

УДК 621.396.96:556.55(470.22)

А.В. Старовойтов¹, К.З. Валиуллина², А.Н. Ошкун³, А.М. Пятилова⁴

СТРОЕНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА НА ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕРАХ ПОЛУОСТРОВА КИНДО ВБЛИЗИ БЕЛОМОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ МГУ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И БУРЕНИЯ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Впервые рассмотрено геологическое строение двух пресноводных озер (Верхнее и Водопроводное), расположенных вблизи Беломорской биостанции МГУ (Кандалакшский залив Белого моря) по георадиолокационным данным. Изучена морфология кровли архейского фундамента, строение четвертичного осадочного покрова и рельеф дна. С использованием данных бурения в четвертичном покрове выделены мелководные морские отложения, залегающие на породах архея, и комплекс озерно-болотных осадков. По отражающим горизонтам построены структурные схемы, по основным комплексам — схемы изопахит. По данным георадиолокации рассчитаны значения удельного электрического сопротивления и коэффициента поглощения и рассмотрены возможности их использования для выделения фаций.

Ключевые слова: георадиолокация, озерно-болотные отложения, четвертичные отложения, георадарные фации, Кандалакшский залив, Белое море.

The geological structure of two freshwater lakes (the Verkhneye and the Vodoprovodnoye) located near the White sea biological Station of the Moscow State University (the Kandalaksha Bay of the White sea) is considered for the first time according to the GPR data. The morphology of the top of the Archean basement, the structure of the Quaternary sedimentary cover and bottom relief were studied. Shallow marine sediments overlying the rocks of the Archean and a sequence of lacustrine-marsh sediments were identified using the drilling data in the Quaternary cover. Structural schemes were constructed for the main reflecting horizons, while isopach schemes were generated on the basis of the main sequences. The values of electrical resistivity and absorption coefficient are calculated and the possibilities of their use for the delineation of GPR facies are considered.

Key word: GPR, lacustrine-marsh sediments, Quaternary sediments, GPR facies, the Kandalaksha Bay, the White sea.

Введение. На п-ове Киндо Кандалакшского залива Белого моря, где расположена Беломорская биологическая станция (ББС) МГУ, есть несколько пресноводных озер, на которых была выполнена георадиолокационная съемка. Детально обследованы озера Верхнее и Водопроводное, последнее — единственный источник водоснабжения для ББС. Эти озера расположены на расстоянии 300 м друг от друга на высотах соответственно 87,2 и 73 м над уровнем моря и имеют площадь 1 и 0,6 га [Путешествия..., 2008, рис.1]. Эти озера были выбраны для детального изучения, так как они обладают наиболее представительными разрезами осадочного чехла. Цель исследований — изучение рельефа дна, структуры осадочного выполнения озер и выяснение основных особенностей геоло-

гического развития этого района. Одной из задач было также изучение возможности использования коэффициента поглощения при фациальном картировании. Изучение истории геологического развития этого региона существенно затруднено в связи с отсутствием данных бурения на морских акваториях, прилегающих к п-ову Киндо, и сложностью разреза четвертичных отложений, что выражается прежде всего в значительной латеральной изменчивости как литологического состава, так и мощностей рассматриваемых отложений.

Предполагается, что изучение разреза на озерах методом георадиолокации, методически более «легким» по сравнению с сейсмоакустикой, позволит ответить на некоторые из вопросов, тем более, что рядом с этими озерами пробурены скважины.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, доцент; *e-mail:* starovoytov_msu@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, студентка; *e-mail:* v.kseniya.z@bk.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, ассистент; *e-mail:* a.oshkin@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, науч. с.; *e-mail:* ampiatilova@gmail.com

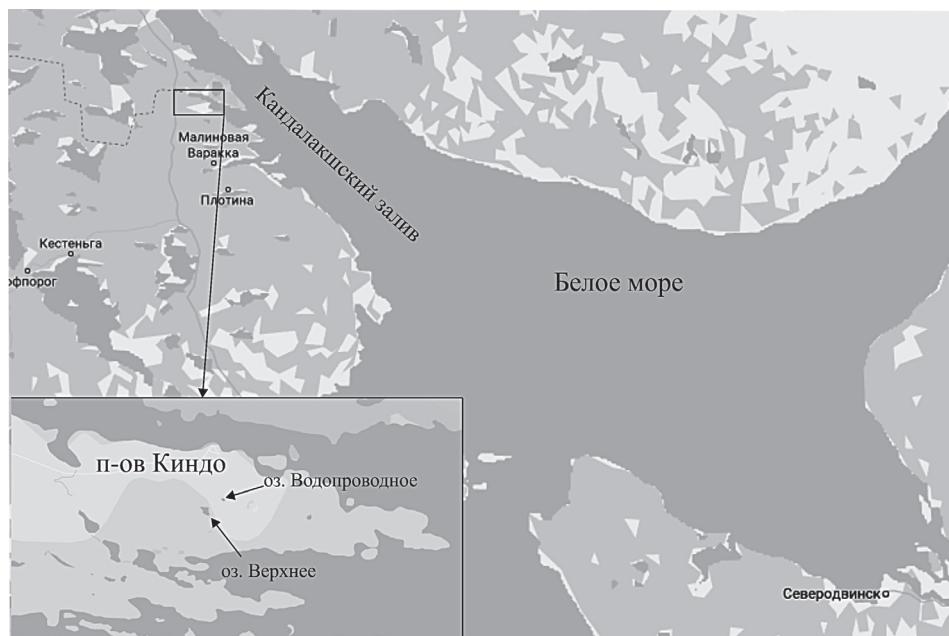


Рис. 1. Схема расположения озер Водопроводное и Верхнее на п-ове Киндо

Работы проводились с 2009 г. Георадиолокационные наблюдения выполняли с резиновых лодок с экранированной антенной 300 МГц («Radar Inc.», г. Рига, Латвия), привязка осуществлялась с помощью GPS. Для геологической привязки выделенных осадочных комплексов использованы скважины глубиной 5 м, пробуренные рядом с озерами (рис. 2, 3). На оз. Верхнее было измерено удельное электрическое сопротивление (УЭС) воды, которое составило около 360 Ом·м, что весьма благоприятно для эффективного использования метода георадиолокации. Измерения УЭС на расположенным рядом оз. Водопроводное

не проводилось, однако сопротивление воды, очевидно, не должно сильно отличаться.

Аппаратура и методика работ. Георадиолокационное профилирование выполнялось по системе профилей с использованием георадара «Зонд 12е» с антенным блоком 300 МГц производства фирмы «Radar Inc.» (Рига, Латвия). Запись по профилям велась с переменным шагом, так как скорость движения лодки была непостоянной. Для дальнейшей обработки данных выполнена интерполяция с шагом 0,02 м (среднее расстояние между трассами). Стандартная обработка данных георадарных наблюдений осуществлялась в программах

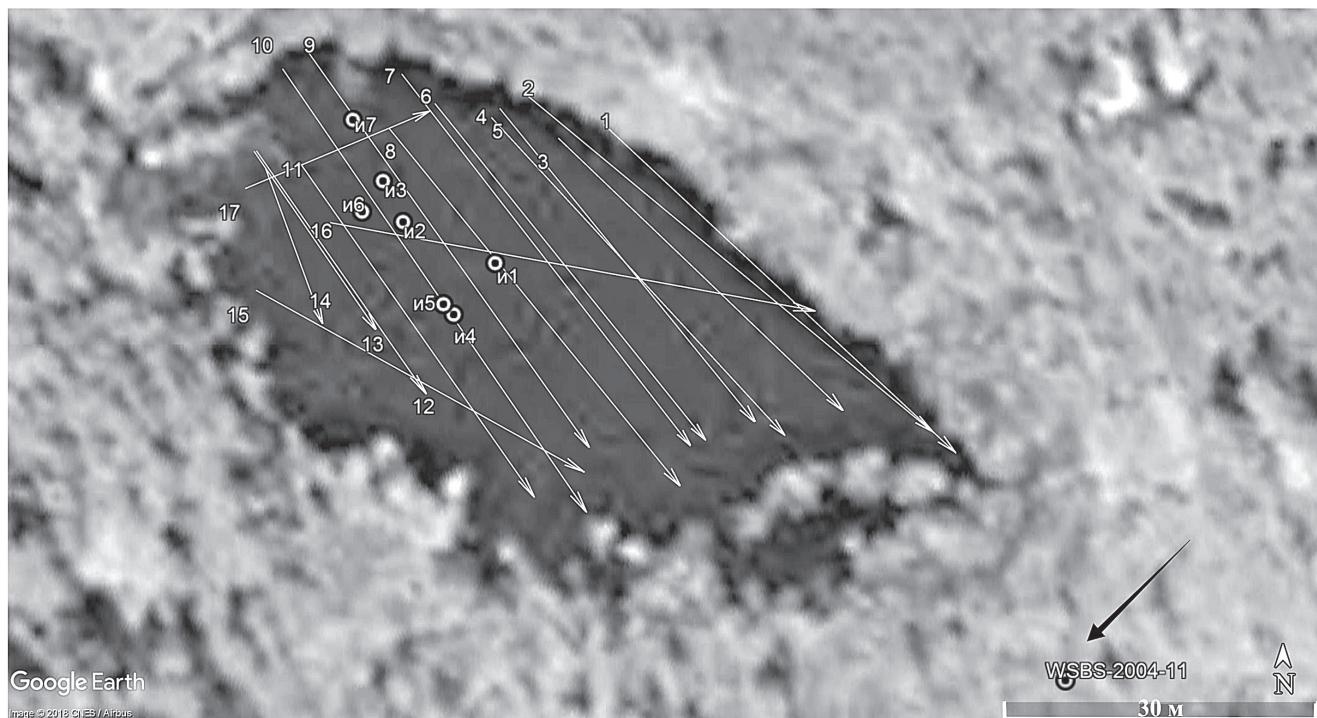


Рис. 2. Схема расположения георадиолокационных профилей и точек измерений физических параметров воды на оз. Водопроводное. В юго-восточном углу находится скважина WSBS-2004-11 (показана стрелкой)

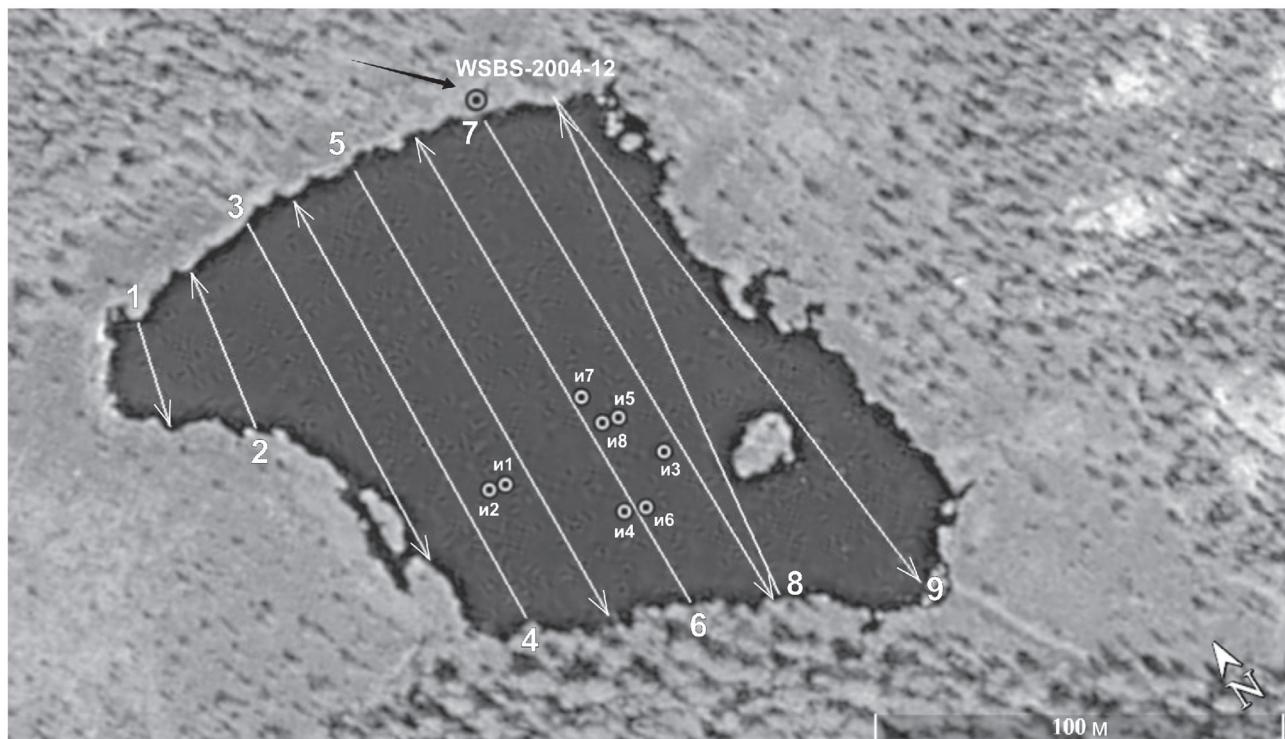


Рис. 3. Схема расположения георадиолокационных профилей и точек измерения физических параметров воды на оз. Верхнее. В северо-западном углу находится скважина WSBS-2004-12 (показана стрелкой)

MATLAB, RadExPro и RadExplorer. На всех профилях присутствует большое количество гипербол дифрагированных волн, особенно в верхней части разреза, что значительно затрудняет определение рельефа дна. Объекты дифракции, скорее всего, представлены стволами деревьев, погруженных в озерные отложения. По гиперболам оценивалась скорость распространения электромагнитных волн

[Владов и др., 2010], рис. 4, 5. По результатам нескольких десятков измерений в различных точках озер для пересчета из временного в глубинный масштаб для обоих озер средняя скорость была принята равной 3,7 см/нс.

Результаты исследований и их обсуждение.
Озеро Водопроводное. В плане оз. Водопроводное вытянуто по длинной оси в северо-западном на-

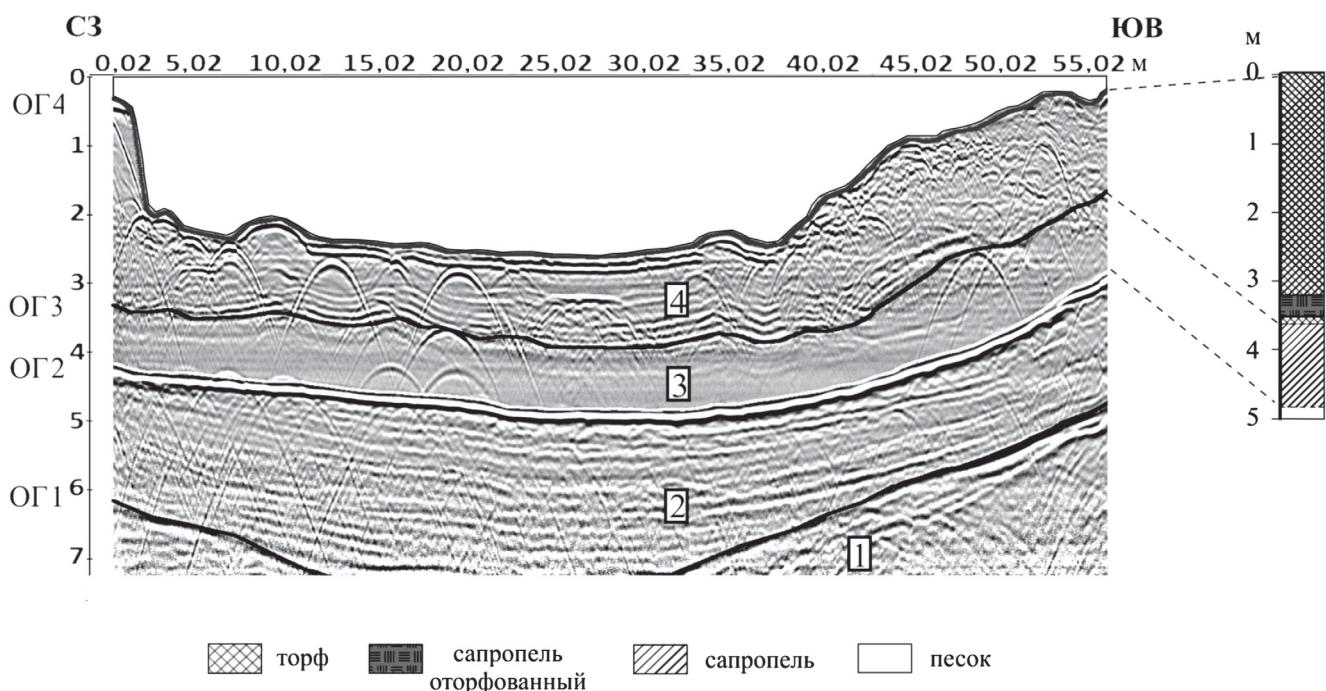


Рис. 4. Георадиолокационный профиль через оз. Водопроводное с интерпретацией. Справа от профиля — разрез скважины WSBS-2004-11. ОГ1-ОГ4 — отражающие горизонты: ОГ1 — кровля фундамента; ОГ2 — кровля песков; ОГ3 — кровля сапропеля; ОГ4 — дно

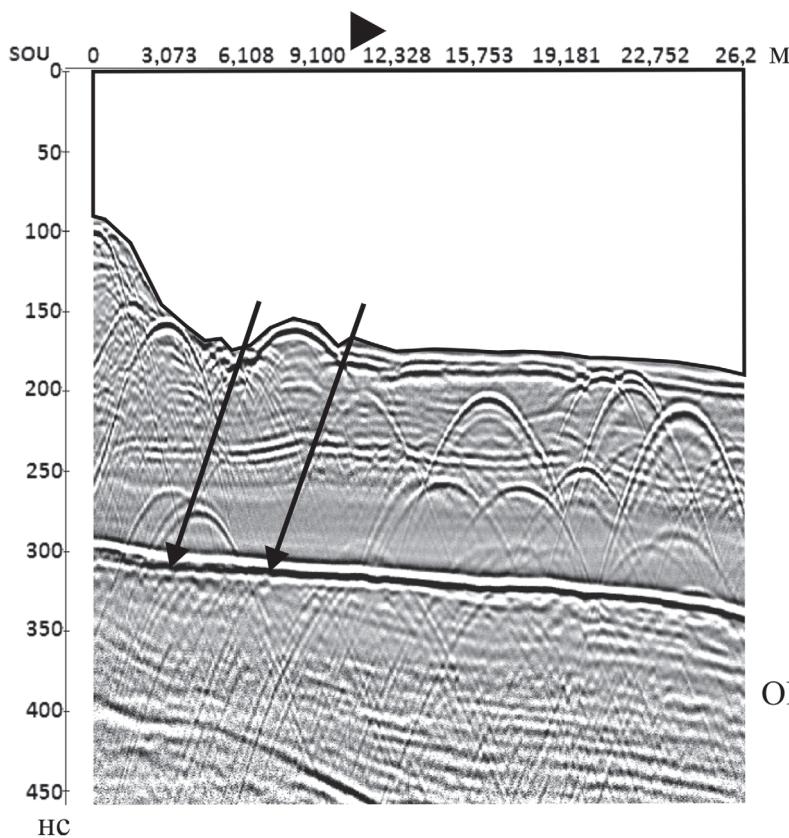


Рис. 5. Фрагмент георадиолокационного профиля с примерами гипербол, расположенных ниже ОГ2 (некоторые показаны стрелками). Профиль выполнен на оз. Водопроводное

ОГ 2

правлении (рис. 2). Дно на большей части озера субгоризонтальное, глубины, как правило, не превышают 2,5 м (рис. 6). Осадочный разрез изучен на всю глубину. На всех георадарных профилях было выделено 4 основных отражающих горизон-

та (ОГ), которые делят его на 4 георадиолокационных комплекса (далее — комплекс). Типичный георадиолокационный профиль представлен на рис. 4. Кровля самого нижнего комплекса залегает в среднем на глубине от 340 до 480 нс

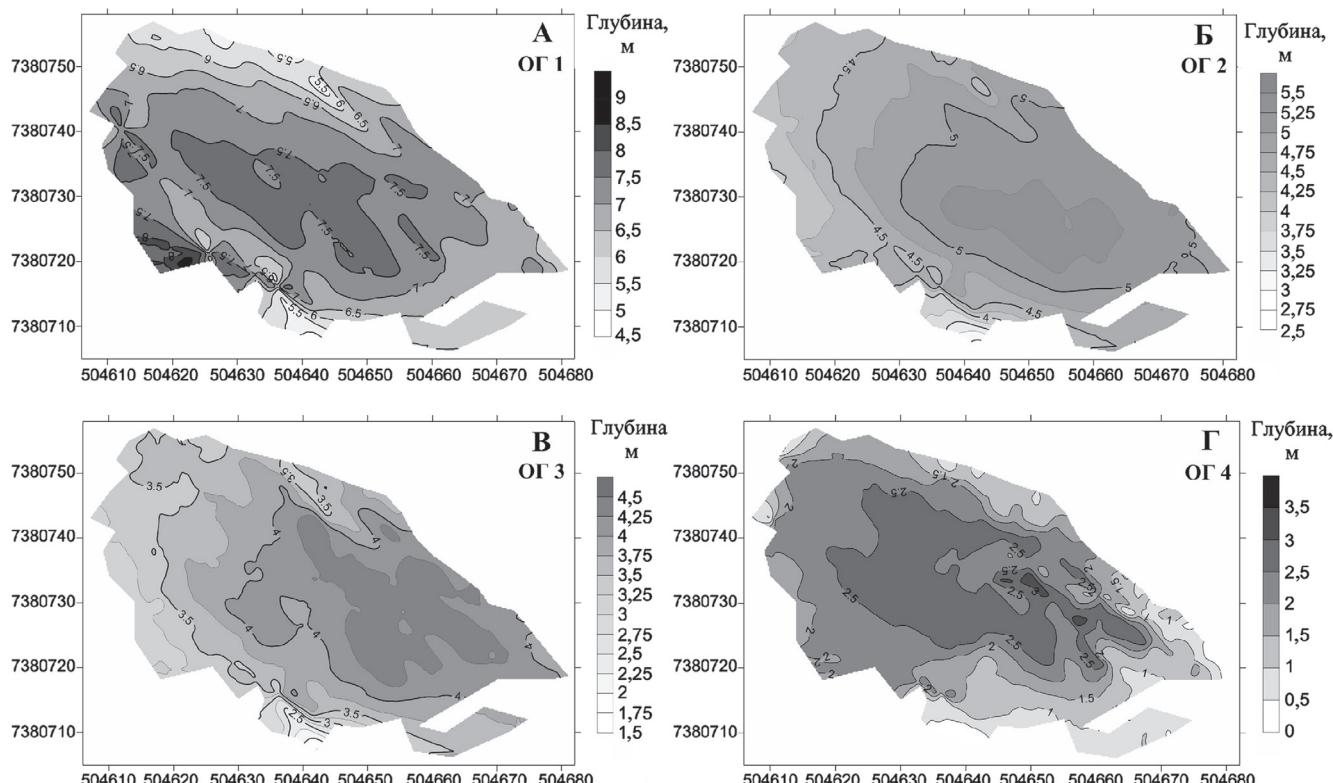


Рис. 6. Структурные схемы по отражающим горизонтам ОГ1-ОГ4 (см. рис. 4): А (ОГ1) — кровля фундамента; Б (ОГ2) — кровля песков; В (ОГ3) — кровля сапропеля (?); Г (ОГ4) — рельефа дна

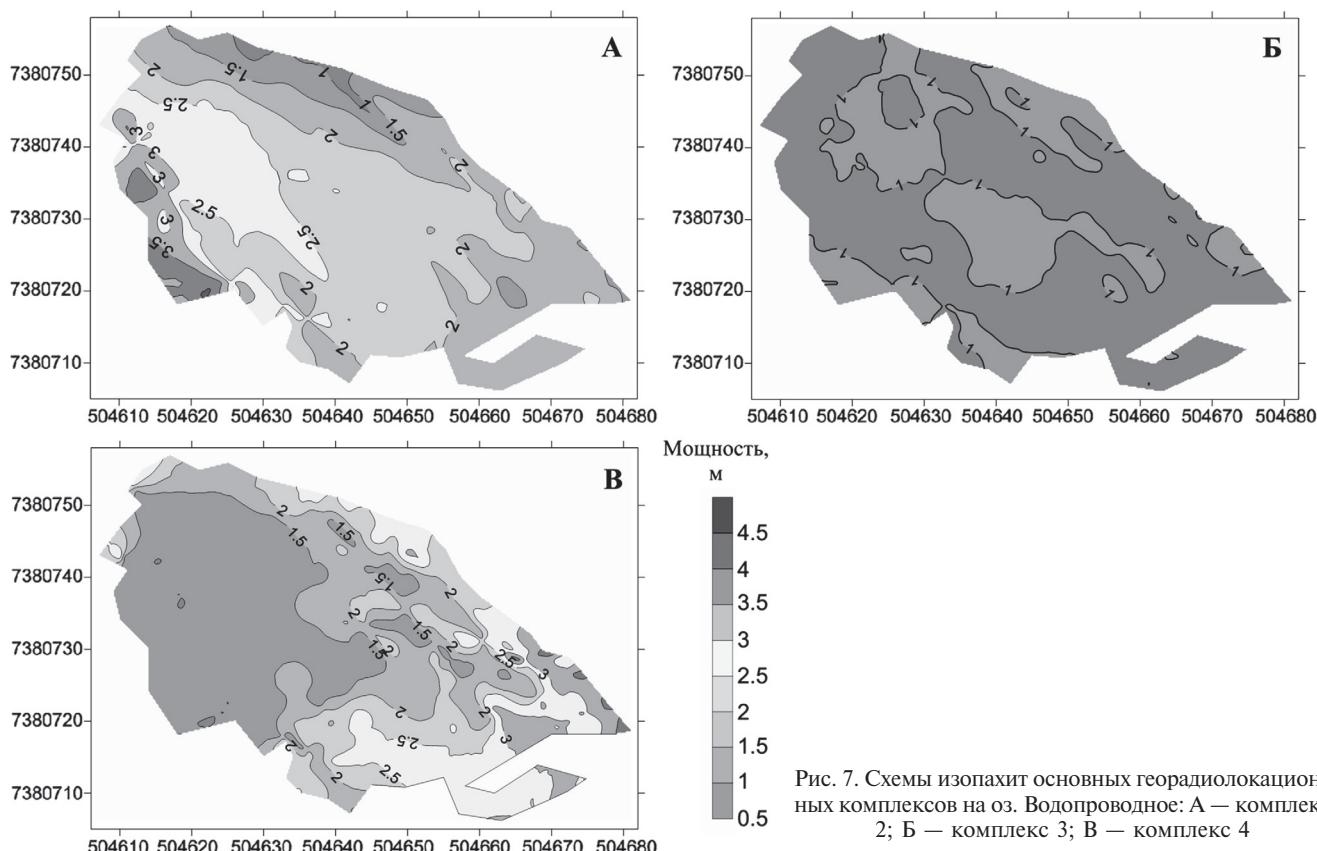


Рис. 7. Схемы изопахит основных георадиолокационных комплексов на оз. Водопроводное: А — комплекс 2; Б — комплекс 3; В — комплекс 4

(6,3–8,9 м; рис. 6). Ниже этой границы оси синфазности отраженных волн не отмечены. Исходя из опыта георадиолокационных работ на суше и на других озерах полуострова этот рефлектор был принят за кровлю фундамента, сложенного архейскими гнейсами (рис. 4, ОГ1); [Старовойтов и др., 2018]. В центральной части озера глубина кровли максимальна, постепенно уменьшаясь по направлению к его берегам (рис. 6, А). Выше с несогласием залегает георадарный комплекс 2, который характеризуется отчетливо выраженной слоистостью. Его кровлей служит отражающий горизонт ОГ2 с повышенной амплитудой. Он постепенно погружается в юго-восточном направлении до 5,0–5,5 м (рис. 6, Б). Мощность слоистого комплекса меняется в среднем от 100 до 180 нс (1,8–3,3 м; рис. 7, А), причем наибольшие значения наблюдаются в западной части озера. Наличие большого числа точек дифракции, которые приурочены к этому рефлектору (рис. 5), свидетельствует о неровности этой границы, что наряду с прекращением прослеживаемости осей синфазности слоистого комплекса 2 на этой границе позволяет сделать вывод о том, что данная граница эрозионная, т.е. границей несогласия. В других комплексах гиперболы распространены хаотически, закономерности в их расположении не наблюдаются. Еще раз подчеркнем, что ОГ2 характеризуется значительно большей амплитудой по сравнению с другими ОГ на профилях оз. Водопроводное.

На комплексе 2 с несогласием залегает комплекс 3 с почти прозрачной волновой картиной. Его кровлей является рефлектор ОГ3. Мощность прозрачного комплекса меньше, чем у нижележащего комплекса 2 и в целом довольно выдержана — в среднем около 60 нс (1,1 м), лишь на отдельных участках увеличиваясь до 1,25–1,5 м (рис. 7, Б). Максимальная глубина залегания ОГ3 наблюдается в восточной части озера, где она достигает 4,0 м, редко больше (рис. 6, В). Самый молодой комплекс 4, кровля которого соответствует дну (ОГ4), имеет очень сложную волновую картину (рис. 4). В центральной части озера, где дно имеет субгоризонтальную форму, в этом комплексе прослеживаются оси синфазности и на некоторых участках его волновая картина напоминает волновую картину комплекса 2, т.е. слоистую (рис. 4). В прибрежной части озера, особенно на востоке, тип записи резко меняется, и волновая картина становится хаотической с многочисленными осями синфазности дифрагированных волн (правая часть профиля на рис. 4), что, по-видимому, связано с постепенным застарением озера. Вероятно, многочисленные дифракционные эффекты обусловлены наличием затонувших стволов деревьев. Мощность комплекса в прибрежных частях также существенно увеличивается — от 1,0–1,5 м в западной половине озера до 3,0 м в восточной (рис. 7, В). Подчеркнем, что форма изолиний рельефа дна и изолиний равной мощности комплекса 4 в восточной половине озера значительно усложняется.

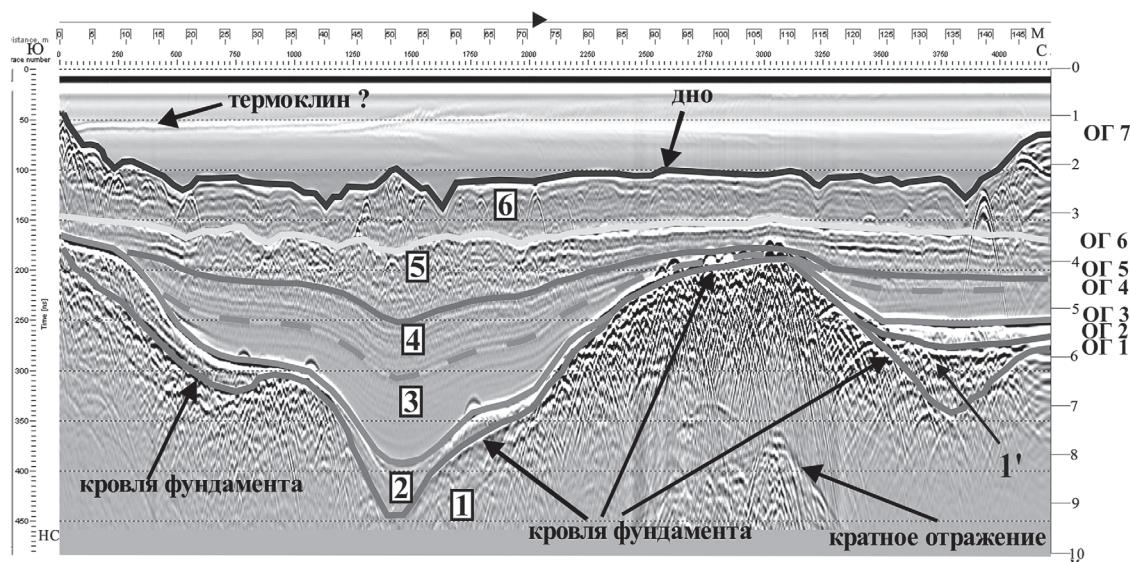


Рис. 8. Георадиолокационный профиль по оз. Верхнее с интерпретацией: 1'–10' — георадиолокационные комплексы (объяснение в тексте); OG1 — OG7 — отражающие горизонты (OG1 — кровля архейского фундамента; OG7 — дно). Справа дана шкала глубин, м (при $V=3,7$ см/нс)

Для привязки комплексов 2–4, которые залегают выше кровли фундамента (OG1) использованы данные бурения скважины WSBS-2004-11 глубиной 5 м, которая находится на небольшом расстоянии к юго-востоку от озера (рис. 2, 4). Фундамент этой скважины не вскрыт. Основная часть разреза (0–4,8 м) представлена (снизу-вверх): сапропелем, оторфованным сапропелем и торфом. В забое скважины вскрыты пески и песчано-гравийные отложения с солоноватоводной морской флорой видимой мощностью около 20 см [Олюнина, Романенко, 2007]. Комплекс 2, залегающий на фундаменте, на георадиолокационном профиле имеет в целом слоистый тип волновой картины. Наличие несогласий, изменения мощности отдельных прослоев в комплексе 2 и его глубина залегания дают основания сопоставить его с вскрытыми скважиной песками и песчано-гравийными отложениями, т.е. предположить его прибрежно-морской генезис.

Выше по разрезу над OG2 залегают комплексы 3 и 4, которые мы соотносим с сапропелем и торфом. Наблюдаемые для этих отложений волновые картины были получены при опытно-методических работах с такой же антенной 300 МГц на оз. Тростянское (Московская область), где проводилась промышленная разработка сапропеля, а также при изучении торфа. Волновая картина на этих объектах также меняется от хаотической до слабо стратифицированной, иногда практически прозрачной, и зависит от степени переработки органического материала [Старовойтов, 2008; Slater, Reeve, 2002; Comasa et al., 2005; Бричева и др., 2017]. Таким образом, можно предположить, что самая интенсивная отражающая граница OG2, выделяющаяся на всех профилях (рис. 5), соотносится с резкой сменой литологического

состава, т.е. с кровлей песков, вскрытых в забое скважины.

Абсолютный возраст (образец взят из основания толщи сапропеля над OG2) определен в 8350 лет. На ранних стадиях поднятия п-ова Киндо после снятия ледниковой нагрузки в позднеледниковые и в начале голоцене скорость поднятия этого блока оценивается в 9–13 мм/год и даже больше. В настоящее время скорость вздымания уменьшилась и составляет 4–5 мм/год. Вследствие этих движений валунные отмостки с хорошо окатанными валунами предположительно морского генезиса находят на высоте до 90 м [Олюнина, Романенко, 2007], т.е. геологические данные не противоречат выводу о морском генезисе песков в основании скважины.

Озеро Верхнее расположено в 300 м на юго-запад от оз. Водопроводное и в плане слегка вытянуто в северо-западном направлении (рис. 3). В его северной и южной частях в дне выделяются две ложбины, глубина в которых может достигать 2,5–3,0 м. Они разделены поднятием субширотного направления с глубиной <2 м (рис. 8, 9, 10, Г). Выбранная антenna 300 МГц позволила изучить весь осадочный разрез, который разделяется 7-ю основными рефлекторами на 7 комплексов (рис. 8). Самый нижний рефлектор OG1, ниже которого, как и на данных об оз. Водопроводное, оси синфазности отраженных волн не прослеживаются, был интерпретирован как кровля архейского фундамента. Для подтверждения этого вывода профиль № 2 через озеро (рис. 3) был дополнен профилем с той же антенной 300 МГц на сушу до коренного выхода архейских гнейсов, что позволило проследить OG1 непосредственно до этого обнажения пород фундамента [Старовойтов и др., 2018].

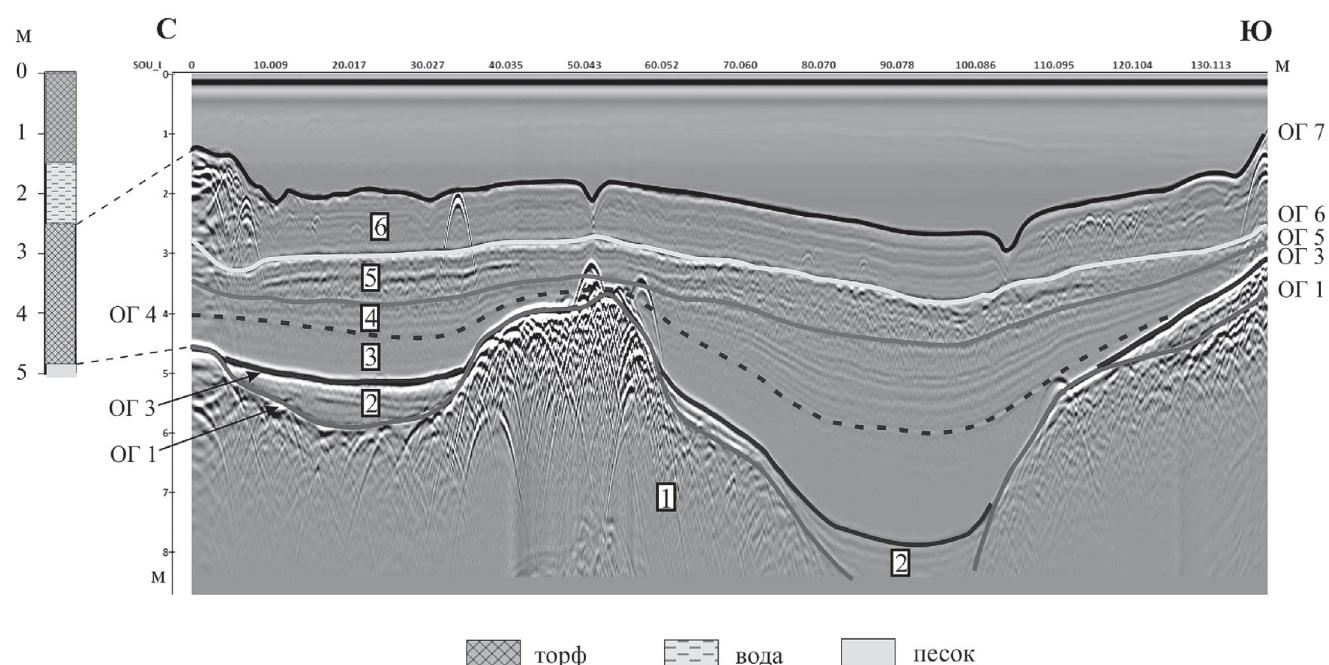


Рис. 9. Георадиолокационный профиль по оз. Верхнее с интерпретацией: 1–6 — георадиолокационные комплексы (объяснения см. в тексте); ОГ1, 3–7 — отражающие горизонты (ОГ1 — кровля фундамента; ОГ7 — дно). Слева — шкала глубин в м ($V=3,7$ см/нс)

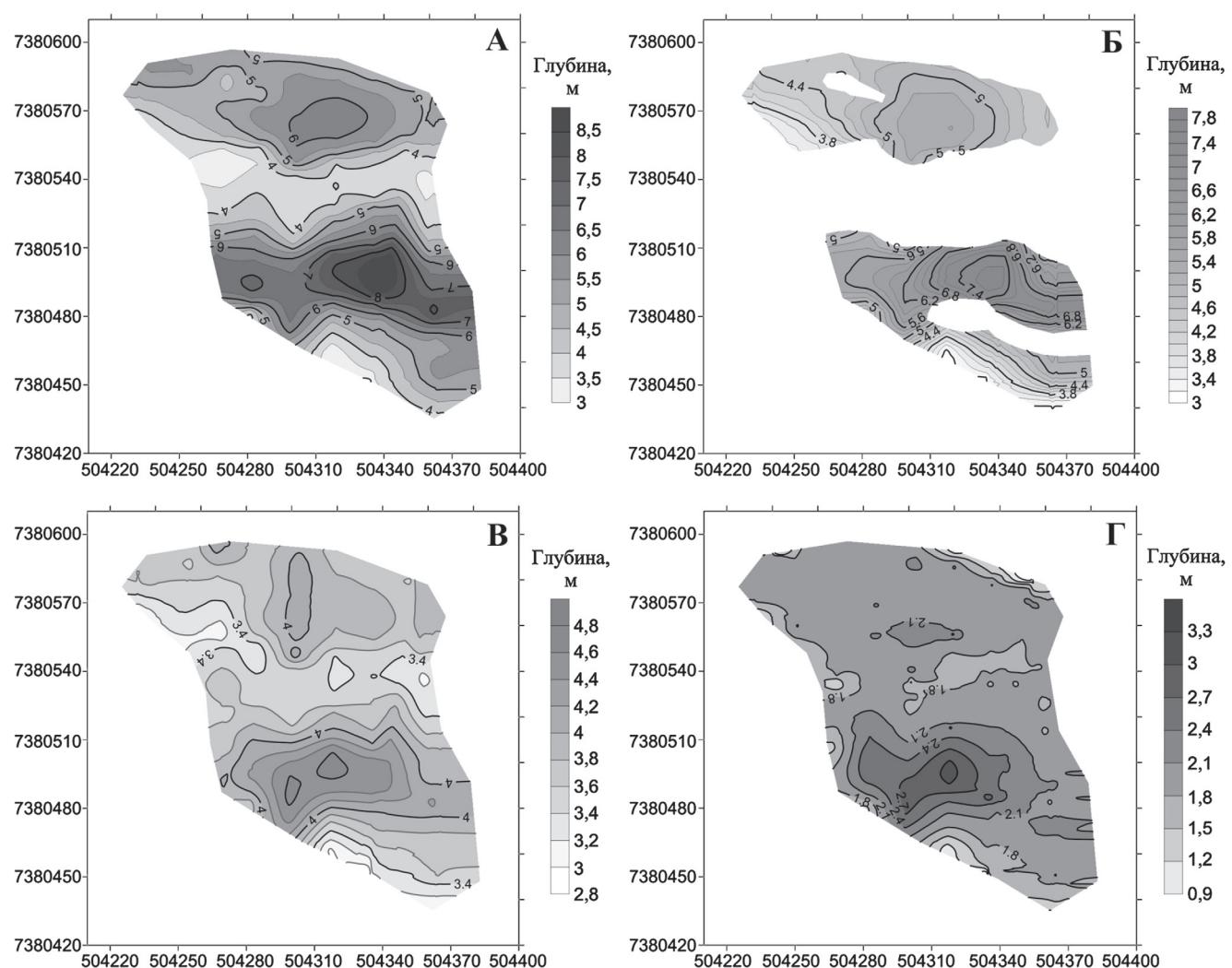


Рис. 10. Структурные схемы по отражающим горизонтам: А — ОГ1, Б — ОГ3, В — ОГ5, Г — ОГ7 (А — кровля фундамента; Г — дно) (см. рис. 8)

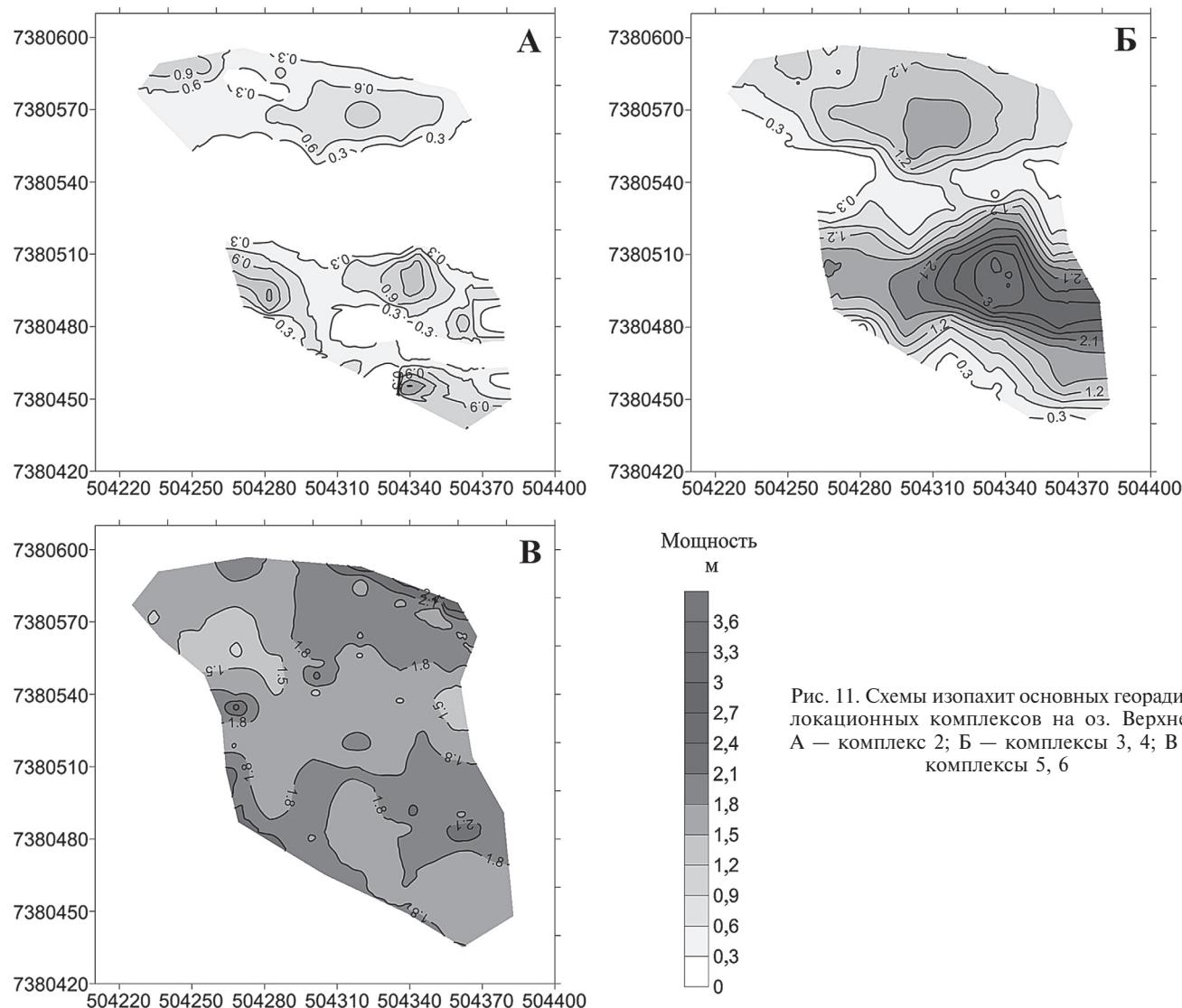


Рис. 11. Схемы изопахит основных георадиолокационных комплексов на оз. Верхнее:
А — комплекс 2; Б — комплексы 3, 4; В — комплексы 5, 6

В кровле фундамента выделяются две впадины субширотного простириания, которые в центральной части озера разделяются поднятием. Во впадинах кровля опускается на некоторых участках до 8,0–8,5 м (рис. 10, А). Осадочный чехол на оз. Верхнее имеет более сложное строение по сравнению с разрезом оз. Водопроводное. Всего выделено 7 комплексов, один из которых имеет ограниченное распространение. Его кровлей служит ОГ2, на рис. 8 комплекс обозначен цифрой 1'. Предположительно, этот неслоистый комплекс с хаотической волновой картиной может быть представлен флювиогляциальными отложениями.

Отражающий горизонт ОГ3 по динамическим характеристикам аналогичен ОГ2 на профилях, полученных на оз. Водопроводное. Он также служит кровлей слоистого комплекса (комплекс 2 на рис. 8, 9) и залегает на фундаменте. Глубина его кровли на отдельных опущенных участках составляет 7,0–7,5 м (рис. 10, Б). Учитывая близость расположения озер, можно предположить, что комплексы 2 на обоих озерах — возрастные

аналоги, однако следует отметить, что мощность комплекса 2 на оз. Верхнее значительно меньше, чем мощность его предполагаемого аналога на оз. Водопроводное (рис. 7, А и 11, А). Комплекс 2 развит во впадинах, на разделяющем их поднятии он отсутствует (рис. 11, А).

Залегающие выше комплексы 3 и 4 также характеризуются слоистым типом волновой картины, но в комплексе 4 оси синфазности имеют большую амплитуду и выражены более отчетливо по сравнению с комплексом 3, волновая картина в котором иногда почти прозрачная (рис. 8). Вследствие похожести волновых картин эти комплексы рассматриваются совместно. На нижележащем комплексе они залегают с угловым несогласием. На приподнятых участках кровли фундамента отложения комплексов 3 и 4 либо отсутствуют, либо их мощность резко уменьшаются. Объекты, создающие дифракционную картину, в этих комплексах практически не наблюдаются. По типу волновой картины (отчетливо выраженной слоистости), рассматриваемые отложения напоминают совре-

менные морские осадки. Кровлей этой слоистой толщи является ОГ5, который выделяется преимущественно по резкой смене волновой картины, особенно на участках с максимальной глубиной залегания кровли фундамента (рис. 10, а). В плане рельеф поверхности ОГ5 аналогичен рельефу поверхности кровли фундамента — тоже выделяются два пониженных участка субширотного простирания, разделенные поднятием. Глубина залегания поверхности ОГ5 меняется от 3 до 4,6 м (рис. 10, В). Суммарная мощность отложений комплексов 3 и 4 не превышает 3,6 м, минимальная мощность приурочена к субширотному приподнятым блокам фундамента и составляет около 0,3 м (рис. 11, б).

Более молодые комплексы 5 и 6, с несогласием залегающие на комплексе 4, имеют сходную волновую картину, вследствие чего также рассматриваются вместе. Они выделены на всей площади озера и отличаются от описанных выше плохо выраженной слоистостью, а на многих участках волновую картину можно охарактеризовать как хаотическую, например, между пикетами 22–70 в комплексе 5 или отдельные участки в комплексе 6, включая прибрежные (рис. 8). В плане они приурочены к пониженным участкам ОГ5 (рис. 8, 10, в). В комплексе 6, который обнажается на дне, обнаружено много дифрагирующих объектов, происхождение которых, как и на оз. Водопроводное, мы связываем с затонувшими стволами деревьев. Разброс значений скорости, оцененных по гидографам дифрагированных волн, довольно значителен, что, вероятно, обусловлено пересечением дифрагирующих линейных объектов под разными углами [Владов и др., 2010]. Для перевода из временного в глубинный масштаб использована средняя скорость 3,7 см/нс. Рельеф дна в южной части озера наследует рельеф кровли фундамента (рис. 10, А, Г), в северной — имеет субгоризонтальную форму. Мощность объединенных комплексов 5 и 6 в среднем меняется от 1,5 до 2,0 м (рис. 11, В).

Следует также отметить, что ниже ОГ2 на профилях, полученных на озере Водопроводное, и на некоторых участках ниже ОГ3 на озере Верхнее наблюдаются многочисленные гиперболы, вершины которых приурочены к этим отражающим горизонтам (рис. 5). В других комплексах гиперболы распространены хаотически, никаких закономерностей в их расположении не наблюдается. Еще раз подчеркнем, что ОГ2 и ОГ3 характеризуются значительно большими амплитудами по сравнению с другими ОГ.

Сопоставление разреза скважины WSBS-2004-12, которая находится на суше на продолжении георадиолокационного профиля № 3 (рис. 3, 9) показало, что интенсивный рефлектор ОГ3, как и ОГ2 на оз. Водопроводное (рис. 4), уверенно коррелирует с кровлей предположительно прибрежно-морских песков, которые перекрыты торфом, т.е. с резкой сменой литологического состава.

При изучении истории формирования осадочного чехла одна из важных проблем — определение фациального состава отложений. Опыт работ по изучению озерных осадков методом георадиолокации и опубликованные данные свидетельствуют о том, что выделение фаций в этих отложениях часто представляет довольно сложную задачу в связи со схожестью волновых картин. Если по сейсмическим данным выделение сейсмофаций с различной степенью достоверности решается (используются разнообразные сейсмические атрибуты), то георадиолокационных работ по этой тематике немного, и в них анализируются разрезы преимущественно песчаных отложений, на которых георадиолокационные данные наиболее представительны [Van Overmeeren, 1998; Pedersen, Clemmensen, 2005; Hugenholtz et al., 2007; Ground Penetrating ..., 2003; Bristow et al., 2005; Beres et al., 1999; Clemmensen et al., 2007; Kocurek, 1996]. Практически во всех работах рассмотрена только геометрия осей синфазности отраженных волн, что отчасти справедливо при анализе отдельных профилей, т.е. при 2D наблюдениях. Однако при трехмерных наблюдениях форма осей будет меняться в зависимости от сложности структуры изучаемого разреза и от сечения и может быть никак не связана с литологическими особенностями [Ground Penetrating..., 2003].

Рассмотрим возможности использования для этих целей коэффициента поглощения и проводимости на примере комплекса 6 на оз. Верхнее. Иными словами, проанализируем, меняются ли значения проводимости и коэффициента поглощения и есть ли корреляция между какими-либо изменениями волновой картины и изменениями рассматриваемых физических величин. В рассматриваемом комплексе 6 выделение георадиолокационных фаций (далее — фаций) по типу волновой картины затруднено, так как на многих участках она осложнена дифрагированными волнами от различных объектов, т.е. не связана с литологическими изменениями. Тем не менее была выделена «хаотическая» фация, в которой оси синфазности либо отсутствуют, либо их значительно меньше, чем на соседних участках (рис. 12).

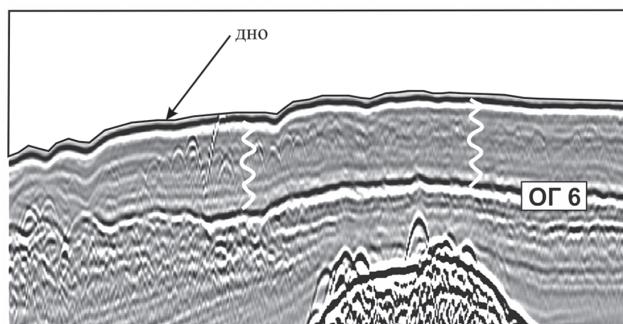


Рис. 12. Фрагмент георадиолокационного профиля с примером «хаотической» фации в комплексе 6 (показана белыми вертикальными линиями)

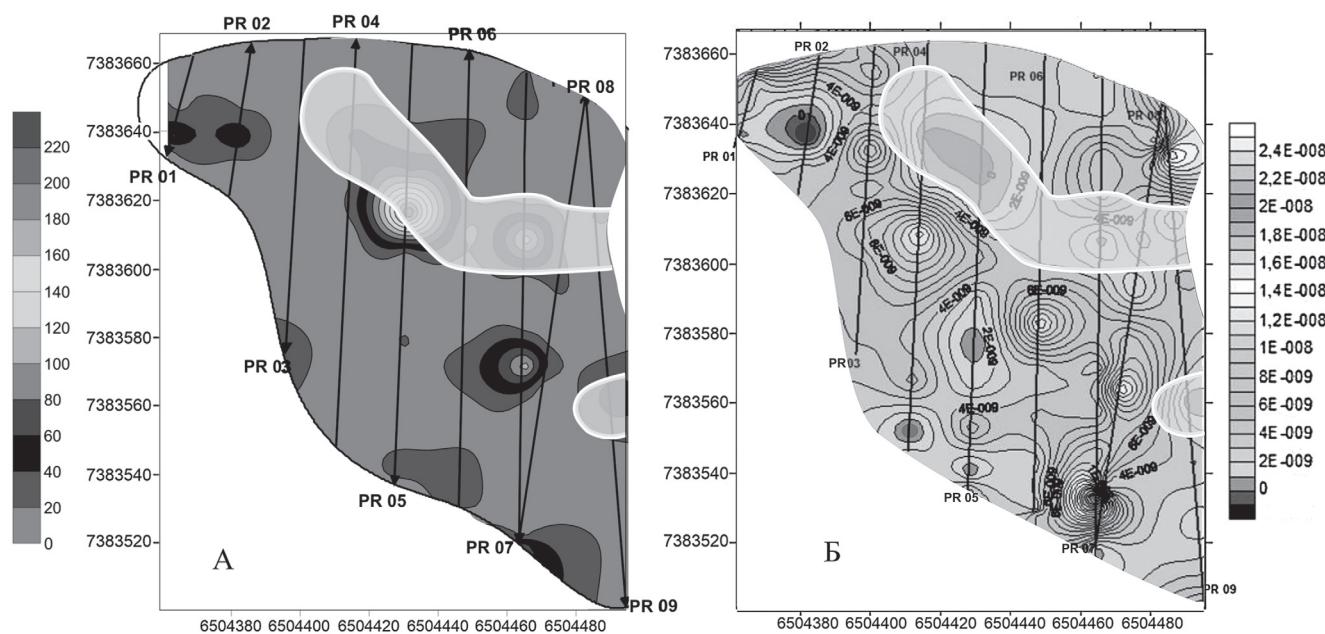


Рис. 13. Схема удельного электрического сопротивления (А, Ом·м) и схема коэффициента поглощения (Б, с/м) в комплексе 6 на оз. Верхнее. Белой линией выделены участки расположения хаотической фации

Определение коэффициента поглощения и проводимости в комплексе 6 на озере Верхнее. Исследования проводились между границей, соответствующей отражению от дна (ОГ7) и первой поддонной границей (ОГ6). При этом предполагается, что скорость внутри слоя не меняется, а скорость в водной толще принята равной 3,3 см/нс. Анализируется латеральная изменчивость проводимости внутри слоя для заданной частоты антенны, а не абсолютные значения. Независимые определения проводимости (σ) отсутствуют. Причинами изменения проводимости могут быть, в частности, латеральные изменения глинистости внутри слоя.

В рамках модели Дебая для диэлектриков можно получить выражение для расчета проводимости с использованием параметров: длины волны, коэффициент затухания, фазовая постоянная, фазовая скорость в среде [Владов и др., 2017]:

$$\sigma = 0,159 \cdot 10^7 \frac{\alpha}{V}, \quad (1)$$

где α — коэффициент затухания, V — скорость в среде

Коэффициент затухания α можно рассчитать между двумя границами, соответствующими отражению от дна (ОГ7) и первой поддонной границы (ОГ6) как отношение спектров этих отражений по формуле:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{\Delta h} \ln \left[\frac{S_1(\omega)}{S_2(\omega)} \right], \quad (2)$$

где $S_1(\omega)$ — спектр отраженного сигнала от дна (ОГ7), $S_2(\omega)$ — спектр отраженного сигнала от

первой поддонной границы (ОГ6), Δh — расстояние между поддонной границей и дном, м, рассчитанное по формуле

$$\Delta h = \frac{t_2 - t_1}{2V},$$

где t_2 — время прихода отраженной от поддонной границы волны, t_1 — время прихода отраженной от дна волны, V — скорость в изучаемом слое, принята равной 3,7 см/нс (из оценки скорости по гидографам дифрагированных волн).

Через каждые 500 трасс, начиная с 1 трассы и до конца профиля, рассматривали спектр отраженной волны на границе дна и на первой поддонной границе. Между границами на каждой трассе рассчитывали коэффициент поглощения α по приведенной выше формуле (2). В результате получены графики зависимости α для каждой трассы.

Соответственно, если взять производную $d\alpha/dt$ в окрестности какой-либо частоты, то получим α_0 для данной частоты, например для центральной частоты сигнала. И для каждого профиля через каждые 500 трасс (начиная с 1-й) получены значения α_0 для полосы частот шириной 125 МГц (от 50 до 175 МГц для данной антенны).

Затем, принимая во внимание, что удельное электрическое сопротивление $\rho = 1/\sigma$, рассчитаны значения проводимости σ (по формуле 1) и значения удельного электрического сопротивления ρ .

Таким образом, показана возможность расчета коэффициента поглощения α_0 на заданной частоте антенны и оценки проводимости, а вместе с проводимостью и УЭС (ρ) в придонном комплексе. Изменчивость α_0 проявляется на всех профилях и на некоторых участках до 10 раз. В силу большого

контраста значений α_0 значения УЭС также меняются, в основном от 20 до 200 Ом·м. Изменения значений УЭС, возможно, связаны с изменением глинистости в придонных осадках. Влияние вышележащей толщи воды (т.е. ее проводимости) не учитывалось. По полученным данным построены схемы УЭС и коэффициента поглощения в комплексе 6 оз. Верхнее (рис. 13).

Сопоставление схем и расположения зон хаотической фации (рис.13) показало, что в целом хаотическая фация совпадает в плане с зонами повышенного УЭС и пониженных значений коэффициента поглощения в комплексе 6. Для выводов о связи этих параметров с литологическим составом отложений, очевидно, необходима заверка пробоотбором.

Выводы. 1. Впервые проведенный детальный анализ строения осадочного чехла на двух озерах п-ова Киндо показал, что оно в целом совпадает, но есть и различия. На породах архейского фундамента в обоих озерах залегает толща, которая после сопоставления с разрезами скважин была отнесена к песчаным отложениям прибрежно-морского генезиса (т.е. мелководным). Мощность этого комплекса увеличивается в северо-восточном направлении в среднем от 0,5 м (оз. Верхнее) до 2,0–2,5 м (оз. Водопроводное). На оз. Верхнее комплекс развит локально, он выполняет понижения в кровле фундамента.

2. Выше по разрезу на обоих озерах залегают озерно-болотные отложения (сапропель, торф). Резкая смена литологического состава (от мел-

ководных прибрежно-морских песков на озерно-болотные отложения) подтверждается наличием высокоамплитудных осей синфазности на этих границах (ОГ2 на оз. Водопроводное и ОГ3 на оз. Верхнее).

3. Строение разреза на оз. Верхнее над ОГ3 более сложное (выделяются 4 комплекса) по сравнению с разрезом над ОГ2 на оз. Водопроводное (выделено 2 комплекса).

4. Отмеченное уменьшение мощности прибрежно-морских отложений на оз. Верхнее, которое находится гипсометрически выше относительно оз. Водопроводное, указывает на то, что в начале голоцене линия берега находилась в непосредственной близости от оз. Верхнее. Не исключено, что весь п-ов Киндо (учитывая тот факт, что оз. Верхнее расположено вблизи максимальной высоты 103,8 м на горе Ругозерская) был покрыт морем. На это же указывает и наличие валунной отмостки приблизительно на тех же высотных отметках, что и озера.

5. Построенные карты УЭС и значений коэффициентов поглощения в комплексе 6 показали значительные изменения этих параметров в плане. Выделенная по особенностям волновой картины хаотическая георадарная фация в целом совпадает с повышенными значениями УЭС и пониженными значениями коэффициента поглощения. Для выявления их связи с литологическими особенностями разреза и возможностью использования для фациального картирования необходима заверка пробоотбором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бричева С.С., Матасов В.М., Шилов П.М. Георадар в геоэкологических исследованиях при искусственном обводнении торфяников // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. № 3. С. 76–83.
- Владов М.Л., Капустин В.В., Пятилова А.М., Кувалдин А.В. Георадарные наблюдения для оценки проводимости геологической среды. Лабораторный эксперимент // Геофизические исследования. 2017. Т. 18, № 3. С. 5–16.
- Владов М.Л., Пятилова А.М., Калашников А.Ю. Экспериментальное изучение линейных объектов методом георадиолокации // Геофизика. 2010. № 2. С. 65–70.
- Олонина О.С., Романенко Ф.А. К вопросу о распространении морских отложений на Карельском берегу Белого моря // Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 1. М.: ГЕОС, 2007. С. 257–259.
- Путешествия по Киндо-мысу. Тула: Гриф и К, 2008. 144 с.
- Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 188 с.
- Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Марченко А.Л. и др. Возможности георадиолокации при изучении четвертичных отложений в озерах Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 62–75.
- Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терехина Я.Е. Атлас по интерпретации геофизических данных для морской практики на Белом море. М.: КДУ; Университетская книга, 2018. 110 с.
- Beres M., Haggenger P., Green A.G., Horstmeyer H. Using two- and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture // Sediment. Geol. 1999. Vol. 129. P. 1–24.
- Bristow C.S., Lancaster N., Duller G.A.T. Combining ground penetrating radar surveys and optical dating to determine dune migration in Namibia // J. Geol. Soc. 2005. Vol. 162, N 2. P. 315–322.
- Clemmensen L.B., Bjornsen M., Murray A., Pedersen K. Formation of aeolian dunes on Anholt, Denmark since AD 1560: A record of deforestation and increased storminess // Sediment. Geol. 2007. Vol. 199. P. 171–187.
- Comasa X., Slater L., Reevet A. Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GPR) // J. Hydrology. 2005, Vol. 315. P. 40–51.
- Ground Penetrating Radar in sediments / Ed. C.S. Bristow, H.M. Jol // Geol. Soc. Spec. Publ. Vol. 211. L., 2003. 330 p.
- Hugenholtz C.H., Moorman B.J., Wolfe S.A. Ground penetrating radar (GPR) imaging of the internal structure of an active parabolic sand dune // Stratigraphic analysis using GPR // Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 2007. Vol. 432. P. 19–34.
- Kocurek G.A. Desert aeolian systems // Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy. Oxford: Blackwell Science, 1996. P. 125–153.

Pedersen K., Clemmensen L.B. Unveiling past aeolian landscapes: A ground penetrating radar survey of a Holocene coastal dunefield system. Thy, Denmark // *Sediment. Geol.* 2005. Vol. 177. P. 57–86.

Slater L.D., Reeve A. Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. // *Geophysics*. 2002. Vol. 67, N 2. P. 365–378.

Van Overmeeren R.A. Radar facies in unconsolidated sediments in the Netherlands — a radar stratigraphy // *J. Appl. Geophys. Spec. iss.* 1998. Vol. 40. P. 1–40.

Поступила в редакцию 02.04.2019

Поступила с доработки 25.04.2019

Принята к публикации 25.04.2019