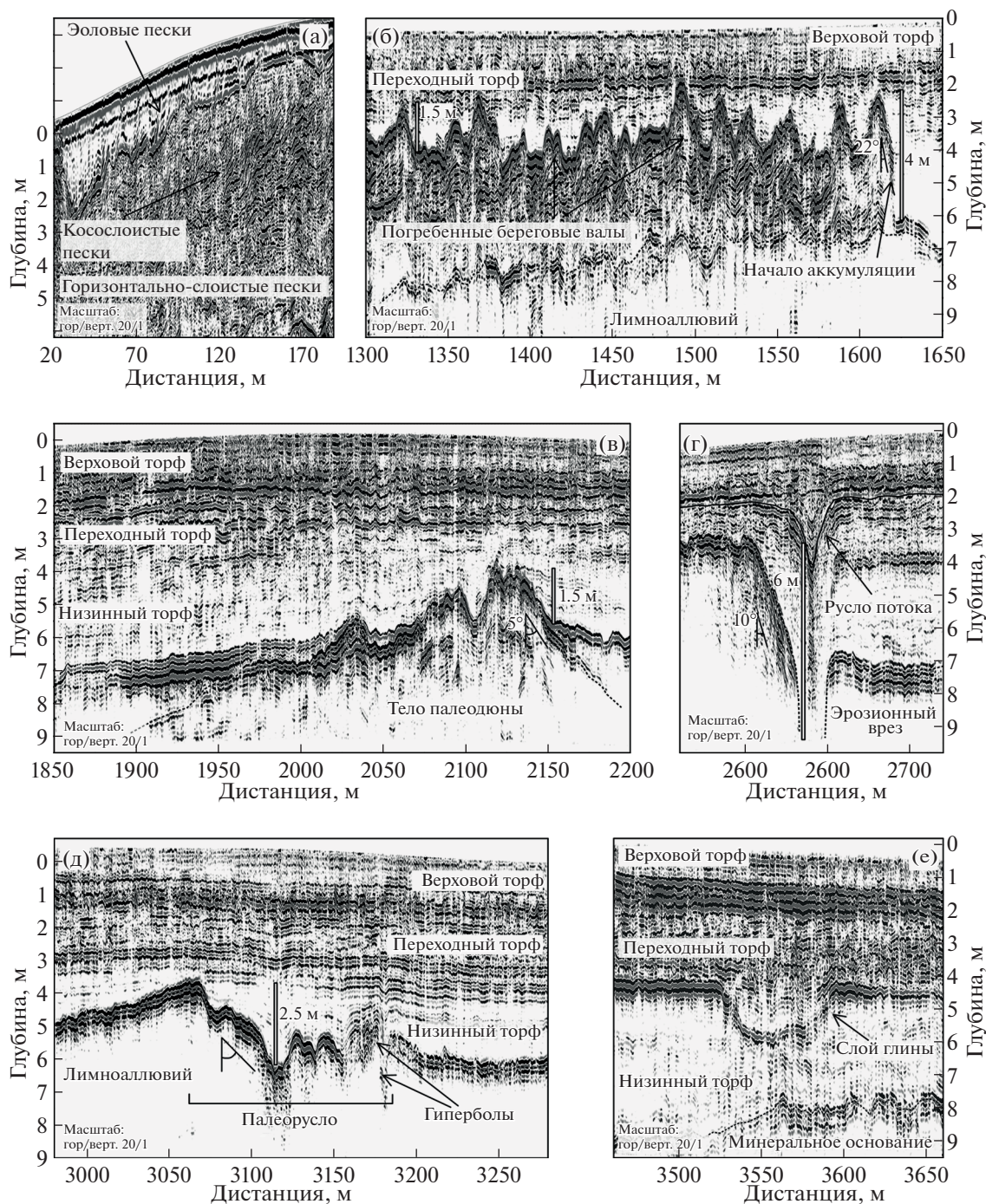


Рис. 4. Фрагменты георадарного профиля, демонстрирующие специфические участки записи: прибрежной части (а), погребенных береговых валов (б), погребенной палеодюны (в), водного потока в толще торфа (г), речного эрозионного вреза (д) и типичной торфяной толщи с прослоем глины (е).

Fig. 4. GPR cross-section fragments demonstrating specific patterns: coastal part (а), buried coastal ridges (б), buried paleodune (в), water flow in the peat deposit (г) and river erosion incision (д) and a typical peat strata with a clay interlayer (е).

Зона 2. Участок длиной около 2 км и шириной 250–300 м, вытянут с юга на север, покрытый мезоолиготрофным сосново-кустарничково-сфагновым сообществом. Разреженный древесный ярус представлен сосной *Pinus sylvestris* с примесью бе-

резы *Betula pubescens*, с сомкнутостью 0.1–0.2, высотой 2–6 м. Имеется хорошо развитый травяно-кустарничковый ярус с доминированием *Chamaedaphne calyculata*, *Ledum palustre* и *Eriophorum vaginatum*. Моховой покров сплошной и образо-

Таблица 1. Основные георадарные образы, выявленные вдоль трансекты, и критерии их идентификации
Table 1. Main GPR patterns identified along the transect and criteria for their identification

Пикеты на профиле, м	Описание георадарного образа	Геологическая интерпретация
0–240	Образ № 1 (рис. 4, (а)). Горизонтальные оси синфазности относительно низкой интенсивности, которые сменяются наклонными осями высокой интенсивности, а далее, начиная с 160 нс, рефлекторы снова принимают субгоризонтальную форму	Фация прибрежных песков, где сверху залегают переотложенные мелкие и бесструктурные эоловые пески (2 м). Ниже расположен слой намытых косослоистых песков ундаллювия (3–5 м), которые в свою очередь подстилаются горизонтально-слоистыми песками и алевроитами лимноаллювия
240–1600	Образ № 2 (рис. 4, (б)). Набор параллельных осей синфазности с множественными гиперболами. Далее расположена серия синформных волнообразных рефлекторов, с очень высокой амплитудой сигнала, которая снизу ограничена рефлектором и областью с высоким затуханием сигнала. Образ сменяется переходом к ровному полю, без интенсивных осей синфазности с резким смещением нижнего рефлектора	Серии береговых валов, сложенных плотными песками, шириной 10–20 м и высотой до 2 м, погребенных под слоем торфа от 0.5 до 3.5 м и эоловых отложений. Фация береговых валов залегает на отложениях алевроита лимноаллювия. При этом она резко прерывается на 1620 м от берега, под углом 22°, что указывает на область начала формирования береговых валов
1900–2200	Образ № 3 (рис. 4, (в)). Поднятие границы основания болота. Появление отражений на поздних временах (до 400 нс) не характерно для вмещающих грунтов, увеличение периода до 35 нс и амплитуды в 1.5–2 раза	Погребенная палеодюна, высотой до 2 м и протяженностью 200 м, расположенная в толще лимноаллювия
2260–2320 2600–2680	Образ № 4 (рис. 4, (г)). Локальная обстановка в виде прогиба осей синфазности, прерывающая субгоризонтальные оси синфазности торфа, с центральной “звенящей” зоной на всем времени записи	Зоны водотока в толще торфяника, шириной 20 м, приуроченные к эрозионным врезам в его минеральном основании
3050–3200 3360–3660	Образ № 5 (рис. 4, (д)). Участки погружения отражающей границы. Появление волнистых форм рефлекторов, а также сопутствующих гипербола и интенсивных отражений на поздних временах (>370 нс)	Эрозионные врезы в минеральное основание торфяника глубиной 1.5–2.5 м и протяженностью 100–200 м, связанные с палеоруслами р. Андомы и ее притоков
1620–2260 2660–4800	Образ № 5 (рис. 4, (е)). Набор субпараллельных прерывистых рефлекторов, в нижней части горизонт затухания, в основании интенсивный рефлектор с периодом сигнала 25 нс	Слоистая торфяная залежь, в нижней части которой повышается степень разложения, подстилается озерными осадками

ван *Sphagnum centrale*, *Sphagnum angustifolium* и *S. fuscum*. Мощность торфяной залежи — 4.7 м. Из которых 2.5 м занимают низинные торфа, перекрываемые 2.2 м переходным и верховым торфом. В залежи на глубинах от 2.5 до 3.3 м имеются глинистые прослойки, свидетельствующие о крупных разливах р. Андомы.

Зона 3. Участок занимает центральную часть исследованного болота. Микрорельеф волнистый, покрыт омбротрофными кустарничково-пушицево-сфагновыми растительными сообществами. Древесный ярус представлен единичными соснами высотой до 0.5–2 м. Травяно-кустарничковый ярус образуют *Chamaedaphne calyculata*,

Eriophorum vaginatum, *Andromeda polifolia*, с участием *Ledum palustre* и *Vaccinium uliginosum*. В сплошном моховом покрове доминирует *Sphagnum fuscum*, с примесью *S. angustifolium*, *S. magellanicum*. Залежь мощностью 5.5–6 м. Верхний слой залежи (0–1 м) образуют верховые торфа. Под ним от 1 до 2.5 м (мощностью 1.5 м) переходные торфа, подстилаемые слоем низинного торфа. Болото долгое время находилось на низинной стадии развития, с прекращением аллювиального влияния болото перешло на переходную стадию развития, а затем верховую. В залежи на глубинах от 3.5 до 4.0 м имеются глинистые прослойки, свидетельствующие о крупных разливах р. Андомы.

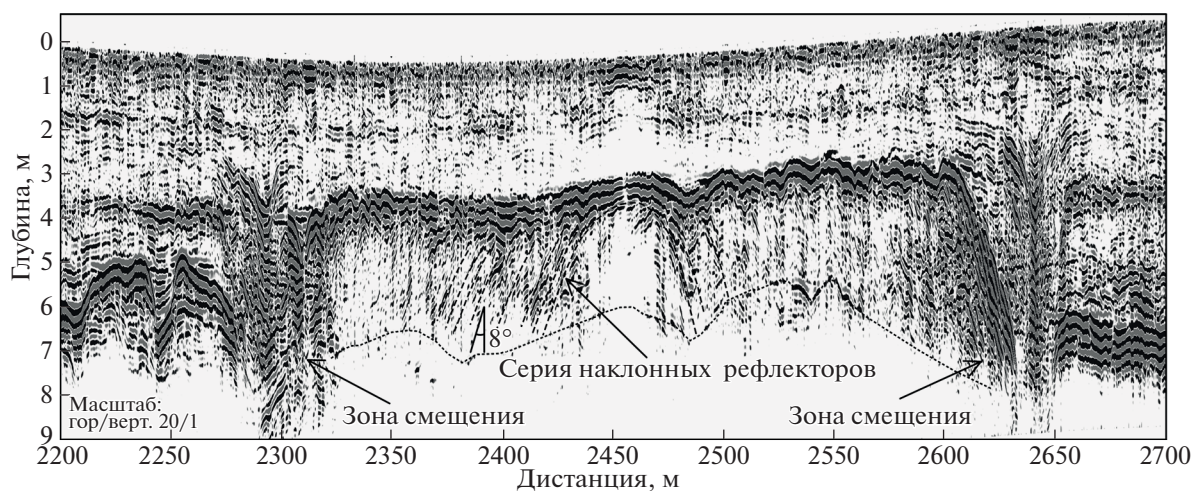


Рис. 5. Фрагмент георадарного профиля, демонстрирующий поднятия минерального ложа торфяной залежи.

Fig. 5. GPR cross-section fragment demonstrating uplifts of the mineral base of the peat deposit.

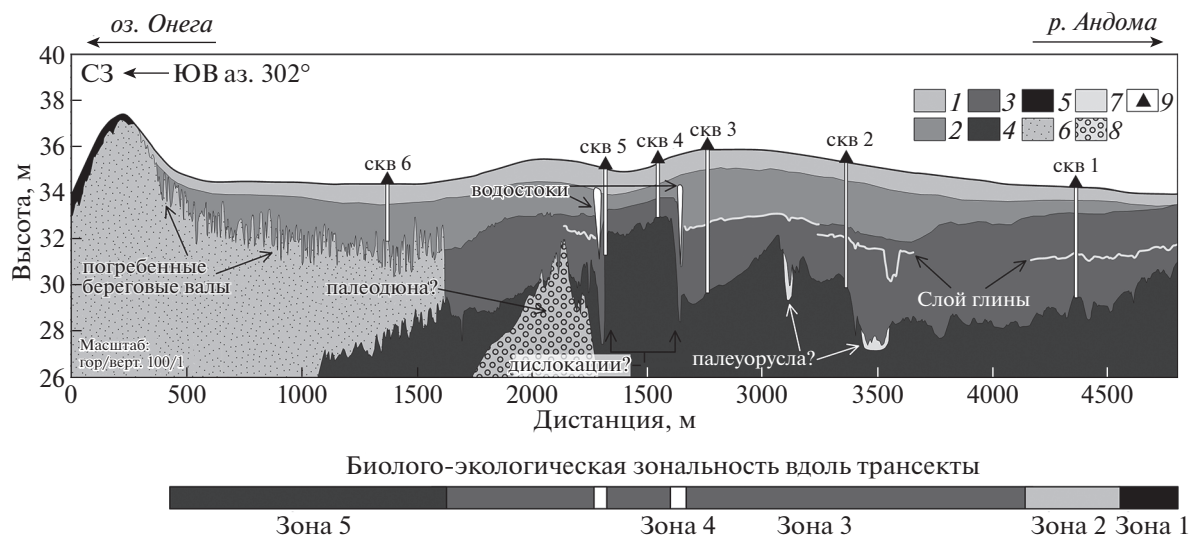


Рис. 6. Комплексный разрез по опорной трансекте.

Торф: 1 – верховой, 2 – переходный, 3 – низовой; 4 – базальные озерные пески и алевроиты; пески: 5 – эоловые, 6 – погребенных береговых валов, 7 – аллювиальные предполагаемого речного палеорусла; 8 – палеодюна; 9 – положение скважин ручного бурения; ниже указаны соответствующие интервалы биолого-экологических зон.

Fig. 6. Complex section along the reference transect.

Peat: 1 – high-moor, 2 – transitional, 3 – bottom; 4 – basal lacustrine sands and silts; sands: 5 – eolian, 6 – of buried coastal ridges, 7 – alluvium sands of the proposed river paleochannels; 8 – paleodune; 9 – position of manual probing; below are the corresponding intervals of bio-ecological zones.

Зона 4. Представляет собой проточные топи с мезоевтрофными осоково-хвощово-травяными сообществами. Травяно-кустарничковый ярус 2.5 м сложен низинными и переходными торфами, нижние слои торфа перемешаны с глинистыми частицами. По данным радарограммы данные участки приурочены к краям дислокации, возможно, в этих местах выклиниваются подземные воды, а также обеспечивается ток болотных вод и

это способствует произрастанию более требовательных к водно-минеральному питанию видов.

Зона 5. Участок представлен грядово-кочковато-мочажинным комплексом. Невысокие кочки (20–50 см), иногда соединенные в гряды, покрыты кустарничково-сфагновыми сообществами. Мочажины заняты шейхцериево-ринхоспорово-сфагновыми сообществами. Торфяная залежь мощностью 2.5 м подстилается песчаными отложениями береговых валов. Нижние слои залежи

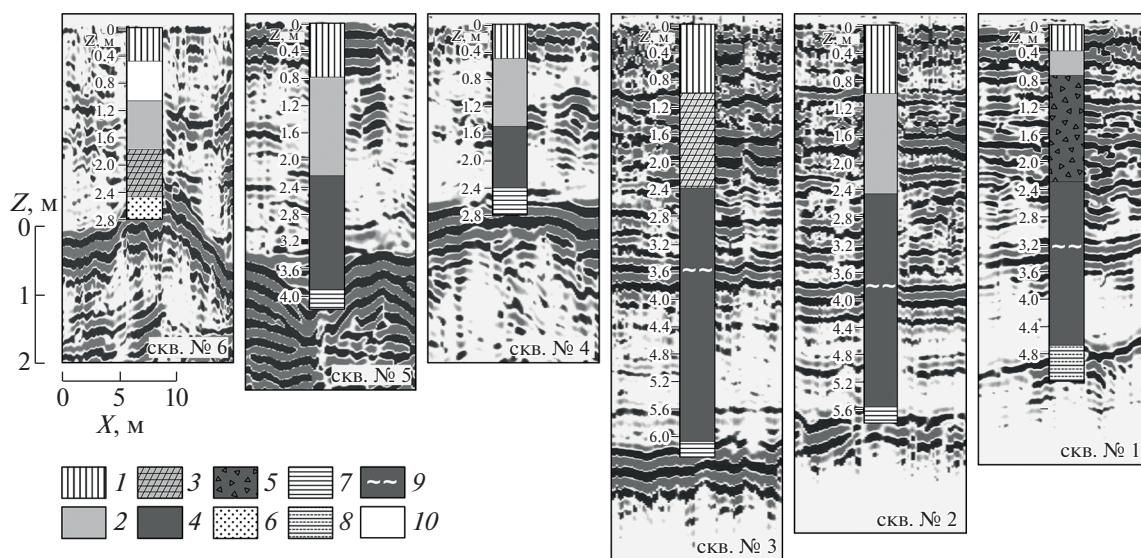


Рис. 7. Сопоставление буровых колонок заверочных скважин и соответствующих фрагментов радарограммы.

Торф: 1 – верховой сфагновый, 2 – переходный осоково-пушицевый, 3 – переходный шейхцериевый, 4 – низовой хвощево-осоковый, 5 – низовой древесный; 6 – пески; 7 – алевриты; 8 – переслоенная толща алеврита и песка; 9 – глинистый слой в торфе; 10 – сильно обводненный торф.

Fig. 7. Comparison of peat cores profile and fragments of the GPR cross-section.

Peat: 1 – high-moor Sphagnum, 2 – transition-moor sedge-Eriophorum, 3 – transition-moor Scheuchzeria, 4 – low-moor Equisetum-sedge, 5 – low-moor wood; 6 – sands; 7 – silts; 8 – stratum with layers of silt and sand; 9 – interlayered clays in peat; 10 – peat with water.

сложены переходными торфами, верхний слой – верховыми, имеется линза воды на глубине 0.5–1 м. Эта часть болота изначально развивалась в условиях недостатка питательных веществ (подстилают намывные пески), и низинная стадия развития отсутствует.

Результаты анализа торфяных разностей по данным скважин при сопоставлении с радарограммами в целом показали хорошую сходимость, средняя ошибка определения залегания слоев составила 0.25–0.5 м. При этом отдельные георадарные образы, установленные для верхового, переходного и низового торфа, также подтверждены вдоль всей трансекты (рис. 7). Исключение составила зона 4, где торф откладывался в специфических условиях повышенного минерального питания и проточной воды. Вследствие чего на радарограммах в области скважины № 4 и № 5 наблюдается более интенсивное затухание сигнала. Также отмечается более высокая стратификация торфяной залежи в волновом поле георадара в районе скважин 1–3, что может быть связано с большей дифференциацией торфа по ботаническому составу и степени разложения (см. дополнительные материалы). В целом электрофизические свойства торфа являются составными величинами, зависящими от целого ряда факторов, поэтому существует возможность формирования широкого спектра георадарных обра-

зов даже для одного типа торфа в условиях изменчивости его плотности и влажности.

В минеральном основании торфяника по скважинам № 2–4 залегают преимущественно озерные алевриты, имеющие постепенную границу с покрывающим низинным торфом. Только в скважине № 6 обнаружены мелкозернистые пески погребенных береговых валов, отличающиеся резкой границей перехода к торфу, а в скважине № 1 установлена переслоенная толща мелких песков, алевритов и органического вещества, связанная с деятельностью р. Андомы. По данным георадиолокации алевриты уверенно читаются в области скважин № 1–4 за счет резкого затухания сигнала, тогда как слой песков в скважине № 6 демонстрирует четкие серии субгоризонтальных рефлекторов. Исключением является скважина № 5, где, несмотря на алевриты, фиксируются очень интенсивные отражения. По-видимому, увеличение контрастности связано с повышенной контрастностью из-за разуплотнения и обводнения грунта в районе разрывной дислокации.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты выявили ряд особенностей строения района работ, требующих обсуждения. Во-первых, представляет интерес пространственная позиция погребенных палеовалов

(рис. 4, (б)). Наличие резкой границы с соседними осадочными комплексами может свидетельствовать о достаточно быстром начале и интенсивном протекании аккумулятивных процессов. На сегодняшний день, для рассматриваемой части Онежского озера выделено три морфогенетических типа берегов — аккумулятивный, дельтовый и абразионный (в районе г. Андома) (Игнатов и др., 2017). Согласно современным моделям развития Онежского озера, рассматриваемая территория, начиная с пребореала, относилась к озерной террасе (Zobkov et al., 2019), на которой откладывались преимущественно алевритовые отложения лимноаллювия, установленные в основании полученного разреза.

Начальным триггером для формирования обнаруженной протяженной серии валов могла быть регрессия Онежского озера в бореале (~10.3 тыс. л.) с понижением уровня моря до 30 м, вызвавшая интенсивное врезание рек и увеличение поступления песчано-алевритовых отложений после падения базиса эрозии (Демидов, 2006). Об этом могут свидетельствовать признаки эрозионных врезов палеорусел, обнаруженные в базальном слое разреза (рис. 4, (д)). Далее, развитие русла р. Андомы и вынос материала с площади водосбора в совокупности с абразией песков и песчаников Андомской возвышенности значительно стимулировали накопление озерно-аллювиальных отложений. При падении базиса эрозии и смещении береговой линии могла быть сформирована и погребенная палеодюна, залегающая ниже береговых валов (рис. 4, (в)). Основание палеодюны залегает на 3 м ниже базиса эрозии, при этом она частично перекрыта лимноаллювием по направлению к озеру. Интервал алевритов длиной 400 м отражает период остановки аккумуляции песчаных осадков, с последующей резкой интенсификацией таких процессов, что может быть связано с динамикой русла р. Андомы. Кроме того, глубина залегания палеодюны служит фактом, который указывает на положение уровня Онежского озера при регрессии в бореале на 2–3 м ниже общепринятого значения в 30 м. Об этом свидетельствуют и два палеорусла на высотных отметках 30 и 27.5 м, обнаруженные в юго-восточной части профиля (рис. 4, (д)). По всей видимости, под торфяной залежью Сухоялецкого болота находится погребенная сеть меандров и стариц палеорусла р. Андомы, которая развивалась в условиях стока в Онежское озеро. Аналогичную картину на современном этапе можно наблюдать на 1 км юго-восточнее от участка исследований в районе пос. Сорокополье.

Последующая трансгрессия Онежского озера, произошедшая около 9.7 тыс. л. н., поднимает уровень воды в озере до 40–45 м, а сменившая ее регрессия привела к росту торфяников в исследуемом районе (Демидов, 2006), и, как следствие,

перекрытию валов палюстрием. Формирующаяся торфяная залежь периодически затопливается, из-за чего формируются характерные прослой глины (рис. 4, (е)). Позднее в субатлантический период начинается новый этап активной аккумуляции береговых отложений. При этом возрастает роль эоловых процессов, так как формируется отдельная пачка эоловых перевеянных и мелкозернистых песков толщиной до 3 м, которая залегает на более крупных и плотных песках береговых валов (рис. 4, (а)). Следует отметить, на кровле погребенных валов подобная пачка не фиксируется, т.е. активное развеивание грунта не происходило. Косвенным признаком достаточно быстрой аккумуляции материала может служить р. Кукурека, расположенная на 2.3 км севернее р. Андомы (рис. 1). Ранее эта река служила стоком для оз. Большого, однако формирование в северо-западном направлении береговых валов перекрыло ее устье, и тогда сток из озера перешел в р. Андома. Это еще раз показывает, что гидрологический режим современных водно-болотных угодий в южной части Онежского озера тесно связан с динамикой береговых отложений и речных систем, а также таких климатических параметров, как ветровая нагрузка.

Еще одним объектом, требующим детального рассмотрения, является обнаруженное поднятие минерального основания торфяника. Ранее, для исследуемого района были установлены полистадийные деформации, связанные как с тектоническими, так и гляциодинамическими и гравитационно-оползневыми факторами (Колодяжный и др., 2016). Непосредственно генезис горы Андомы связывают с крупной гляциодислокацией, сформировавшейся из-за давления края ледника на девонские отложения (Енгальцев, 2007). Очевидно, что обнаруженные деформации скорее относятся к более позднему периоду, и обусловлены гляциоизостатическими процессами и сопутствующими землетрясениями, протекавшими в постледниковую эпоху (Демидов, 2006). В соответствии с современными представлениями о геодинамике впадины Онежского озера (Шварев, Никонов, 2022), в результате сейсмотектонического воздействия в пределах участка работ вполне могли сформироваться малоамплитудное поднятие и обрамляющие его разрывы, показанные на рис. 5. Также следует отметить возможность влияния криогенных деформаций, признаки которых были установлены в осадках на западном побережье Онежского озера (Чеботарева, 2019). На текущем этапе нет достаточной информации для объяснения источника выявленной деформации озерных осадков, а также ее возраста. Тем не менее ее масштабы позволяют предположить значительную интенсивность геодинамических процессов, протекающих в исследуемом районе в голоцене.

Необходимо учитывать, что биолого-экологическое зонирование вдоль трансекты показало значительное влияние четвертичных отложений на формирование как торфяной залежи, так и наземного растительного покрова. В первую очередь это связано с режимом водно-минерального питания растительности, который в свою очередь во многом определяется рельефом минерального ложа болота, несущего в себе отпечаток целого ряда седиментационных и геодинамических процессов. Например, разрывные дислокации в базальном основании привели к образованию проточных топей с богатым питанием и сопутствующим набором растительных видов, резко контрастирующих с основной площадью болота. В результате чего можно констатировать, что выполнение работ по созданию опорных трансект на водно-болотных угодьях с привлечением метода георадиолокации облегчает выявление закономерностей состава и динамики растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные работы показали, что болотный комплекс в устье р. Андомы несет в себе отчетливые следы развития Онежского озера в голоцене. Георадарные работы позволили выявить новые, ранее не известные осадочные маркеры, погребенные под толщей палюстрия, которые отражают этапы динамики берега Онежского озера, а также локальные дислокации, указывающие на протекание деформационных процессов неустойчивой природы. При этом найденные признаки погребенных палеодюны и палеорусел р. Андомы, находящиеся ниже известного минимального уровня Онежского озера в 30 м, требуют дополнительных исследований для обоснования и выполнения реконструкции. Кроме того, полученный опорный разрез вдоль трансекты, включающий биолого-экологическую типизацию, показал существование отличающихся по природным условиям зон. Установленные зоны обусловлены целым рядом природных факторов, в том числе геологическими и геоморфологическими, которые в итоге способствуют биологическому разнообразию. В перспективе используемый подход может быть использован для первичного выявления уязвимостей экосистем, связанных со строением геологического разреза, и долгосрочного комплексного мониторинга экологической трансформации экосистем водно-болотных угодий.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Фотографии, показывающие типичные растительные сообщества, а также диаграммы ботанического состава торфа доступны по адресу: <https://geomorphology.igras.ru/jour/pages/view/dopmat>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Е.Л. Талбонен за ботанический анализ торфа. Исследование проведено в рамках государственного задания Отдела комплексных научных исследований и Института биологии КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Т.Г. (1965). Болота Вологодской области, их районирование и сельскохозяйственное использование // Северо-Запад европейской части СССР. Вып. 4. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та. С. 65–93.
- Бричёва С.С., Матасов В.М., Шилов П.М. (2017). Георадар в геоэкологических исследованиях при искусственном обводнении торфяников // Геоэкология. Инженерная геология, Гидроэкология, Геокриология. № 3. С. 76–83.
- Владов М.Л., Старовойтов А.В. (2004). Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ. 153 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Онежская. Лист Р-37-XXV. Вытегра. Объяснительная записка. (2021) Сост.: А.Л. Буслович, В.И. Гаркуша, В.А. Николаев и др. М.: Московский филиал ФГБУ "ВСЕГЕИ". 124 с. [Электронный ресурс]. URL: http://geo.mfvsegei.ru/200k/Zap/Zap_P-37-XXV.pdf (дата обращения: 31.03.2023)
- Демидов И.Н. (2006). О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменениях его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. №. 9. С. 171–182.
- Енгальцев С.Ю. (2007). Геологическое строение и генезис дислокаций на Андомской горе // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. №. 1. С. 32–39.
- Иванищева Е.А. (2010). Экологический каркас Вытегорского района Вологодской области // Известия СНЦ РАН. Т. 12. № 1 (5). С. 1383–1386.
- Иванов А.О., Лукшевич Э.В., Стинкулис Г.В. и др. (2003). Андомская гора — уникальный геологический памятник // Палеонтология и природопользование. Тез. докл. XLIV сессии палеонтологического об-ва. СПб. С. 98–100.
- Игнатов Е.И., Борщенко Е.В., Загоскин А.Л. и др. (2017). Связь геологического строения побережья, истории развития рельефа и динамики берегов Онежского озера // Труды КНЦ РАН. № 3. С. 65–78. <https://doi.org/10.17076/lim514>
- Колодяжный С.Ю., Балувев А.С., Терехов Е.Н. (2016). Структура и эволюция Андомского сегмента юго-восточной окраины Балтийского щита // Геотектоника. № 4. С. 48–67. <https://doi.org/10.7868/S0016853X16040056>
- Кутенков С.А. (2013). Компьютерная программа для построения стратиграфических диаграмм состава торфа "Corpi" // Труды КарНЦ РАН. № 6. С. 171–176.
- Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. (2022) / Отв.

- ред. Д.А. Субетто. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 333 с.
- Рязанцев П.А., Игнашов П.А. (2019). Георадиолокация болотных отложений (на примере Заонежского полуострова, Карелия) // География и природные ресурсы. № 4. С. 125–134.
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(125-134\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(125-134))
- Чеботарева В.А. (2019). Поздне- и послеледниковые отложения в разрезе низкой террасы на юго-западном побережье Онежского озера // Труды КНЦ РАН. Т. 10. № 6(1). С. 273–278.
<https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.040>
- Филиппов Д.А. (2008). Структура и динамика экосистем пойменных болот бассейна Онежского озера (Вологодская область). Автореф. дис. канд. биол. наук. Вологда. 219 с.
- Филоненко И.В., Филиппов Д.А. (2013). Оценка площади болот Вологодской области // Труды Инсторфа. № 7. С. 3–11.
- Шенников А.П. (1964). Введение в геоботанику. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 447 с.
- Шварев С.В., Никонов А.А. (2022). Влияние сильных землетрясений на рельеф, отложения и гидродинамику района Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям / Отв. ред. Д.А. Субетто. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 218–231.
- Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. (1990) / Под ред. З.С. Кауфмана. Л.: Наука. 264 с.
- Carless D., Kulessa B., Booth A.D. et al. (2021). An integrated geophysical and GIS based approach improves estimation of peatland carbon stocks // *Geoderma*. Vol. 402. 115176.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115176>
- Comas X., Slater L., Reeve A. (2005). Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GPR) // *J. Hydrol.* Vol. 315. No. 1–4. P. 40–51.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.020>
- Comas X., Slater L., Reeve A.S. (2011). Pool patterning in a northern peatland: Geophysical evidence for the role of postglacial landforms // *J. Hydrol.* Vol. 399. No. 3–4. P. 173–184.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.031>
- Comas X., Terry N., Hribljan J.A. et al. (2017). Estimating belowground carbon stocks in peatlands of the Ecuadorian páramo using ground-penetrating radar (GPR) // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* Vol. 122. No. 2. P. 370–386.
<https://doi.org/10.1002/2016JG003550>
- Filatov N., Baklagin V., Efremova T. et al. (2019). Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // *Inland Waters*. Vol. 9. No. 2. P. 130–141.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533355>
- Hare D.K., Boutt D.F., Clement W.P. et al. (2017). Hydrogeological controls on spatial patterns of groundwater discharge in peatlands // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 21. No. 12. P. 6031–6048.
<https://doi.org/10.5194/hess-21-6031-2017>
- Kettridge N., Binley A., Comas X. et al. (2012). Do peatland microforms move through time? Examining the developmental history of a patterned peatland using ground-penetrating radar // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* Vol. 117. No. G3. G03030.
<https://doi.org/10.1029/2011JG001876>
- Leopold M., Völkel J. (2003). GPR images of periglacial slope deposits beneath peat bogs in the Central European Highlands, Germany // *Geological Society, London, Special Publications*. Vol. 211. No. 1. P. 181–189.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.211.01.1>
- Loisel J., Yu Z., Parsekian A., Nolan J. et al. (2013). Quantifying landscape morphology influence on peatland lateral expansion using ground-penetrating radar (GPR) and peat core analysis // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* Vol. 118. No. 2. P. 373–384.
<https://doi.org/10.1002/jgrg.20029>
- Neal A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress // *Earth-Sci. Rev.* Vol. 66. No. 3–4. P. 261–330.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- Parsekian A.D., Slater L., Ntarlagiannis D. et al. (2012). Uncertainty in peat volume and soil carbon estimated using ground-penetrating radar and probing // *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 76. No. 5. P. 1911–1918.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0040>
- Pezdir V., Čeru T., Horn B., Gosar M. (2021). Investigating peatland stratigraphy and development of the Šijec bog (Slovenia) using near-surface geophysical methods // *Catena*. Vol. 206. 105484.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105484>
- Proulx-McInnis S., St-Hilaire A., Rousseau A.N. et al. (2013). A review of ground-penetrating radar studies related to peatland stratigraphy with a case study on the determination of peat thickness in a northern boreal fen in Quebec, Canada // *Progress in Physical Geography*. Vol. 37. No. 6. P. 767–786.
<https://doi.org/10.1177/0309133313501106>
- Sass O., Friedmann A., Haselwanter G. et al. (2010). Investigating thickness and internal structure of alpine mires using conventional and geophysical techniques // *Catena*. Vol. 80. No. 3. P. 195–203.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.11.006>
- Trappe J., Kneisel C. (2019). Geophysical and sedimentological investigations of peatlands for the assessment of lithology and subsurface water pathways // *Geosciences*. Vol. 9. No. 3. 118.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9030118>
- Walter J., Hamann G., Lück E. et al. (2016). Stratigraphy and soil properties of fens: Geophysical case studies from northeastern Germany // *Catena*. Vol. 142. P. 112–125.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.028>
- Zobkov M., Potakhin M., Subetto A. et al. (2019). Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations // *J. Paleolimnol.* Vol. 62 (1). P. 53–71.
<https://doi.org/10.1007/s10933-019-00075-3>

DEVELOPMENT OF A REFERENCE TRANSECT BASED ON GPR DATA FOR WETLANDS IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE ONEGA LOWLAND²

P. A. Ryazantsev^{a,#} and P. A. Ignashov^{b,##}

^aDepartment of Multidisciplinary Scientific Research, Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, Russia

^bInstitute of Biology, Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, Russia

[#]E-mail: chthonian@yandex.ru

^{##}E-mail: paul.ignashov@gmail.com

The post-glacial development of the Lake Onega coast, together with modern processes, creates conditions for the formation of complex coastal ecosystems that may be vulnerable to possible climate change and anthropogenic impacts. Such systems include wetlands extending along the eastern and southern coasts of Lake Onega. The area of a special interest is near the mouth of the Andoma River, as it combines the influence of the riverbed processes of a large river, the dynamics of the coast of Lake Onega, and peat lands development. The aim of the research was a detailed study of the structure of the Holocene deposits in the lake-river interval on the northern bank of the Andoma River, which reflects the stages of formation and variability of the natural conditions of the lakeside lowland. A reference transects including 4,800 m long GPR profile, supplemented with boreholes was created. The complex study of GPR cross-section and peat cores revealed the internal structure of the peat bog. A plateau-like uplift of the mineral base of the bog, framed by rupture zones with accompanying watercourses, was found. This area is considered as a deformation formed because of glacial dislocations or because of neotectonic deformations. Besides the main structural elements, local erosion incisions accompanied by sandy deposits, which could be confined to the buried paleochannels of the Andoma River, were found at the top of the limno-alluvial sediments. Analysis of the complex transect together with a vegetation description showed a difference in biological and environmental conditions zones, which contribute to biological diversity of the study site. In the future, the reference transects development provides a basis for the initial identification of vulnerabilities and long-term monitoring of the ecological transformation of ecosystems.

Keywords: Lake Onega, Andoma River, GPR patterns, peatlands, biodiversity, ecological gradient

SUPPLEMENTARY MATERIALS

Supplementary data to the article by Ryazantsev, Ignashov (2023) is available at: <https://geomorphology.ig-ras.ru/jour/pages/view/dopmat>.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank E.L. Talbonen for the botanical analysis of peat. The study was conducted within the framework of the state assignment of the Department of Integrated Scientific Research and the Institute of Biology of the KarSC RAS.

REFERENCES

- Abramova T.G. (1965). Mires of the Vologda Region, their zoning and agricultural use. *Severo-Zapad evropeiskoi chasti SSSR. Vol. 4*. Leningrad: Leningrad University (Publ.). P. 65–93. (in Russ.).
- Bricheva S.S., Matasov V.M., Shilov P.M. (2017). Ground penetrating radar (GPR) as a part of integrated landscape studies on peatlands. *Geokologiya. Inzheneraya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. No. 3. P. 76–83. (in Russ.).
- Buslovich A.L., Garkusha V.I., Nikolaev V.A. et al. (2021). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriya Onezhskaya. List P-37-XXV. *Vytegra. Ob "yasnitel'naya zapiska* (State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Second edition. Onega series. Sheet P-37-XXV. Vytegra. Explanatory letter). Moscow: VSEGEI. 124 p. (in Russ.). [Electronic data]. URL: http://geo.mfvsegei.ru/200k/Zap/Zap_P-37-XXV.pdf (access date: 31.03.2023)
- Carless D., Kulesa B., Booth A.D. et al. (2021). An integrated geophysical and GIS based approach improves estimation of peatland carbon stocks. *Geoderma*. Vol. 402. 115176. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115176>
- Chebotareva V.A. (2019). Late and post glacial sediments in the section of a low terrace, the southwest coast of lake Onega. *Trudy KarRC RAS*. Vol. 10. No. 6 (1). P. 273–278. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.040>
- Comas X., Slater L., Reeve A. (2005). Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GPR). *J. Hydrol.* Vol. 315. No. 1–4. P. 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.020>

² For citation: Ryazantsev P.A., Ignashov P.A. (2023). Development of a reference transect based on GPR data for wetlands in the southeastern part of the Onega Lowland. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 4. P. 57–71. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923040096>; <https://elibrary.ru/YCAWCP>

- Comas X., Slater L., Reeve A.S. (2011). Pool patterning in a northern peatland: Geophysical evidence for the role of postglacial landforms. *J. Hydrol.* Vol. 399. No. 3–4. P. 173–184.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.031>
- Comas X., Terry N., Hribljan J.A. et al. (2017). Estimating belowground carbon stocks in peatlands of the Ecuadorian páramo using ground-penetrating radar (GPR). *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* Vol. 122. No. 2. P. 370–386.
<https://doi.org/10.1002/2016JG003550>
- Demidov I.N. (2006). O maksimal'noi stadii razvitiya Onezhskogo prilednikovogo ozera, izmeneniyakh ego urovnya i glyatsioizostaticheskom podnyatii poberezhii v pozднеnednikov'e (On the maximum stage of development of the Onega periglacial lake, changes in its level and glacioisostatic uplift of the coasts in the late glacial period). *Geology and Commercial Minerals of Karelia.* Vol. 9. P. 171–182. (in Russ.).
- Engalychev S.Yu. (2007). Geological structure and genesis of dislocations on the Andoma Hills. *Vestn. SPbGU. Ser. 7. Geologiya. Geografiya.* No. 1. P. 32–39. (in Russ.).
- Filatov N., Baklagin V., Efremova T. et al. (2019). Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters.* Vol. 9. No. 2. P. 130–141.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533355>
- Filonenko I.V., Philipov D.A. (2013). Estimation of the area of mires in the Vologda Region. *Trudy Instorfa.* No. 7. P. 3–11. (in Russ.).
- Hare D.K., Boutt D.F., Clement W.P. et al. (2017). Hydrogeological controls on spatial patterns of groundwater discharge in peatlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 21. No. 12. P. 6031–6048.
<https://doi.org/10.5194/hess-21-6031-2017>
- Ignatov E.I., Borshchenko E.V., Zagoskin A.L. et al. (2017). Connection between the geological structure of lake Onego region, its topographic evolution and the dynamics of the lake shores. *Trudy KarRC RAS.* No. 3. P. 65–78. (in Russ.).
<http://dx.doi.org/10.17076/lim514>
- Ivanishcheva E.A. (2010). Ecological network of Vytegra district in Vologda Region. *Izvestiya RAS SamSC.* Vol. 12. No. 1(5). P. 1383–1386. (in Russ.).
- Ivanov A.O., Lukshevich E.V., Stinkulis G.V. et al. (2003). Andoma Hill – a unique geological monument. *Paleontologiya i prirodopol'zovanie. Tezisy dokladov XLIV sessii paleontologicheskogo ob-va.* Saint Petersburg. P. 98–100. (in Russ.).
- Kaufman Z.S. (Ed.). (1990). Ekosistema Onezhskogo ozera i tendentsii ee izmeneniya (Ecosystem of Lake Onega and trends in its change). Leningrad: Nauka (Publ.). 264 p. (in Russ.).
- Kettridge N., Binley A., Comas X. et al. (2012). Do peatland microforms move through time? Examining the developmental history of a patterned peatland using ground-penetrating radar. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* Vol. 117. No. G3. G03030.
<https://doi.org/10.1029/2011JG001876>
- Kolodyazhny S.Yu., Baluev A.S., Terekhov E.N. (2016). Andoma Segment of Southeastern Margin of Fennoscandian Shield: Structure and Evolution. *Geotectonics.* No. 4. P. 48–67. (in Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0016853X16040056>
- Kutenkov S.A. (2013). Korpi software for plotting stratigraphic diagrams of peat composition. *Trudy KarRC RAS.* No. 6. P. 171–176. (in Russ.).
- Leopold M., Völkel J. (2003). GPR images of periglacial slope deposits beneath peat bogs in the Central European Highlands, Germany. *Geological Society, London, Special Publications.* Vol. 211. No. 1. P. 181–189.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.211.01.1>
- Loisel J., Yu Z., Parsekian A., Nolan J. et al. (2013). Quantifying landscape morphology influence on peatland lateral expansion using ground-penetrating radar (GPR) and peat core analysis. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* Vol. 118. No. 2. P. 373–384.
<https://doi.org/10.1002/jgrg.20029>
- Neal A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Sci. Rev.* Vol. 66. No. 3–4. P. 261–330.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- Parsekian A.D., Slater L., Ntarlagiannis D. et al. (2012). Uncertainty in peat volume and soil carbon estimated using ground-penetrating radar and probing. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 76. No. 5. P. 1911–1918.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0040>
- Pezdir V., Čeru T., Horn B. et al. (2021). Investigating peatland stratigraphy and development of the Šijec bog (Slovenia) using near-surface geophysical methods. *Catena.* Vol. 206. 105484.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105484>
- Philipov D.A. (2008). Struktura i dinamika ekosistem poimennyykh bolot basseina Onezhskogo ozera (Vologodskaya oblast') (Structure and dynamics of ecosystems of floodplain mires of the Lake Onega basin (Vologda Region)). PhD thesis. Vologda. 219 p. (in Russ.).
- Proulx-McInnis S., St-Hilaire A., Rousseau A.N. et al. (2013). A review of ground-penetrating radar studies related to peatland stratigraphy with a case study on the determination of peat thickness in a northern boreal fen in Quebec, Canada. *Progress in Physical Geography.* Vol. 37. No. 6. P. 767–786.
<https://doi.org/10.1177/0309133313501106>
- Ryazantsev P.A., Ignashov P.A. (2019). Ground Penetrating Radar measurements of bog deposits (a case study of the Zaonezhskii Peninsula, Karelia). *Geogr. Nat. Res.* No. 4. P. 125–134. (in Russ.).
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(125-134\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(125-134))
- Sass O., Friedmann A., Haselwanter G. et al. (2010). Investigating thickness and internal structure of alpine mires using conventional and geophysical techniques. *Catena.* Vol. 80. No. 3. P. 195–203.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.11.006>
- Shvarev S.V., Nikonov A.A. (2022). The influence of strong earthquakes on the relief, sediments and hydrodynamics of the Lake Onega region. Subetto D.A. (Ed.). *Paleo-*

- limnologiya Onezhskogo ozera: ot prilednikovogo ozera k sovremennym usloviyam*. Petrozavodsk: KarRC RAS (Publ.). P. 218–231. (in Russ.).
- Shennikov A.P. (1964). Vvedenie v geobotaniku (Introduction to geobotany). Leningrad: Leningrad University (Publ.). 447 p. (in Russ.).
- Subetto D.A. (Ed.). (2022). Paleolimnologiya Onezhskogo ozera: ot prilednikovogo ozera k sovremennym usloviyam (Paleolimnology of Lake Onega: from the periglacial lake to modern conditions). Petrozavodsk: KarRC RAS (Publ.). 333 p. (in Russ.).
- Trappe J., Kneisel C. (2019). Geophysical and sedimentological investigations of peatlands for the assessment of lithology and subsurface water pathways. *Geosciences*. Vol. 9. No. 3. 118. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030118>
- Vladov M.L., Starovojtov A.V. (2004). Vvedenie v georadiolokatsiyu (Introduction to GPR). Moscow: MSU (Publ.). 153 p. (in Russ.).
- Walter J., Hamann G., Lück E. et al. (2016). Stratigraphy and soil properties of fens: Geophysical case studies from northeastern Germany. *Catena*. Vol. 142. P. 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.028>
- Zobkov M., Potakhin M., Subetto A. et al. (2019). Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations. *J. Paleolimnol.* Vol. 62 (1). P. 53–71. <https://doi.org/10.1007/s10933-019-00075-3>