

ОПЫТ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОЧВЕННО-ПИРОКЛАСТИЧЕСКОГО ЧЕХЛА ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ О. МАТУА (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

© 2018 Д.Е. Едемский¹, А.В. Попов¹, И.В. Прокопович¹, А.В. Дегтерев², А.В. Рыбин²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 108840, г. Троицк; e-mail: deedemsky@gmail.com

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск; e-mail: rybin_av@bk.ru

Остров Матуа представляет собой остров вулканического происхождения, расположенный в центральной части Курильской островной дуги. Большую, северо-западную, часть острова занимает постройка вулкана Пик Сарычева, являющегося одним из самых активных вулканов на Курильских островах. Юго-восточная часть острова представлена древней абразионно-аккумулятивной морской террасой, цоколь которой сложен слабодислоцированными плиоцен-эоплейстоценовыми вулканогенно-осадочными комплексами, перекрытыми морскими отложениями и мощным почвенно-пирокластическим чехлом. Кроме того, остров Матуа является местом с уникальным антропогенным ландшафтом, сформированным в ходе возведения японской армией сложной военной фортификации в первой половине XX в. В работе приводятся результаты георадио-локационного обследования почвенно-пирокластического чехла юго-восточной части острова Матуа, поиску и обнаружению скрытых потерн и крупномасштабных полостей оборонительных сооружений. Полученные результаты георадарного зондирования сопоставляются с данными геологических разрезов, в которых зафиксирована летопись эксплозивной активности на острове Матуа за позднплейстоцен-голоценовое время.

Ключевые слова: георадиолокация, почвенно-пирокластический чехол, остров Матуа, объекты фортификации.

ВВЕДЕНИЕ

Остров Матуа, входящий в состав Сахалинской области и административно относящийся к Северо-Курильскому городскому округу, расположен в центральной части Курильской островной дуги (рис. 1). Площадь острова составляет 53 км², при длине 12 км и ширине 6.4 км. Большая часть острова занята постройкой вулкана Пик Сарычева — одного из самых активных вулканов региона (рис. 2 на 1 стр. обложки) (Горшков, 1967; Гущенко, 1979; Simkin, Siebert, 1994), последнее извержение которого происходило в июне 2009 г. — мощное эксплозивно-эффузивное извержение, привлекшее внимание представителей российского и международного вулканологического сообщества (Гришин, Мелекесцев, 2010; Дегтерев, 2011; Левин и др., 2010; Matoza et al., 2011; Rybin et al., 2011; Urail, Ishizuka, 2011). Юго-восточная часть острова представлена равниной — древней абразионно-аккумулятивной

морской террасой, сложенной вулканогенно-осадочными комплексами, которые перекрыты морскими отложениями и почвенно-пирокластическим чехлом (ППЧ) (Арсланов и др., 2011; Дегтерев, 2013; Дегтерев и др., 2012; Разжигаева и др., 2018; Рыбин и др., 2017).

Активная вулканическая деятельность, созданные японцами оборонительные сооружения и военные действия периода Второй мировой войны создали на острове специфический и во многом уникальный ландшафт. В условиях относительно малой площади острова это привело к чрезвычайной насыщенности территории объектами военной и инженерной инфраструктуры, полевой фортификации, оказавшихся вписанными в естественную природную среду вулканического острова. Однако, несмотря на это о. Матуа остается все еще малоизученным, поэтому любые новые данные о его природе (в т.ч. геологии, стратиграфии, палеогеографии и пр.) представляют большую ценность.

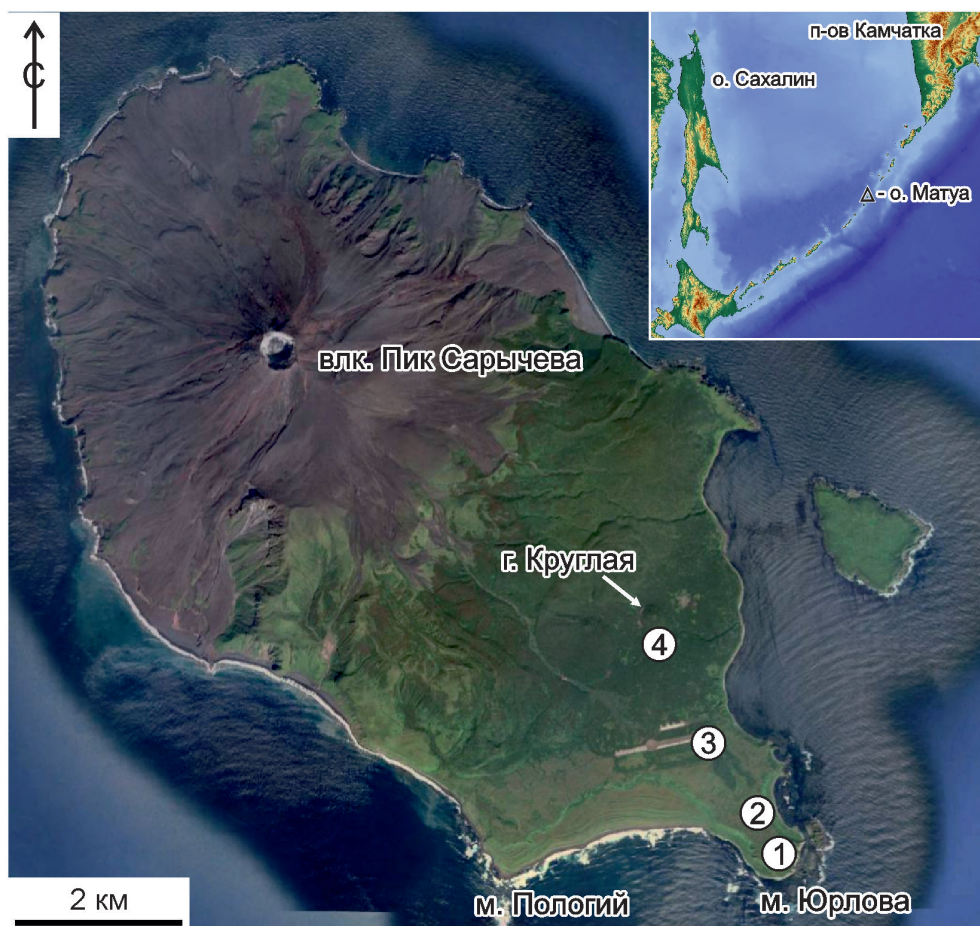


Рис. 1. Остров Матуа, аэрофотоснимок Google Maps. Расположение полигонов для оценки скорости распространения ЭМ волн по годографам отраженных волн: {01} — полигон «Артиллерийская позиция»; {02} — полигон «поле»; {03} — полигон «аэродром»; {04} — полигон «гора Круглая».

Fig. 1. Matua Island, aerial photo from Google Maps. Location of sites used for EM waves propagation velocity estimation by reflected wave hodographs: {01} — «Gun station» site; {02} — «field» site; {03} — «airdrome» site; {04} — «Kruglaya Mountain» site.

В 2017 г. в ходе очередной совместной комплексной экспедиции Тихоокеанского флота, Министерства обороны и Русского Географического общества были проведены полевые работы, направленные на изучение почвенно-пирокластического чехла в юго-восточной части о. Матуа, включавшие геофизические и геологические исследования, первые результаты которых представлены в настоящей работе. В число основных задач исследований входило прослеживание ППЧ и выявление его стратификации, локализация неоднородностей, а также обследование неотъемлемых элементов ландшафта острова — районов расположения оборонительных сооружений, обнаружение скрытых потерн и крупномасштабных полостей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Георадиолокация — эффективный метод обследования грунтов и неразрушающего контроля неметаллических строительных матери-

алов на глубинах от единиц до десятков метров в зависимости от модели прибора, используемой антенны и параметров зондируемой среды (Владов и др., 2004; Изюмов и др., 2008). В наших исследованиях был использован георадар повышенной мощности серии «Лоза-В». Применение антенных систем с центральными частотами в диапазоне 50–350 МГц обеспечивало зондирование на глубины до 30 м в непростых для радиозондирования геологических условиях о. Матуа (затухание радиосигнала из-за высокой влажности и большого количества субпараллельных радиоконтрастных слоев, отражающих сигнал).

Электромагнитная (ЭМ) волна, излучаемая антенной, отражается от тех участков подземной среды, в которых наблюдается пространственное изменение таких ее параметров, как: диэлектрическая проницаемость (ϵ), проводимость (σ) или обеих величин сразу. Информация о среде зондирования содержится в амплитуде, полярности и времени задержки отраженного сигнала

(Владов и др., 2004; Изюмов и др., 2008; Koreikin et al., 1996).

Для правильной геологической интерпретации полученных в результате измерений радиолокационных профилей в равнинной юго-восточной части о. Матуа на четырех полигонах (рис. 1), разнесенных на расстояние до 2.5 км, проведено зондирование по методу общей глубинной точки (ОГТ) с последовательным увеличением разноса между антеннами по методике, описанной в работах (Владов и др., 2004; Едемский и др., 2010). Зондирование позволило определить скорость ЭМ волн в среде и пересчитать разрез из масштаба времен в масштаб глубин без привлечения априорной информации.

Георадарные профили прокладывались с шагом 10–30 см, а их направление и протяженность определялись исходя из постановки задачи и с учетом результатов визуального осмотра местности. В процессе измерений антенны георадара передвигались по поверхности земли с фиксацией положения в каждой точке съемки, что обеспечивало высокое качество зондирования.

При обработке и интерпретации полученных данных основное внимание было уделено выделению слоев и их границ, определению средней скорости распространения радиоволны в слое и приведению радарограммы к истинному масштабу глубин с учетом скорости распространения сигнала в среде (Владов и др., 2004; Изюмов и др., 2008). Слои георадарного разреза выделялись с помощью процедуры разграничения максимумов и минимумов сигнала, выделения осей синфазности сигнала и их анализа; представления разреза как в линейном режиме, так и в режиме производной функции амплитуды сигнала — процедур, реализованных в программе обработки и визуализации результатов измерений «Крот», поставляемой в комплекте георадара «Лоза». Подтверждением наличия возможных нарушений структуры грунта, антропогенных и природных разрывов их сплошности являются чисто радиофизические признаки — особенности сигналов в этих зонах, разрывы осей синфазности, многочисленные сдвиги по фазе и наличие кратных переотражений сигнала.

Геологическая часть работ, необходимая для сравнительного анализа и сопоставления геофизических данных с реальной стратиграфической ситуацией, включала тефрохронологические исследования, в ходе которых изучалось строение ППЧ в пределах юго-восточной части острова. Юго-восточная часть острова является наиболее древней поверхностью осадконакопления на острове (северо-западная часть острова занята постройкой действующего вулкана Пик Сарычева и в значительной мере перекрыта продуктами его недавних извержений): равнинный

рельеф обеспечил благоприятные условия для захоронения и сохранности отложений, что обеспечило максимальную полноту и представительность заложенных в нем разрезов. Всего в ходе работ было детально опробовано и описано двадцать восемь разрезов ППЧ (зачисток и шурфов).

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Остров Матуа относится к группе Центральных Курильских островов, располагаясь в их северной оконечности — между о. Райкоке (на севере) и о. Расшуа (на юге) (рис. 1). По данным (Новейший ..., 2005) наземные вулканические постройки на о. Матуа приурочены к поверхностям надводных и подводных морских террас, срезающих вершину огромного комплексного вулканоида, размер подводного основания которого составляет 30×40 км, а объем ~1200 км³. Наземные вулканические образования занимают большую часть о. Матуа и их доля составляет 50 км² (96%). Остальные 2 км² (4%) приходятся на морские аккумулятивные образования.

Северо-западная часть о. Матуа занята постройкой вулкана Пик Сарычева — современного действующего стратовулкана (рис. 1, 2). Пик Сарычева (абсолютная высота — 1446 м), как и большинство современных действующих вулканических аппаратов Курильской дуги, построен по типу «Сомма-Везувий» и состоит из древнего вулкана Матуа с вершинной кальдерой и молодого конуса Пик Сарычева. Фрагменты постройки вулкана Матуа к настоящему времени сохранились в юго-восточной части о. Матуа. Пик Сарычева относится к числу наиболее активных вулканов Курильской островной дуги: его извержения зафиксированы в 1765±5, 1878–1879, 1923, 1928, 1930, 1946, 1954, 1960, 1976 и 2009 гг. (Андреев и др., 1978; Горшков, 1948, 1954, 1967; Дегтерев и др., 2011; Левин и др., 2010; Мархинин, 1964; Полонский, 1994; Сноу, 1992; Шилов, 1962; Rybin et al., 2011).

Юго-восточная часть острова представлена древней абразионно-аккумулятивной морской террасой со средними отметками высот 40–60 м над уровнем моря. Ее цоколь сложен слабодислоцированными, предположительно плиоцен-эоплейстоценовыми вулканогенно-осадочными комплексами, перекрытыми морскими отложениями и мощным ППЧ, являющимся главным объектом настоящего исследования. ППЧ, сформировавшийся в результате активности вулкана Пик Сарычева, преимущественно в голоцене, имеет мощность 4–7 м (Дегтерев и др., 2012; Разжигаева и др., 2018). Он представляет собой геологическое образование, состоящее из различных

по мощности, крупности и составу горизонтов пироклаستيки, разделенных погребенными почвами и супесями (рис. 3). Основание ППЧ образуют наиболее мощные пачки пироклаستيки, соответствующие продуктам кальдерообразующего извержения вулкана Матуа (Арсланов и др., 2011; Дегтерев, 2013; Разжигаева и др., 2018; Рыбин и др., 2017), происходившего предположительно в самом конце позднего плейстоцена. Единственным местом, где вскрываются эти отложения, является современный абразионный уступ в районе м. Юрлова (рис. 1). Суммарная мощность этих отложений там превышает 4 м. Пирокластика основной голоценовой части ППЧ представлена горизонтами тефры мощностью от одного до нескольких сантиметров. Десять слоев тефры имеют мощность от нескольких десятков сантиметров до 0.5–1 м. Все они разделяются супесями и почвами.

С точки зрения электродинамики сплошных сред, данный разрез является реперным, т.к. сформирован из горизонтов, состоящих из материалов различающихся по крупности и составу, параметры диэлектрической проницаемости и проводимости которых должны различаться. Это создает хорошие условия для отражения зондирующего сигнала от границ раздела сред, формирования радиообраза данных границ в виде линий равных фаз отраженных сигналов (осей синфазности) на георадиолокационном профиле.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ОГТ

Для проведения зондирования были выбраны четыре точки, крайняя из которых — полигон {01} располагался на мысе Юрлова, в 8.2 км от вулкана (рис. 1). Все точки расположены на поверхности морской абразионной террасы.

Геологический разрез в месте проведения зондирования, полигон {01}, (рис. 4а) представляет собой субпараллельную среду, что зафиксировано на фрагменте георадарного профиля

(рис. 4б) в виде четких горизонтальных осей синфазности отраженных волн, а соответствующий ему годограф, полученный по методике ОГТ, приведен на рис. 4в.

Расчеты показали, что радиолокационная скорость V_p меняется от слоя к слою в пределах от 2.26 до 2.91 см/нс (табл. 1), диэлектрическая проницаемость ϵ изменяется в диапазоне 26.57–40.4, а средняя радиолокационная скорость по разрезу составляет 2.6 см/нс. Здесь и далее в расчетах и при визуализации результатов используется так называемая «радиолокационная скорость», величина которой в два раза ниже скорости распространения ЭМ волны. Ось синфазности на отметке 70 нс мы интерпретировали как подошву водонасыщенных отложений — об этом говорит высокое значение $\epsilon = 40.4$ в вышележащем слое и существенное снижение значения ϵ в нижележащем слое. Сигналы с задержками более 170 нс практически не наблюдаются, что говорит об отсутствии радиоконтрастных границ или о большом затухании радиосигнала на данных глубинах.

При сравнении геологических разрезов на полигонах {01} (рис. 4а), и {03} (рис. 5а), видны отличия в структуре и мощности отдельных слоев. Например, у полигона {03} мощность самой верхней части разреза, сформированного отдельными, маломощными и плохо выдержанными слоями тефры, выше, чем у полигона {01} на 15%, а к полигону {04} его мощность увеличивается вдвое. Мощность слоев более глубокого залегания, состоящих из смеси вулканического гравия и песка, также возрастает с приближением к вулкану. Мощность слоев, образованных мелкозернистым вулканическим песком, в меньшей степени варьируется в зависимости от расстояния до вулкана.

Согласно расчетам, радиолокационная скорость V_p для полигона {03} меняется от слоя к слою в пределах 2.8–7.8 см/нс (табл. 2), что выше, чем для полигона {01}. Это, вероятно, обусловлено более высоким расположением полигона {03}

Таблица 1. Результаты расчета электрических параметров грунта, полигон {01}.

Table 1. Results of electric soil parameters calculation, site {01}.

№ слоя	Годограф			
	V_r , см/нс	V_p , см/нс	D, см	ϵ
1	2.86	2.86	72	27.51
2	2.72	2.56	136	34.33
3	2.64	2.36	169	40.4
4	2.71	2.91	233	26.57

Примечание. V_r — средняя радиолокационная скорость распространения ЭМ волны, рассчитанная по годографу, V_p — радиолокационная скорость в слое, D — глубина залегания границ раздела, ϵ — диэлектрическая проницаемость соответствующего слоя.

Note. V_r — average EM wave radar propagation velocity, calculated with CMP data, V_p — radar propagation velocity in a layer, D — interface depth, ϵ — permittivity of the corresponding layer.

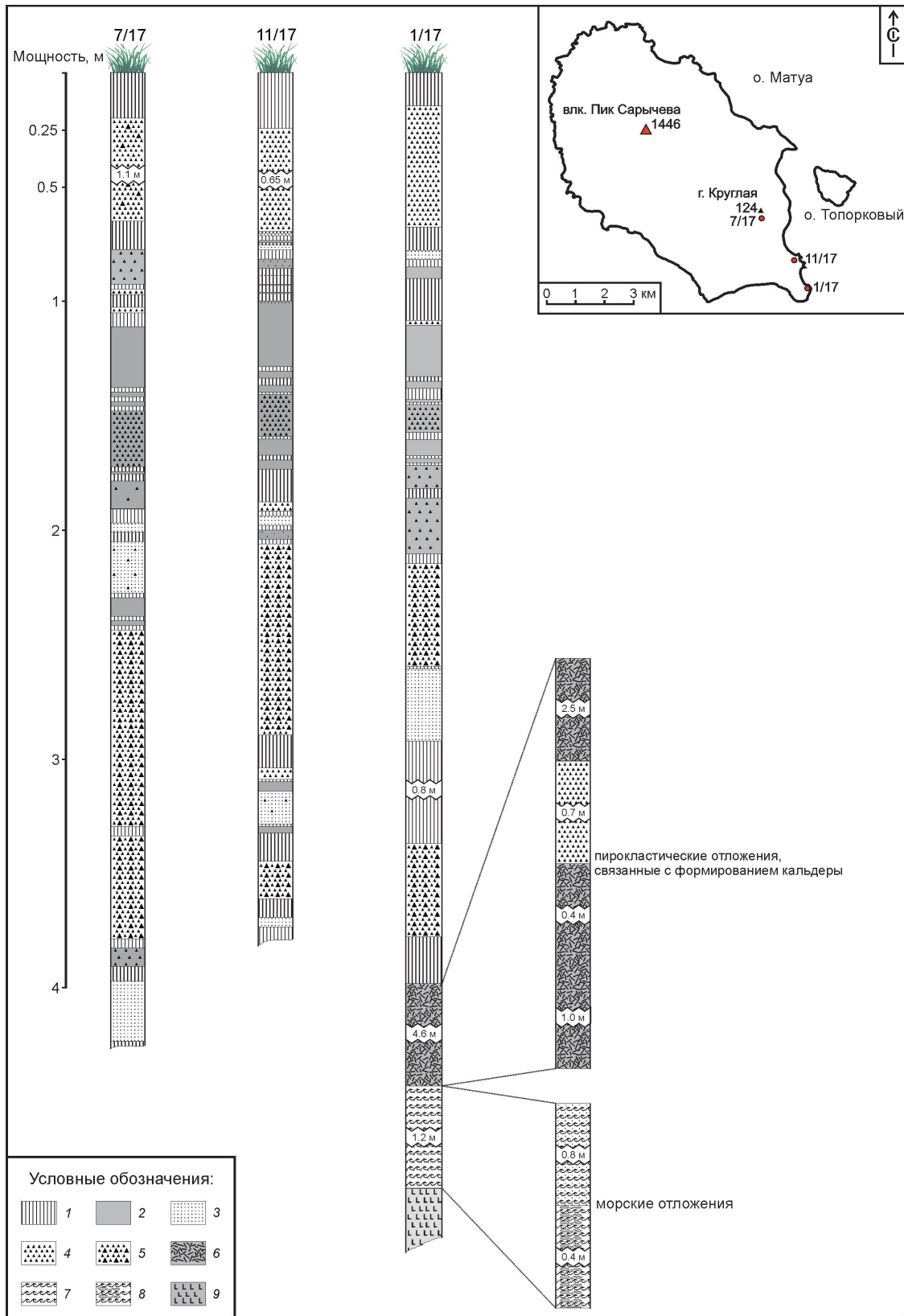


Рис. 3. Сводный разрез пирокластических отложений вулкана Пик Сарычева: 1 — почва; 2–5 — тephра (2 — тонкий пепел; 3 — грубый пепел; 4 — вулканический гравий и лапилли; 5 — вулканические бомбы, гравий, лапилли); 6 — отложения пирокластических потоков и волн; 7–8 — морские отложения (7 — морские пески, 8 — морская галька); 9 — эффузивные породы.

Fig. 3. Composite section of pyroclastic deposits from Sarychev Peak Volcano: 1 — soil; 2–5 tephra (2 — fine-grained ash; 3 — coarse-grained ash; 4 — volcanic gravel and lapilli; 5 — volcanic bombs, gravel, lapilli); 6 — pyroclastic flows and waves deposits; 7–8 — marine deposits (7 — marine sands, 8 — marine pebble); 9 — effusive rocks.

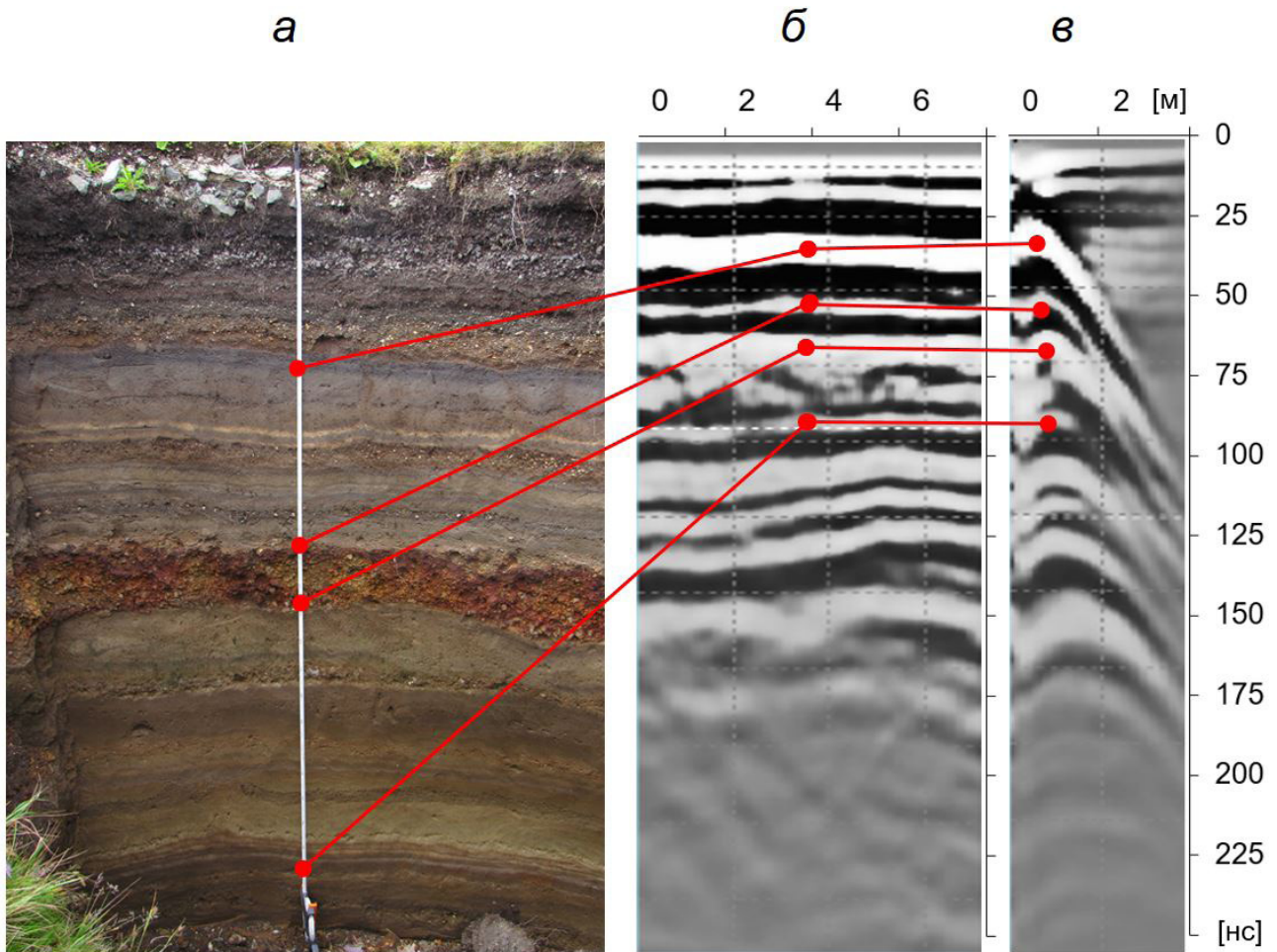


Рис. 4. Геологический разрез, полигон {01}: (а) — шурф, фотография; (б) — элемент георадарного профиля в районе шурфа; (в) — голограф, антенны 100 МГц. Прямыми выносными линиями указано соответствие физических границ раздела слоев геологического разреза осям синфазности георадиолокационного профиля и линиям голографа.

Fig. 4. Geological section, site {01}: (а) — dug hole, photo; (б) — item of GPR cross-section near the dug hole; (в) — CMP data, 100 MHz antennas. Direct extension lines point at the correspondence of physical interfaces in geological sections to line-ups on GPR cross-section and CMP hodograph lines.

над уровнем моря, более низкой влажностью грунта (измерение влажности грунта не было предусмотрено исследованиями) и, возможно, изменением крупности и состава отдельных горизонтов пирокластики. Средняя радиолокационная скорость разреза на глубине порядка 7 м составляет 3.89 см/нс. Следует отметить, что сигналы в районе полигона {03} зарегистрированы с задержками более 190 нс, что соответствует глубинам зондирования более 7 м. Для решения большинства задач при обследовании объектов инженерной инфраструктуры в расчетах использована усредненная радиолокационная скорость $V_p = 2.6$ см/нс в низменных и удаленных от вулкана районах и $V_p = 3.9$ см/нс для объектов в районе г. Круглой (рис. 1).

Применение антенн с центральной частотой 100 и 150 МГц обеспечивает на данных грунтах зондирование до глубин 10–15 м (рис. 5б–г), а применение антенны с центральной частотой

350 МГц позволило более детально исследовать верхние слои разреза до глубин 2–2.5 м (рис. 5д).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Аэродром. Японский аэродром на о. Матуа и сегодня является уникальным образцом инженерной мысли. Он состоит из двух бетонных взлетно-посадочных полос (ВПП) длиной более 1000 м и шириной 35 м, расположенных на высоте 50–60 м над уровнем моря (рис. 1). Предполагалось, что для обеспечения круглогодичного использования ВПП была оборудована системой подогрева с использованием местной термальной воды, а под ее полотном располагались скрытые помещения (Каменченко, 2011; Камчатско-Курильские ..., 2011). Для проверки данных предположений было проведено профилирование отдельных участков ВПП с использованием антенных систем 100 и 150 МГц. Профили были

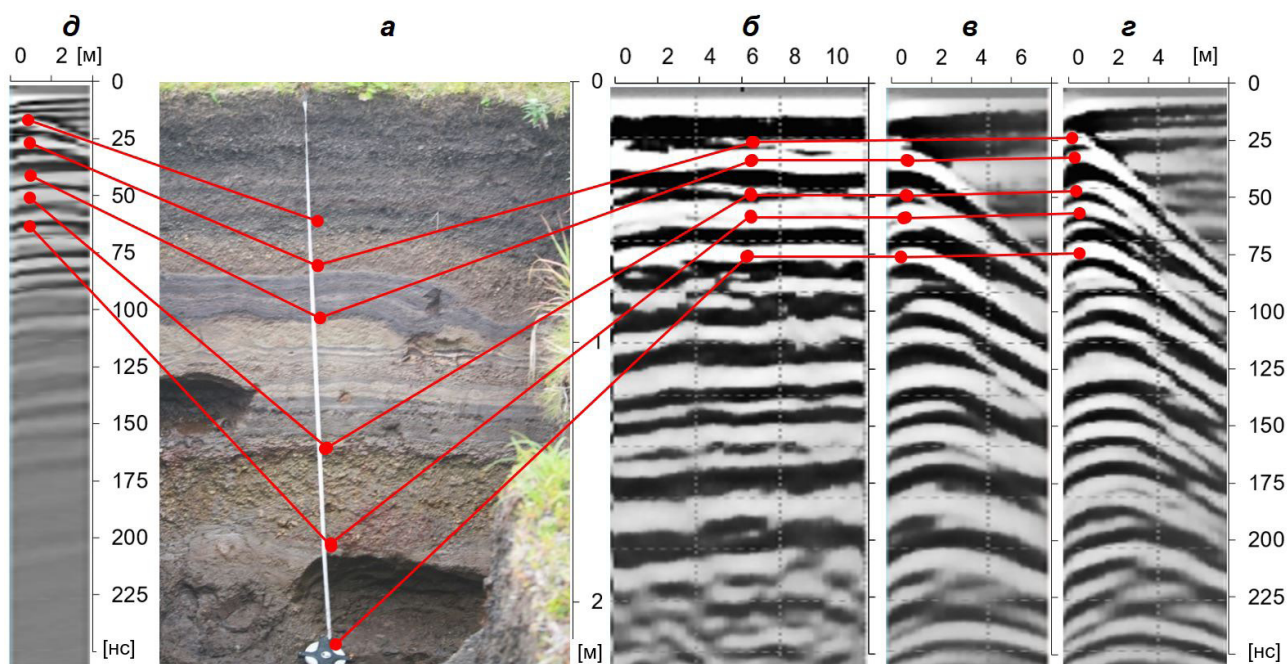


Рис. 5. Геологический разрез, полигон {03}: (а) — шурф, фотография; (б) — элемент георадарного профиля в районе шурфа; (в) — годограф, антенны 100 МГц; (г) — годограф, антенны 150 МГц; (д) — годограф, антенны 350 МГц. Прямыми выносными линиями указано соответствие физических границ раздела слоев геологического разреза осям синфазности георадиолокационного профиля и линиям годографа.

Fig. 5. Geological section, site {03}: (а) — dug hole, photo; (б) — item of GPR cross-section near the dug hole; (в) — CMP data, 100 MHz; (г) — CMP data, 150 MHz; (д) — CMP data, 350 MHz. Direct extension lines point at the correspondence of physical interfaces in geological sections to line-ups on GPR cross-section and CMP hodograph lines.

проложены по полотну аэродромного бетонного покрытия, вдоль и поперек ВПП. Для удобства анализа результатов измерения, георадарный профиль (рис. 6) был расчленен на ряд областей (комплексов) по методике, описанной в работе (Владов и др., 2004). Граница раздела георадарных комплексов на радарограммах была проведена по интенсивным отражающим горизонтам, которые приурочены либо к литологическим границам, либо к границам несогласий. Были выделены следующие георадарные комплексы: (01) — аэродромное покрытие, включающее в себя верхнее бетонное покрытие и нижний слой, искусственное основание мощностью около 100 см; (02) — насыпной грунт для выравнивания естественного рельефа местности вдоль ВПП с характерным рисунком отражений, сформированных за счет неравномерной по мощности поэтапной и послойной засыпки и уплотнения грунта мощностью до 250 см; (03) — область, имеющая характерный волновой рисунок в виде гипербол, сформированная грубообломочным вулканическим материалом, обломками пород и крупными вулканическими бомбами, предположительно отложениями пирокластических вулканических потоков, мощностью не более 200 см; (04) — природный ненарушенный разрез ППЧ. Воспользовавшись данными о скорости распространения ЭМ волн в отдельных слоях

(табл. 2), был проведен перерасчет разреза из масштаба времен в масштаб глубин.

Комплексы (01) и (02) были сформированы в период строительства аэродрома, но характерных радиообразов железобетонных конструкций и пустот в данных комплексах не выявлено. В комплексе отложений естественного происхождения (04) отсутствуют нарушения послойного залегания осадочных пород, которые могли возникнуть при выполнении строительных работ. Характер волновой картины для георадарного комплекса (03) не позволяет выявить локальные нарушения структуры, характерные радиообразы объектов размером более метра отсутствуют. На георадарном профиле наблюдаются локальные неоднородности (05), (06), которые находятся на границе кровли комплекса (04) и подошвы насыпного грунта (03). На радиолокационных профилях не зафиксированы сигналы, которые можно было бы интерпретировать как трубы системы обогрева ВПП.

Следует отметить, что при проведении вулканических исследований не обнаружено выходов термальных вод в окрестностях вулкана, которые могли бы быть использованы для технических целей. Активная фумарольная деятельность сосредоточена только в кратере вулкана Пик Сарычева и на его внутренних стенках (Рыбин и др., 2017).

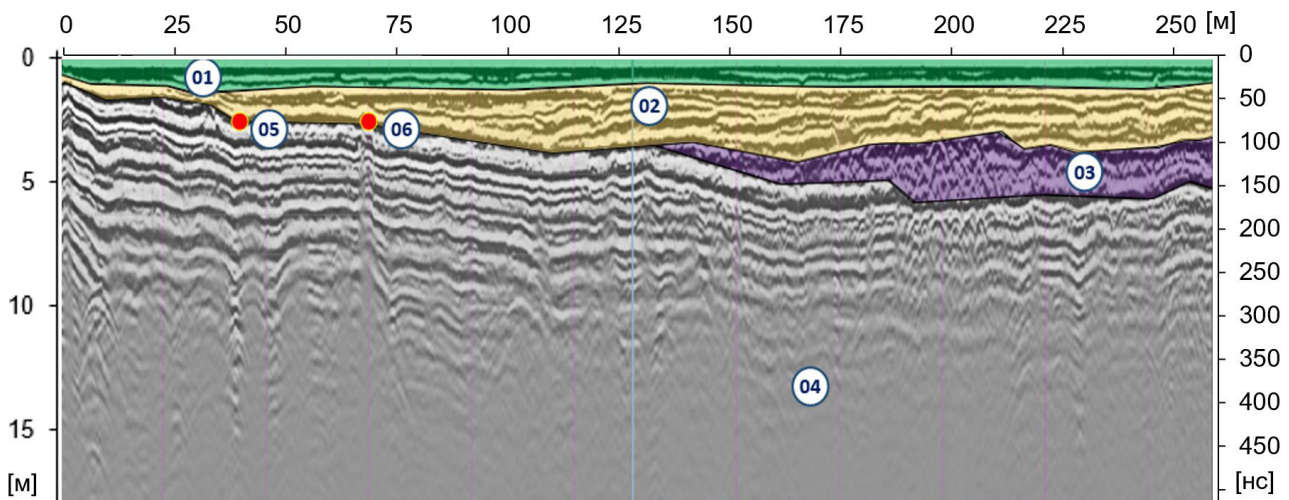


Рис. 6. Георадарный профиль вдоль аэродромного полотна: (01) — комплекс аэродромное покрытие; (02) — комплекс насыпной грунт; (03) — комплекс, состоящий из грубообломочных вулканических шлаков, обломков пород; (04) — комплекс регулярной субгоризонтальной структуры; (05), (06) — локальные объекты.

Fig. 6. GPR cross-section along the runway pavement: (01) — pavement complex; (02) — fill-up ground complex; (03) — complex of coarse-grained fragmental scorias and clasts; (04) — complex of regular subhorizontal structure; (05), (06) — local objects.

Таблица 2. Результаты расчета электрических параметров грунта, полигон {03}.

Table 2. Results of electric soil parameters calculation, site {03}.

Годограф				
№ слоя	V_r , см/нс	V_p , см/нс	D, см	ϵ
1	3.55	3.55	78	17.85
2	3.55	3.5	106	18.37
3	3.29	2.8	148	28.7
4	3.14	2.44	170	37.79
5	3.0	2.58	219	33.8
6	3.82	7.8	336	3.7
7	3.89	3.95	770	14.42

Примечание. V_r — средняя радиолокационная скорость распространения ЭМ волны, рассчитанная по годографу, V_p — радиолокационная скорость в слое, D — глубина залегания границ раздела, ϵ — диэлектрическая проницаемость соответствующего слоя.

Note. V_r — average EM wave radar propagation velocity, calculated with CMP data, V_p — radar propagation velocity in a layer, D — interface depth, ϵ — permittivity of the corresponding layer.

Объект «Артиллерийская позиция». Артиллерийская позиция находится в крайней юго-восточной части острова на м. Орлова (Юрлова). Строение террасы, на которой располагается объект, аналогично строению более высоких террас, сложенных из морской гальки разной степени окатанности с песчаным заполнителем, перекрытых мощным ППЧ, верхняя часть которого представлена радиоконтрастными слоями мощностью до 0.5 м.

Артиллерийская позиция представляет собой сложный комплекс инженерных сооружений, соединенных между собой сетью окопов и траншей. Для локализации подземных сооружений через артиллерийскую позицию и поперек возможных направлений расположения потерн были проложены георадарные профили (рис. 7а).

Анализ волновой картины позволил выделить здесь два георадарных комплекса (01) и (02), (рис. 7б), граница между которыми проведена по линии изменения морфологии осей синфазности и их интенсивности. Георадарный комплекс (01) сформирован из протяженных субгоризонтальных осей синфазности, интенсивность которых вдоль профиля не меняется. Начиная с кровли георадарного комплекса (02), разрез приобретает характерный нерегулярный волновой рисунок отражений, ограниченный зоной (03), в которой, в связи со слабым уровнем сигнала, проведение анализа невозможно.

В георадарном комплексе (02), (рис. 7а), видна ось синфазности напоминающая гиперболу. Это радиообраз потерны с ярко выраженным сводом, от краев которого отходят наклонные оси

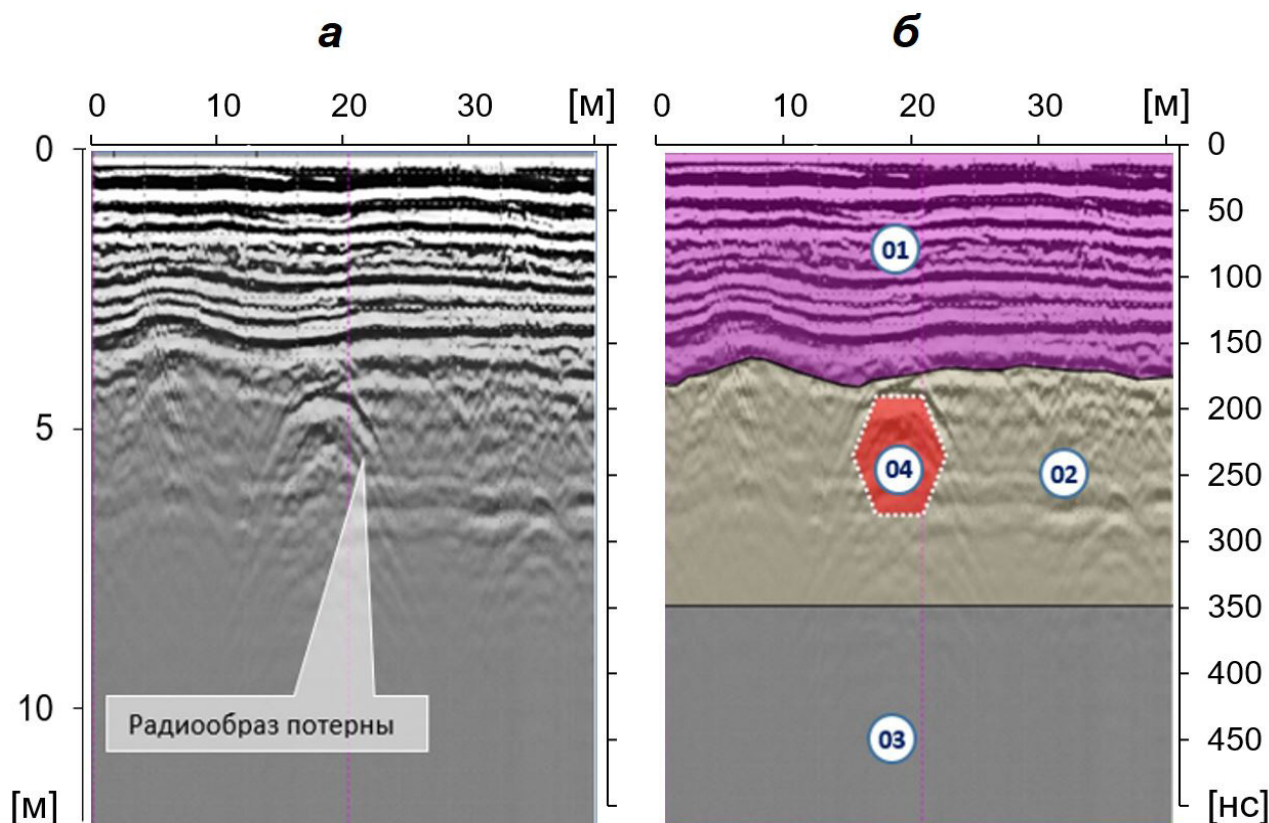


Рис. 7. Артиллерийская позиция. Георадарный профиль: (а) — исходный профиль; (б) — профиль с выделением георадарных комплексов; (01) — комплекс, сформированный из протяженных субгоризонтальных осей синфазности; (02) — комплекс с характерной волновой картиной сигнала; (03) — зона с низким уровнем сигнала; (04) — потерна.

Fig. 7. Gun station. GPR cross-section: (a) — original cross-section; (b) — cross-section with highlighted GPR complexes; (01) — complex formed by extensive subhorizontal line-ups; (02) — complex with specific signal wave pattern; (03) — area with low level of signal; (04) — postern.

синфазности — стенки потерны. Над сводом потерны наблюдается нарушение регулярности и разрывы в осях синфазности, что может соответствовать разрушению вышележащего слоя разреза. С учетом $V_p = 2.6$ см/нс (табл. 1), глубина залегания свода потерны равна 4.7 м, высота потерны не более 2.5 м, ширина не более 1.5 м. Данная потерна является частью системы подземных коммуникаций и располагается в направлении от командного пункта в сторону пулеметных дотов.

Гора Круглая. Гора Круглая (Сопка Круглая) — одна из главных загадок о. Матуа расположена, в 3 км от постройки действующего вулкана Пик Сарычева. Благодаря характерной куполообразной форме, она заметно выделяется в равнинном рельефе юго-восточной части острова (рис. 1). Абсолютная высота г. Круглой составляет 124 м над уровнем моря, относительная — 50–60 м, средняя крутизна склонов — 10–12°. Ее основание имеет форму практически идеального круга диаметром ~400 м.

Поверхность купола практически не обнажена и покрыта зарослями ольхового стланика и травянисто-кустарниковой растительности.

Следов какого-либо значительного эрозионного расчленения не обнаружено. В естественных и искусственных обнажениях вскрываются однородные породы.

Химический состав пород, опробованных на г. Круглой соответствует типичным островодужным андезитам известково-щелочной серии с умеренным содержанием калия ($SiO_2 = 58.68–59.46$, $K_2O = 1.02–1.08$ мас. %). (Дегтерев, 2013). По совокупности геоморфологических и геологических признаков г. Круглую можно отнести к лавово-экструзивному куполу, образовавшемуся в результате выжимания вязкой лавы.

Георадиолокационное профилирование г. Круглой возможно было только по грунтовой дороге — серпантину, ведущему на вершину сопки и на очищенных от ольховника площадках-террасах, размещенных на склонах сопки. Профилирование выполнено антеннами с центральной частотой 50 МГц, длина профиля составила 480 м (рис. 8). По всему профилю верхняя часть георадарного разреза имеет довольно четкую субгоризонтальную стратификацию и по виду близка к данным зондирования на

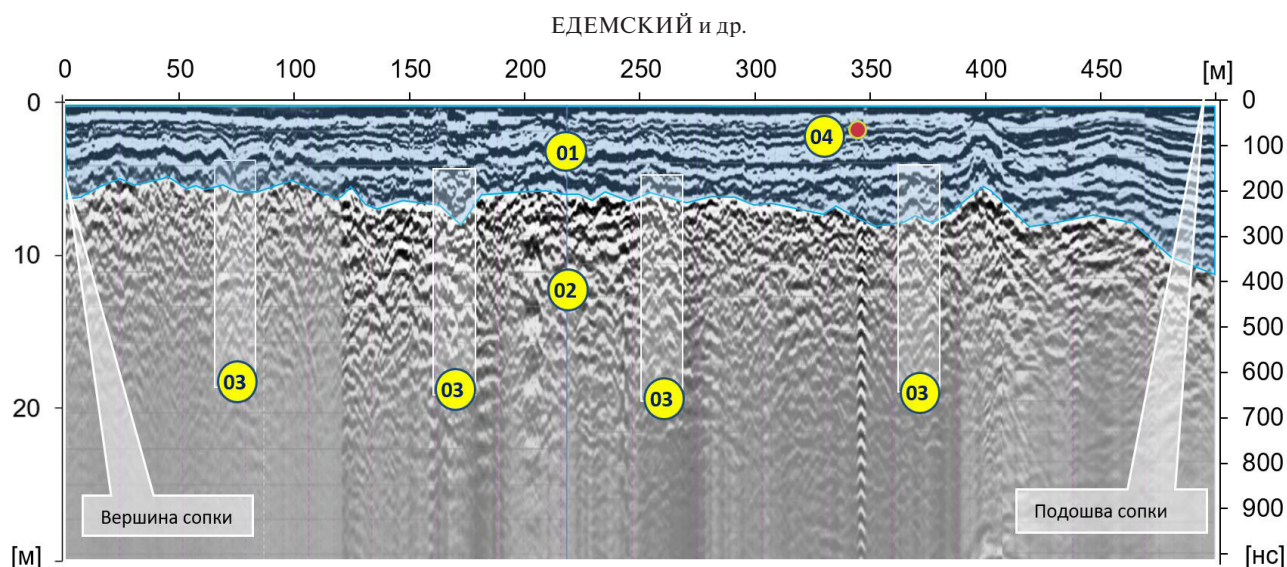


Рис. 8. Гора Круглая. Георадарный профиль: (01) — комплекс регулярной субгоризонтальной структуры, природный ненарушенный разрез ППЧ; (02) — комплекс кровля экструзивного купола г. Круглая; (03) — локальный объект; (04) — локальная аномалия.

Fig. 8. Kruglaya Mountain. GPR cross-section: (01) — complex of regular subhorizontal structure, natural untouched soil-pyroclastic cover section; (02) — complex of the back of Kruglaya's extrusive dome; (03) — local object; (04) — local anomaly.

полигоне {3}, (рис. 5). Анализ волновой картины профиля показал наличие двух ярко выраженных георадарных комплексов (01) и (02), граница между которыми проведена по линии изменения морфологии осей синфазности и их интенсивности. Георадарный комплекс (01) представляет собой природный ненарушенный разрез ППЧ. Мощность данного комплекса вдоль профиля колеблется от 5 м до 12–15 м у подножья сопки. Начиная с кровли георадарного комплекса (02), разрез приобретает характерный нерегулярный волновой рисунок отражений и представляет собой кровлю экструзивного купола с отсутствием регулярной структуры и наличием множественных локальных неоднородностей. В георадарном комплексе (02) можно выделить характерные радиообразы отдельных локальных провалов, а резкое изменение направления осей синфазности может свидетельствовать о наличии зон трещиноватости (03). Подошва данного комплекса не зафиксирована. На георадарном профиле, проложенном от вершины сопки к ее подножью, на глубинах до 20 м значимых нарушений осей синфазности нет, структур, радиообраз которых соответствует подземным инженерным сооружениям не наблюдается.

ВЫВОДЫ

Проведенные на о. Матуа исследования показали, что георадиолокация является эффективным методом обследования ППЧ. Типовой геологический разрез ППЧ о. Матуа представляет собой комплекс отложений сло-

истой структуры, что создает хорошие отражающие поверхности для ЭМ-волн. Однако, как следует из полученных результатов по зондированию методом ОГТ, не все границы раздела слоев геологического разреза являются радиоконтрастными и имеют свой радиоотклик на георадарном разрезе.

Радиолокационная скорость V_p в разрезах меняется от слоя к слою в пределах 2.8–7.8 см/нс, а диэлектрическая проницаемость изменяется в пределах 3.8–40. Наличие шурфов и определение скорости распространения ЭМ волны по годографам в каждом слое (пачке) дало возможность сопоставить геологический и георадарный разрезы, что позволило предположить геологическое строение ППЧ в местах проведения работ по исследованию военно-исторических объектов, представленных чередованием пачек пирокластического материала и палеопочв.

Применение георадаров повышенной мощности с резистивно-нагруженными антеннами (центральная частота 50–350 МГц) показывает их относительно высокую эффективность для исследования подповерхностной среды на глубинах от десятков сантиметров до 30–50 м в непростых для радиозондирования геологических условиях о. Матуа (высокая слоистость и влажность среды).

Авторы выражают признательность анонимным рецензентам, а также В.А. Рашидову за конструктивную критику, способствовавшую улучшению работы. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 18-02-00185 и РГО № 09/2017-Р.

Список литературы

- Арсланов Х.А., Мелекесцев И.В., Разжигаева Н.Г. и др.* Возраст почвенно-пирокластического чехла и хронология вулканической активности на о. Матуа (Центральные Курилы) в голоцене // Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Апатиты. 12–17 сентября 2011. Апатиты, 2011. С. 44–46. [*Arslanov Kh.A., Melekestsev I.V., Razzhigaeva N.G. et al.* The Age of the Soil-Pyroclastic Cover and Chronology of Volcanic Activity on the Matua Island (Central Kuriles) in the Holocene // Materialy VII Vseros. sovesch. po izucheniyu chetvertichnogo perioda. Apatity. September 12–17, 2011. Apatity, 2011. P. 44–46 (in Russian)].
- Андреев В.Н., Шанцер А.Е., Хренов А.П. и др.* Извержение вулкана Пик Сарычева в 1976 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1978. № 55. С. 35–40. [*Andreev V.N., Shantser A.E., Khrenov A.P. et al.* The Eruption of Sarychev Peak Volcano in 1976 // Byulleten' vulkanologicheskikh stantsii. 1978. N. 55. P. 35–40 (in Russian)].
- Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с. [*Vladov M.L., Starovoitov A.V.* Introduction to GPR. Guidebook. M.: Izd-vo MGU, 2004. 153 p. (in Russian)].
- Горшков Г.С.* Вулкан Пик Сарычева // Бюллетень вулканологических станций. 1948. № 15. С. 3–7. [*Gorshkov G.S.* Sarychev Peak Volcano // Byulleten' vulkanologicheskikh stantsii. 1948. № 15. P. 3–7 (in Russian)].
- Горшков Г.С.* Хронология извержений вулканов Курильской гряды // Труды Лаборатории вулканологии. 1954. Т. 106. № 8. С. 58–99. [*Gorshkov G.S.* Chronology of Kuril Ridge Volcanoes Eruptions // Trudy Laboratorii vulkanologii. 1954. V. 106. №. 8. P. 58–99 (in Russian)].
- Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с. [*Gorshkov G.S.* The Volcanism of Kuril Island Arc. M.: Nauka, 1967. 288 p. (in Russian)].
- Гришин С.Ю., Мелекесцев И.В.* Лавовые потоки (извержение 2009 г.) вулкана Пик Сарычева (Центральные Курилы) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 232–239. [*Grishin S.Yu., Melekestsev I.V.* Lava Flows from the 2009 Eruption of Sarychev Peak, the Central Kuriles // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2010. № 1 (15). P. 232–239 (in Russian)].
- Гущенко И.И.* Извержения вулканов мира. М.: Наука, 1979. 473 с. [*Gushchenko I.I.* Volcanic Eruptions of the World. M.: Nauka, 1979. 473 p. (in Russian)].
- Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г.* Исторические извержения вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Центральные Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 102–119. [*Degterev A.V., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G.* Historical Eruptions of Sarychev Peak Volcano, Matua Island, the Kuriles // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2011. № 1. (17). P. 102–119 (in Russian)].
- Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Мелекесцев И.В.* Разжигаева Н.Г. Эксплозивные извержения вулкана Пик Сарычева в голоцене (о. Матуа, Центральные Курилы): геохимия тефры // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 16–26. [*Degterev A.V., Rybin A.V., Melekestsev I.V., Razzhigaeva N.G.* Explosive Eruptions of the Sarychev Peak Volcano in the Holocene on Matua Island, the Central Kuriles: the Tephra Geochemistry // Russian Journal of Pacific Geology. 2012. V. 6. № 6. P. 423–432 <https://doi.org/10.1134/S1819714012060024>].
- Дегтерев А.В.* Пирокластические отложения извержения вулкана Пик Сарычева (о. Матуа) в июне 2009 г. // Вулканология и сейсмология. 2011. № 4. С. 60–68. [*Degterev A.V.* Pyroclastic deposits from Sarychev Peak, Matua Island discharged in June 2009 // Journal of Volcanology and Seismology. 2011 V. 5. № 4. P. 278–285. <https://doi.org/10.1134/S0742046311040026>].
- Дегтерев А.В.* История эруптивной деятельности вулкана Пик Сарычева в голоцене (о. Матуа, Центральные Курильские острова): Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Южно-Сахалинск, 2013. 24 с. [*Degterev A.V.* History of Sarychev Peak volcano eruptive activity in Holocene (Matua island, Central Kuril Islands). Avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk. Yuzhno-Sakhalinsk, 2013. 24 p. (in Russian)].
- Едемский Д.Е., Едемский Ф.Д., Морозов П.А.* Профилирование и определение параметров среды при проведении георадарных обследований // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15. № 9. С. 57–63. [*Edemskiy D.E., Edemskiy F.D., Morozov P.A.* Cross-section Survey and Subsurface Medium Properties Estimation in GPR Surveys // Elektromagnitniye volny i elektronniye sistemy. 2010. V. 15. № 9. P. 57–63 (in Russian)].
- Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С.* Теория и методы георадиолокации. Учеб. пособие. М.: Горная книга, 2008. 196 с. [*Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskii A.S.* Theory and methods of GPR. Guidebook. M.: Gornaya kniga, 2008. 196 p. (in Russian)].
- Каменченко П.* Таинственный остров Матуа (Электронный ресурс) // Сетевое издание «Версия». 2011. [https://versia.ru/yekspediciya-nashej-versii-obsledovala-sekretnye-yaponskie-](https://versia.ru/yekspediciya-nashej-versii-obsledovala-sekretnye-yaponskie)

- bazy-na-kurilax (дата обращения: 8.10.2018) [Kamenchenko P. Mysterious Matua Island (electronic source) // Setevoe izdanie «Versiya». 2011. <https://versia.ru/yekspediciya-nashej-versii-obsledovala-sekretnye-yaponskie-bazy-na-kurilax> (in Russian)].
- Камчатско-Курильские экспедиции (Электронный ресурс) // 2011. <http://foto.kurilstour.ru/index.php> (дата обращения: 8.10.2018) [Kamchatka-Kuril expeditions (Electronic resource) // 2011. <http://foto.kurilstour.ru/index.php> (in Russian)].
- Костенков Н.М., Ознобихин В.И., Шляпников С.А. Почвы. Атлас Курильских островов. М.: Владивосток, ИПЦ ДИК, 2008. С. 254–257. [Kostenkov N.M., Oznobikhin V.I., Shlyapnikov S.A. Soils. Atlas of the Kuril Islands. M., Vladivostok: IPTs DIK, 2008. P. 254–257 (in Russian)].
- Левин Б.В., Мелекесцев И.В., Рыбин А.В. и др. Экспедиция «Вулкан Пик Сарычева — 2010» (Курильские острова) // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 151–158. [Levin B.V., Melekestsev I.V., Rybin A.V. et al. The Expedition «Peak Sarychev Volcano-2010» (The Kurile Island) // Vestnik DVO RAN. 2010. № 6. P. 151–158 (in Russian)].
- Мархинин Е.К. Вулкан Сарычева // Бюллетень вулканологических станций. 1964. № 35. С. 44–58. [Markhinin E.K. Sarychev Volcano // Byulleten' vulkanologicheskikh stantsii. 1964. № 35. P. 44–58 (in Russian)].
- Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. 604 с. [Newest and Modern Volcanism on Russian territory. M.: Nauka, 2005. 604 p. (in Russian)].
- Полонский А.С. Курилы // Краеведческий бюллетень. 1994. № 3. С. 3–86. [Polonskii A.S. Kuril Islands // Kraevedcheskii byulleten'. 1994. № 3. P. 3–86 (in Russian)].
- Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Дудченко И.П. и др. Комплексные исследования на острове Матуа в 2017 году // Геосистемы переходных зон. 2017. № 4. С. 21–29. [Rybin A.V., Degterev A.V., Dudchenko I.P. et al. Comprehensive Research on Matua Island in 2017 // Geosistemy perekhodnykh zon. 2017. № 4. P. 21–29 (in Russian)].
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Арсланов Х.А. и др. Запись палеогеографических событий позднеледникового-голоцена в органогенных отложениях острова Матуа (Центральные Курилы) // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 5. С. 48–64. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-5-48-64>. [Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Arslanov Kh. A. et al. Record of Late Glacial–Holocene Paleogeographical Events in Orogeneic Deposits of Matua Island (Central Kurils) // Russian Journal of Pacific Geology. 2018. V. 12. № 5. P. 384–399. <https://doi.org/10.1134/S181971401805010X>].
- Сноу Г. Записки о Курильских островах // Краеведческий бюллетень. 1992. № 1. С. 89–127. [Snou G. Kuril Islands Proceedings // Kraevedcheskii byulleten'. 1992. № 1. P. 89–127 (in Russian)].
- Шилов В.Н. Извержение вулкана Пик Сарычева в 1960 году // Труды СахНИИ. 1962. Вып. 12. С. 143–149. [Shilov V.N. Eruption of Sarychev Peak Volcano in 1960 // Trudy SakhNII. 1962. V. 12. P. 143–149 (in Russian)].
- Urail M., Ishizuka Y. Advantages and Challenges of Space-borne Remote sensing for Volcanic Explosivity Index (VEI): The 2009 eruption of Sarychev Peak on Matua Island, Kuril Islands, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2011. V. 208. Iss. 3–4. P. 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.07.010>.
- Kopeikin V.V., Edemsky D.E., Garbatsevich V.A. et al. Enhanced Power Ground Penetrating Radars // Proceedings 6th International Conference on Ground Penetrating Radar. Sendai, Japan. 1996. P. 152–154.
- Matoza R., Le Pichon A., Vergoz J. et al. Infrasonic observations of the June 2009 Sarychev Peak eruption, Kuril Islands: Implications for infrasonic monitoring of remote explosive volcanism // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2011. V. 200. Iss. 1–2. P. 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.11.022>.
- Rybin A., Chibisova M., Webley P. et al. Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles // Bulletin of Volcanology. 2011. V. 73. № 4. P. 40–56. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0>.
- Simkin T., Siebert L. Volcanoes of the world: a regional directory, gazetteer, and chronology of volcanism during the last 10,000 years. Tucson, Arizona: Geosciences Press, 1994. 349 p.

ОПЫТ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
**GPR APPLICATION FOR SOIL-PYROCLASTIC COVER SURVEY
OF THE SOUTH-EASTERN ZONE OF MATUA ISLAND, THE KURILE ISLANDS**

D.E. Edemsky¹, A.V. Popov¹, I.V. Prokopovich¹, A.V. Degterev², A.V. Rybin²

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, 108840, Moscow, Troitsk;
e-mail: deedemsky@gmail.com*

²*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk; e-mail: rybin_av@bk.ru*

Matua is a volcanic island located in the central part of the Kurile-Kamchatka island arc. Its greater north-western part is occupied by the edifice of Pik Sarycheva Volcano, which is one of the most active volcanoes in the Kuriles. The south-eastern part of the island is an ancient abrasion-accumulative terrace, which base is formed by weakly dislocated pliocene-eopleistocene volcanic-aqueous complexes overlapped with marine deposits and solid soil-pyroclastic cover. Besides, Matua Island is an area with a unique anthropogene landscape shaped by the Japan army as a result of the construction of elaborated military fortifications in the first half of the 20th century. The paper provides the results of GPR investigation of the soil-pyroclastic cover on Matua Island. The survey included detection of hidden posterns, large-scale cavities and a GPR inspecting of fortifications areas. The results of GPR sounding are compared to geological profile data, which provide records for the explosive activity on the island over the period late Pleistocene to Holocene.

Keywords: GPR survey, soil-pyroclastic cover, Matua Island, objects of military engineering.