

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ФОРТИФИКАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ ОСТРОВА МАТУА, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА

© *Е. А. БИНЮКОВ\**<sup>1</sup>, *Д. Е. ЕДЕМСКИЙ\*\**<sup>2</sup>, *А. Н. ИВАНОВ\*\*\**<sup>3</sup>,  
*Ю. В. ПАДАЛКА\*\*\*\**<sup>4</sup>, *А. В. ПОПОВ\*\**<sup>5</sup>, *И. В. ПРОКОПОВИЧ\*\**<sup>6</sup>

\* Экспедиционный центр Министерства обороны Российской Федерации, Москва

\*\* Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова,  
Троицк, Москва

\*\*\* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

\*\*\*\* Национальный музей героической обороны и освобождения Севастополя

E-mail: <sup>1</sup> [ec.mil@yandex.ru](mailto:ec.mil@yandex.ru)

<sup>2</sup> [deedemsky@gmail.com](mailto:deedemsky@gmail.com)

<sup>3</sup> [a.n.ivanov@mail.ru](mailto:a.n.ivanov@mail.ru)

<sup>4</sup> [padalka2@mail.ru](mailto:padalka2@mail.ru)

<sup>5</sup> [popov@izmiran.ru](mailto:popov@izmiran.ru)

<sup>6</sup> [prokop@izmiran.ru](mailto:prokop@izmiran.ru)

Остров Матуа, сформированный вулканом Пик Сарычева, имеющий в своей основе вулканическое происхождение, является местом со специфическим природно-антропогенным ландшафтом, структура которого значительно изменена фортификационными сооружениями и другими милитаризованными объектами. Аналоги этого ландшафта не описаны в научной литературе, поэтому его, вероятно, следует считать уникальным для России и нуждающимся в детальном и глубоком изучении. В работе приводятся результаты георадиолокационного обследования почвенно-пирокластического чехла юго-восточной части острова Матуа и его полигенетического профиля, а также приведены данные изучения отдельных подземных объектов военной инфраструктуры японского периода колонизации, большая часть которых до настоящего времени остается неизученной. Установлено, что подтверждением наличия таких объектов, возможных нарушений структуры грунта, провалов, антропогенных и природных разрывов являются радиофизические признаки — особенности формы отраженного сигнала, нарушение осей синфазности, многочисленные сдвиги по фазе и наличие кратных переотражений. Разработанные методики и использованные георадары повышенной мощности с комплектом антенн (50—350 МГц) обеспечивают эффективное решение поставленных задач на сложных высокослоистых и влажных грунтах вулканического происхождения.

Ключевые слова: георадар, почвы, фортификационные сооружения, остров Матуа.

**Введение.** Метод георадиолокации получил в последние годы широкое распространение в географических исследованиях. Он основан на излучении сверхширокополосных электромагнитных импульсов и регистрации отраженных сигналов от границ раздела слоев, сред или объектов. Отражение зондирующего сигнала происходит от тех участков среды, в которых наблюдается пространственное изменение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , проводимости  $\sigma$  или обеих величин сразу. Информация о среде зондирования содержится в амплитуде, полярности, форме и времени задержки отраженного сигнала [3, 7]. Сигналы отражения, видимые на радарограммах, показывают границы раздела сред, которые могут соответствовать контактам между сухими и влажнонасыщенными грунтами, между породами различного литологического состава, коренными и рыхлыми породами и т. д.

Радиолокационное подповерхностное зондирование применяется для выявления загрязнения и засоления почв, исследования корневой системы деревьев, при поиске и картировании подземных коммуникаций и трубопроводов, оценки состояния насыпей железнодорожных и автомобильных дорог, в георхеологии и др. [13]. В почвоведении георадары используются для опре-

деления границ почвенных горизонтов и смены гранулометрического состава почв в почвенных профилях [4, 12]. К настоящему времени накоплен большой массив информации об особенностях использования георадаров для различных задач в разных для радиозондирования условиях, выявлены возможности и ограничения этого метода.

Одними из наиболее интересных и сложных регионов при использовании георадаров являются районы активного вулканизма. Большая мощность почвенно-пирокластического чехла, полигенетические профили почв, значительное число погребенных почвенных горизонтов, разделенных прослоями тефры разного гранулометрического состава и возраста, с одной стороны, создают хорошие условия для формирования четких линий равных фаз отраженных сигналов (осей синфазности) на георадиолокационном профиле, а с другой стороны — затрудняют их интерпретацию. Существующий опыт использования георадаров в районах с активными вулканами невелик. На Камчатке показана перспективность применения георадара при изучении сейсмоструктурных деформаций [11]; при изучении торфяника в низовьях р. Авача удалось выявить прослой вулканического пепла [1]. В Калифорнии с помощью георадара были установлены граница и мощность пирокластического чехла, выявлены небольшие кратеры, заполненные сверху аллювием [15]. Тем не менее многие аспекты использования георадаров в вулканических районах остаются недостаточно изученными.

Объектом наших исследований был о. Матуа, расположенный в центральной части Курильской островной дуги. На острове находится молодой и очень активный вулкан Пик Сарычева. С середины XVIII в. вулкан извергался не менее десяти раз, последнее крупное извержение было в 2009 г. В сводном геологическом разрезе зафиксирована полная голоценовая летопись активности островных вулканов Матуа (Пра-Сарычев и современного вулкана Пик Сарычева), содержащая свыше 50 горизонтов тефры. Для почвенно-пирокластического чехла (ППЧ) характерно чередование слоев разной мощности и разного состава — от погребенных почв и тонкого пепла до вулканического гравия и лапилли. Формирование разнородных пачек связано с перерывами вулканической активности острова [5, 6, 9]. Почвы имеют полигенетический профиль: в нижней части 4-метрового разреза в бухте Айну были вскрыты почвы, морфологически близкие к вулканическим охристым почвам Камчатки, в средней части сформированы почвы, морфологически близкие к подбурам. Подбуры в «Атласе Курильских островов» [2] показаны как зонально-островные почвы, однако на о. Матуа сверху они перекрыты маломощными органо-аккумулятивными грубогумусовыми почвами, сформировавшимися за последние 500 лет после активизации вулкана Сарычева.

Другая особенность острова — обилие надземных и подземных объектов военной инфраструктуры японского периода колонизации. Перед Второй мировой войной на острове была создана крупная военная база, численность гарнизона которой в отдельные периоды превышала 7.5 тыс. человек, был построен аэродром и густая сеть фортификационных сооружений. Сформировавшийся таким образом ландшафт, имеющий в основе вулканическое происхождение, но структура которого значительно изменена фортификационными сооружениями и другими милитаризованными объектами, предложено называть беллигеративно — вулканическим [8]. Аналоги этого ландшафта не описаны в научной литературе, поэтому его, вероятно, следует считать уникальным для России и эндемичным для Курильских островов. Насыщенность острова фор-

тификационными и инженерными сооружениями можно оценить по фрагменту схемы обороны острова 1945 г. (рис. 1).

При этом одна из примечательных особенностей военной инфраструктуры — огромное количество подземных японских военных объектов, входы в которые большей частью завалены. В удовлетворительном состоянии находятся только потеры, прорубленные в коренных вулканических породах (хотя высокая трещиноватость приводит иногда и к их обвалам) и бетонные ДОТы.

Цель данной работы — анализ возможностей подповерхностной радиолокации при изучении почвенно-пирокластического чехла и подземных объектов о. Матуа. Решаемые задачи: установление мощности, распределения и особенностей ППЧ на территории острова; обследование районов расположения оборонительных сооружений, обнаружение скрытых потерн и крупномасштабных полостей, оценка их состояния.

**Материалы и методы.** В основу статьи положены результаты полевых исследований, проведенных летом 2017 г. в ходе экспедиции, организованной совместно Русским географическим обществом и Экспедиционным центром Министерства обороны РФ. Были выполнены работы по радиолокационному зондированию на десяти площадках 01—10 (рис. 1). Общий объем обследований составил 3515 м георадарного профиля. Применялся георадар повышенной мощности «Лоза-В» [7] и приемно-передающие антенны с центральной частотой 50, 100, 150 и 350 МГц, что обеспечивало измерения на глубинах от нескольких десятков сантиметров до 30 м. Георадиолокационное зондирование выполнялось отдельными профилями с фиксацией положения в каждой точке съемки (рис. 2), что обеспечивало высокое качество измерений.

Для корректной интерпретации полученных в результате измерений радиолокационных профилей и восстановления по ним геологического разреза на четырех полигонах (А—Г) (рис. 1) в равнинной части острова было проведено зондирование по методу общей глубинной точки (ОГТ) с последовательным увеличением разноса между антеннами по методике, описанной в работах [3, 7]. Соответствующий годограф для полигона А, полученный по методике ОГТ, приведен на рис. 3, в. Данный метод позволяет определить скорость электромагнитных волн в каждом слое георадарного разреза и преобразовать разрез из временного масштаба в масштаб глубин без привлечения априорной информации.

Радиолокационная скорость  $v_p$  (в два раза ниже скорости электромагнитной волны) в отдельных слоях данного разреза меняется от слоя к слою в пределах 2.8—7.8 см/нс, т. е. в разрезе присутствуют как влагонасыщенные, так и относительно сухие слои. Для решения большинства поисковых задач по локализации объектов инженерной инфраструктуры в расчетах была использована усредненная радиолокационная скорость распространения по разрезу, равная  $v_p = 2.6$  см/нс в районах морских террас и  $v_p = 3.9$  см/нс для объектов в районе сопки Круглая.

На рис. 3, а можно выделить: 1 — маломощные органо-аккумулятивные грубогумусовые почвы; 2 — почвы, морфологически близкие к подбурам; 3 — почвы, морфологически близкие к вулканическим охристым почвам Камчатки. Границы раздела данных почв на георадарном профиле (рис. 3, б) создают соответствующий радиолокационный отклик, поскольку они имеют разный состав, текстуру и, вероятно, уровень влажности. Внутри данных структур можно выделить более тонкие слои, которые на георадарном профиле не всегда отображаются в связи с ограничением по разрешающей способности данного

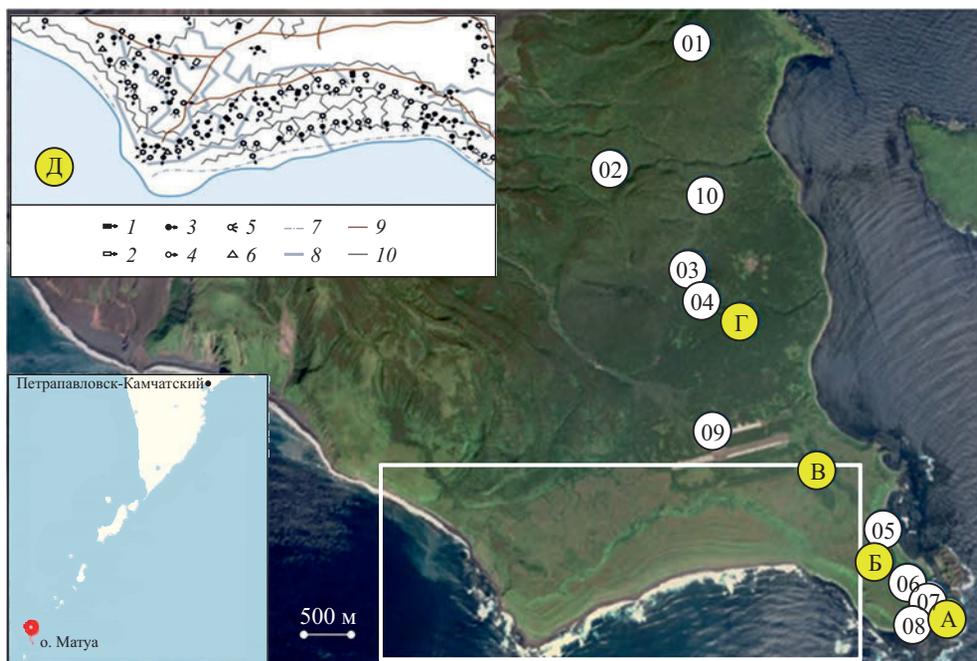


Рис. 1. Остров Магуа. Полигоны георадиолокационного обследования: А—Г — зондирование по методике ОГТ; 01—10 — площадки для георадарного обследования; Д — фрагмент «Схемы обороны и инженерного оборудования острова Мацуво-то», 1945 г. [14].

1 — артиллерийский ДОТ, 2 — артиллерийский ДЗОТ, 3 — пулеметный ДОТ, 4 — пулеметный ДЗОТ, 5 — снайперская ячейка, 6 — командный пункт, 7 — проволочный забор, 8 — противотанковый ров, 9 — дороги, 10 — траншеи.

Fig. 1. Matua island. Areas of GPR surveys. А—Г — CMP survey; 01—10 — locations for GPR survey; Д — fragment of «Defense and engineering equipment schemes of Matsuvo-to island», 1945 y. [14].



Рис. 2. Георадарное зондирование с антеннами 100 и 50 МГц.

Fig. 2. GPR survey with 100 and 50 MHz antennas.

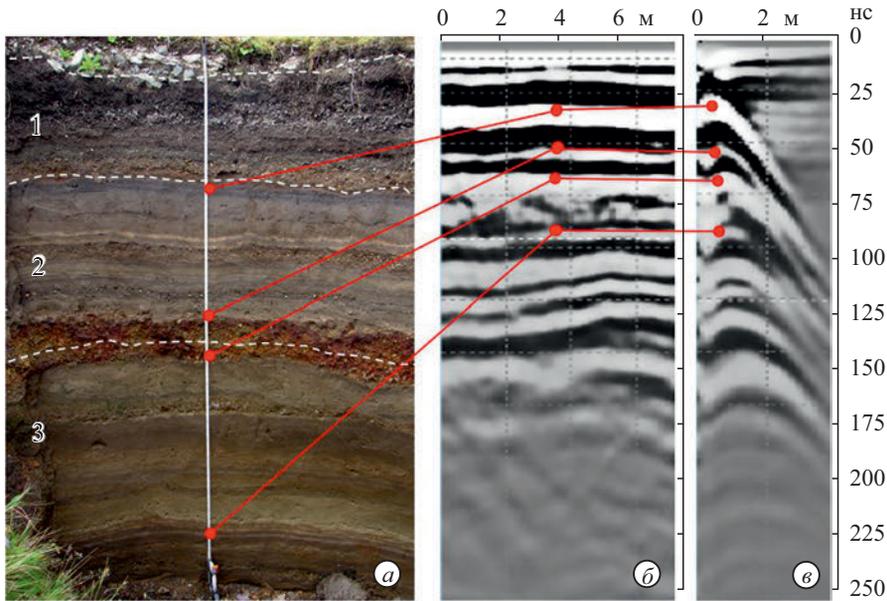


Рис. 3. Геологический разрез, полигон В (см. рис. 1): *a* — шурф (фотография); *б* — фрагмент георадарного профиля; *в* — годограф, зондирование по методу ОГТ.

Fig. 3. Geological cross-section, field site B (ref. Fig. 1): *a* — prospect shaft (photo); *б* — fragment of GPR cross-section; *в* — CMP plot.

метода или отсутствием радиоконтрастных границ между слоями. Характерный георадарный рисунок почвы 3 свидетельствует о ее неоднородной структуре или об особенностях его формирования. Разрывы в отдельных осях синфазности на георадарном профиле могут быть вызваны нарушениями однородности слоев при формировании или под воздействием внешних факторов.

При обработке и интерпретации полученных данных основное внимание уделялось выделению слоев, их границ и приведению радарограммы к истинному масштабу глубин с учетом скорости распространения сигнала в среде. Слои георадарного разреза выделялись с помощью процедуры разграничения максимумов и минимумов сигнала, выделения осей синфазности сигнала и их анализа [3].

Подтверждением наличия подземных объектов, нарушений структуры грунта, антропогенных и природных разрывов являются радиофизические признаки сигнала. Локализация подповерхностных объектов проводилась на основании анализа наличия характерных радиообразов на георадарном профиле, сформированном при перемещении георадара над объектом.

**Результаты и их обсуждение.** Аэродром — полигон 09. Японский аэродром на острове Матуа и сегодня является образцом инженерной мысли. Он состоит из двух взлетно-посадочных полос (ВПП) длиной более 1000 м и шириной 35 м. Одна полоса ориентирована с востока на запад — по направлению преобладающих ветров, другая под углом 145° к первой. Строительство аэродрома было начато японцами в конце 1930-х гг., а к августу 1943 г. работы были завершены. Предполагалось, что под ВПП располагаются бункеры,

скрытые помещения для хранения оружия и укрытия личного состава, а сама ВПП располагает системой подогрева местной термальной водой [10].

Для проверки данных предположений было проведено обследование ВПП с использованием антенных систем 100 и 150 МГц. Профили проложены по полотну аэродромного бетонного покрытия вдоль и поперек ВПП, а также на отдельных примыкающих площадках для размещения ангаров.

При анализе результатов измерения георадарный профиль был расчленен на ряд областей (комплексов) [3], сложенных последовательностью генетически взаимосвязанных слоев. Граница раздела комплексов проложена по интенсивным отражающим горизонтам, которые, в основном, соответствуют либо литологическим границам, либо границам несогласий. На рис. 4 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 с характерным радарным рисунком отражений, сформированный за счет неравномерной засыпки и уплотнения грунта мощностью от 0 до 250 см; 03 — область, имеющая характерный волновой рисунок в виде гипербол, сформированная грубообломочным вулканическим материалом мощностью не более 300 см; 04 — природный ненарушенный разрез ППЧ.

Следует отметить, что крупнообломочные неокатанные и слабоокатанные отложения, аналогичные георадарному комплексу 03, были встречены в шурфах на глубине 4 м. Их можно отнести к пролювиально-селевым отложениям, аналогичным материалу в русле и на конусах выноса селевых долин [9]. После извержения вулкана Пик Сарычева в 2009 г. большой лахар практически достиг взлетно-посадочной полосы бывшего японского аэродрома, пройдя около 750 м от устья долины. Таким образом, наши данные подтверждают ранее высказанное предположение [9], что большая часть морских террас, включая аэродром, продолжает быть потенциально селеопасной зоной.

Характерных радиообразов железобетонных конструкций, пустот в толще георадарных комплексов 01, 02, 03 не зафиксировано. Комплекс 04 имеет довольно четкую субгоризонтальную стратификацию, в нем отсутствуют нарушения послойного залегания осадочных пород, которые должны быть в случае проведения строительных работ. Локальные объекты 05 и 06, размером менее 1 м, находящиеся на границе кровли комплекса 04 и подошвы комплекса 03 и формирующие на радарограмме характерный квазипериодический сигнал, связаны со строительством аэродрома.

На радиолокационных профилях не зафиксированы сигналы, которые можно было бы интерпретировать как трубы системы обогрева ВПП. Следует отметить, что при проведении вулканологических работ также нигде не было обнаружено выходов термальных вод в окрестностях вулкана, которые могли бы быть использованы для технических целей [6].

Структура ППЧ в районе аэродрома носит регулярный характер, имеет мощность 7—8 м и субгоризонтальную стратификацию. ППЧ частично разрушен или погребен под насыпными грунтами при строительстве ВПП. Верхняя часть ППЧ в отдельных местах перекрыта пролювиально-селевыми выносами (03 на рис. 4).

Объект «Артиллерийская позиция» — полигон 07 (рис. 5). Артиллерийская позиция представляет собой сложный комплекс инженерных сооружений, включающий в себя два артиллерийских ДОТа (ДА1—2) с помещениями для хранения снарядов, два пулеметных ДЗОТа (ДП1—2), размещенных

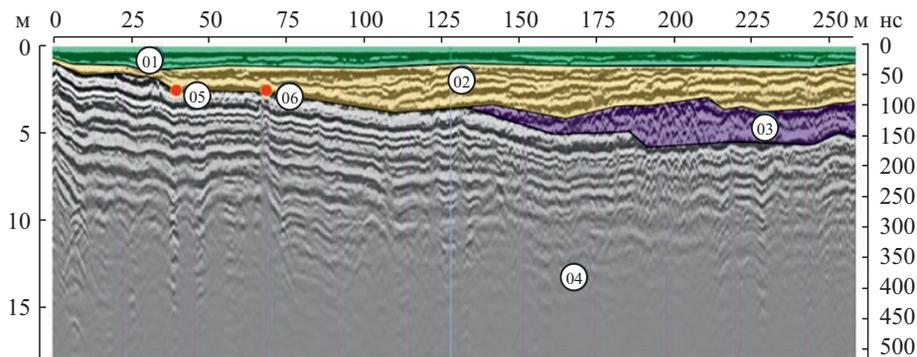


Рис. 4. Георадарный профиль взлетно-посадочной полосы.

Fig. 4. GPR cross-section of air strip.

на склоне обрыва и командный пункт (КП) (рис. 5, *a*). Все эти сооружения соединены между собой сетью окопов и траншей, в каждой из которых предусмотрены по два независимых входа. На рис. 5, *b* приведен фрагмент георадарного профиля по трассе 01 (рис. 5, *a*). Вблизи отметки 20 м сформирована ось синфазности, по форме напоминающая гиперболу. Это радиобраз потерны с ярко выраженным сводом, от краев которого отходят наклонные оси синфазности — стенки потерны. Над сводом потерны наблюдается нарушение регулярности и разрывы в осях синфазности субгоризонтальной структуры ППЧ, по-видимому связанное с разрушением вышележащего слоя разреза (свода потерны).

Учитывая оценку скорости  $v_p$  для полигона А, потерна располагается на глубине 4.7 м, высота потерны не превышает 3 м при ширине до 1.5 м. Отдельные участки потерны (у КП) были взорваны, а местами произошло обрушение кровли, что видно на рис. 5, *a*.

На георадарных профилях 02, 03, 04, 06 выявлены нарушения в виде разрывов и резких изменений в осях синфазности, а также появления плавных

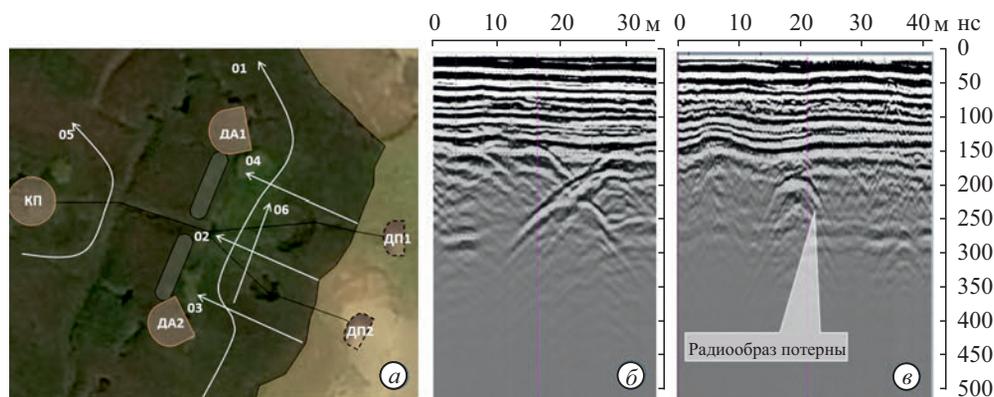


Рис. 5. Артиллерийская позиция: *a* — космоснимок со схемой профилей; *b* — профиль 06 с разрушенной потерней; *в* — фрагмент профиля 01 с потерней. Остальные пояснения в тексте.

Fig. 5. Gun station: *a* — space photo with scheme of cross-sections; *b* — cross-section 06 with a ruined postern; *в* — fragment of cross-section 01 with a postern. Other explanations in text.

прогибов, деформаций субгоризонтальных слоев разреза. Более сложный для интерпретации георадарный профиль 06 приведен на рис. 5, б. Практически никаких нарушений в верхней части георадарного разреза нет, но есть серьезные изменения в подошве данного комплекса и существенные изменения в нижней части разреза, которые можно интерпретировать как частичный обвал свода потерны. Восстановить геологический разрез по георадарному профилю в данной сложной ситуации помогает численное моделирование [16].

Результаты георадарного обследования показали, что большая часть подземных коммуникаций разрушена, а на сохранившейся части коммуникаций фиксируются нарушения в верхних слоях свода потерн.

Мощность ППЧ в районе мыса Юрлова составляет 4—4.5 м, он характеризуется довольно регулярной субгоризонтальной структурой. Почвы имеют характерный полигенетический профиль (органо-аккумулятивные, подбуры, вулканические охристые), который на радарограммах достоверно фиксируется.

Сопка Круглая — полигоны 03, 04, рис. 1. Сопка Круглая — одна из главных загадок Матуа. Она имеет правильную характерную куполообразную форму и своими очертаниями заметно выделяется в равнинном рельефе южной части острова. Абсолютная высота сопки составляет 124 м, относительная 50—60 м, средняя крутизна склонов ~30—35°. Поверхность купола практически не обнажена и почти полностью покрыта зарослями ольхового стланика и травянисто-кустарниковой растительностью. Почти идеальная округлая форма сопки служит предметом споров о ее происхождении. Существует версия об антропогенном генезисе этого объекта и о том, что в сопке может быть подземный город в 45 этажей, построенный японцами по образцу укрепрайона на горе Сурибати на острове Иводзима [10].

Георадарное зондирование сопки возможно только по грунтовой дороге — серпантину, ведущему на вершину сопки, а также на отдельных террасах, расположенных на склонах сопки. Длина георадарного профиля сопки Круглая, выполненного антеннами с центральной частотой 50 МГц, составила 480 м. Верхняя часть георадарного разреза имеет довольно четкую субгоризонтальную стратификацию и ближе к вершине близка к разрезу полигона А (см. рис. 3). На вершине сопки мощность ППЧ не менее 5—6 м, в нижней части профиля мощность комплекса увеличивается до 12—15 м. Начиная с подошвы ППЧ, георадарный разрез приобретает характерный нерегулярный волновой рисунок отражений и представляет собой кровлю экструзивного купола с отсутствием регулярной структуры и наличием множественных локальных неоднородностей, среди которых можно выделить характерные радиообразы локальных провалов и зон трещиноватости. Значимых нарушений осей синфазности в верхней части разреза не выявлено, на глубинах до 20 м не зафиксировано сигналов, которые можно было бы интерпретировать как бункеры, скрытые помещения или иные объекты искусственного происхождения.

На склонах сопки Круглая расположен ряд террас, ширина которых 7—10 м, длина от 20 до 50 м. По георадарному профилю (рис. 6, а), расположенному поперек террасы на западном склоне сопки, видно, что терраса создана искусственно, путем среза части склона (нарушение структуры ППЧ) под основание будущей постройки. На рис. 6, б приведен георадарный профиль террасы. На краях площадки (рис. 6, а), по линиям синфазности в виде гипербол можно локализовать основания стен здания (02). На террасе был

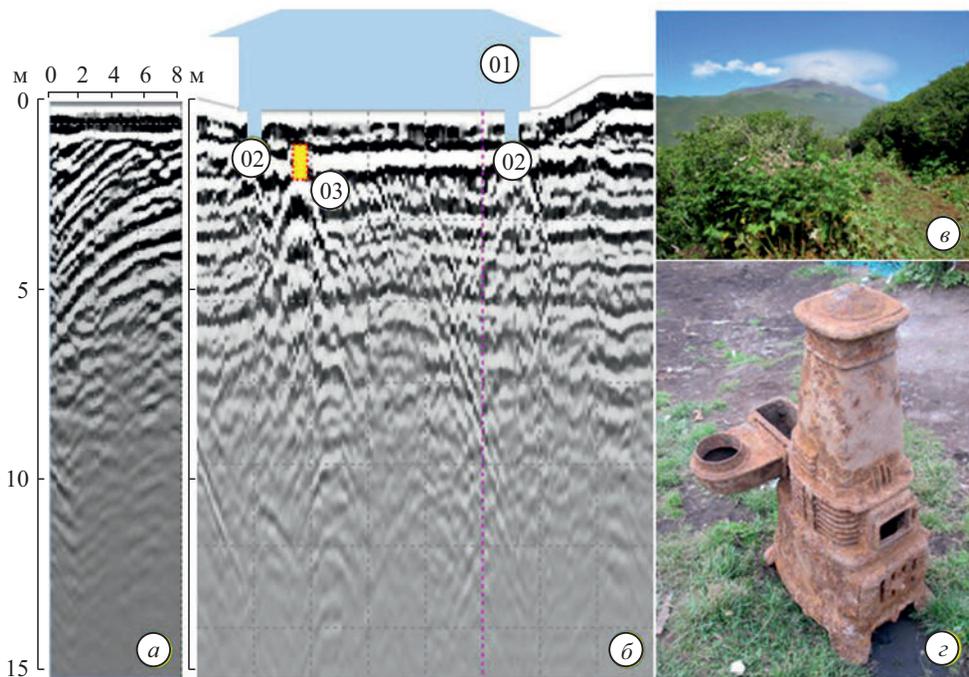


Рис. 6. Терраса на сопке Круглая: *а* — георадарный профиль поперек террасы; *б* — георадарный профиль вдоль террасы (01 — модельная реконструкция здания, 02 — основание стен здания, 03 — радиообраз чугунной печи); *в* — фотография террасы; *з* — фотография чугунной печи.

Fig. 6. Terrace on the Sopka Kruglaya: *a* — GPR cross-section across the terrace; *б* — cross-section along the terrace (01 — model reconstruction of the building, 02 — bases of the building walls, 03 — radioimage of cast iron oven); *в* — photo of terrace; *з* — photo of cast iron oven.

обнаружен локальный объект (03): по интенсивности сигнала и периоду повторения это металлический предмет с размерами не менее 0.5 м. В результате раскопок обнаружена японская чугунная печь для отопления помещения (рис. 6, *з*).

Аналогичные площадки с характерными размерами фиксировались и на других террасах сопки и отдельных полигонах (05, 08, 10, рис. 1).

Долговременные огневые точки (ДОТ): результаты обследований (полигоны 01, 02, 06, рис. 1). Обследование ДОТов выполнялось с целью обнаружения скрытых объектов/полостей, в которых могли бы находиться боеприпасы, вооружение или военное снаряжение. Данные объекты могли располагаться внутри ДОТа или в непосредственной близости от него, например в защитных стенках, прикрывающих вход от взрывной волны.

На рис. 7, *а* приведен георадарный профиль бетонного пулеметного ДОТа (полигон 06, рис. 1), построенного в горизонтально-слоистой среде. На георадарном профиле можно выделить две зоны (01 и 02), которые отличаются друг от друга характером рисунка отражений и наличием разрыва осей синфазности на границе двух зон. Зона 01 сформирована железобетонным куполом бункера (03), зона 02 представляет радиообраз типичного субгоризонтального разреза. Сигналы в зоне 01 содержат низкочастотную (НЧ) составляющую

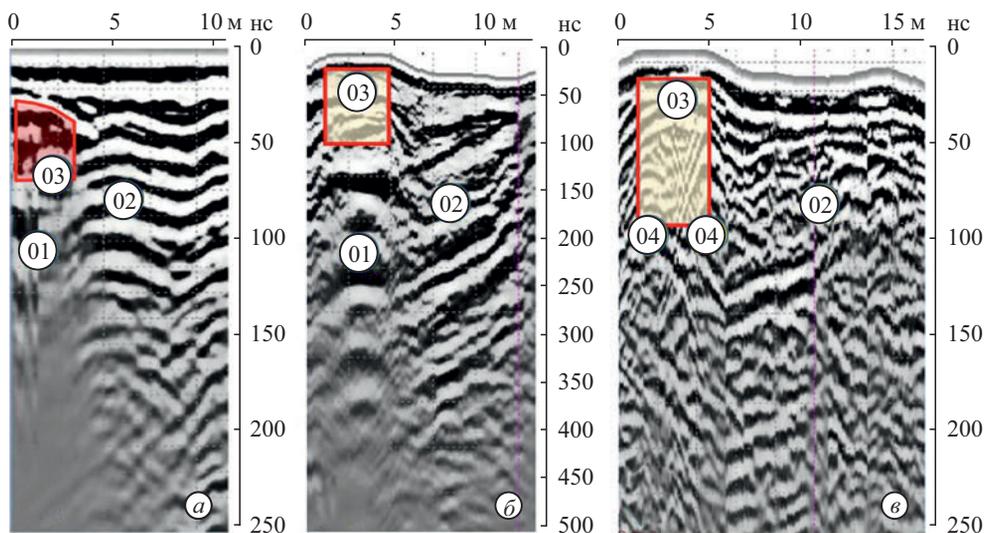


Рис. 7. ДОТы: *а* — пулеметный ДОТ; *б*, *в* — артиллерийский ДОТ; 01 — зона с НЧ сигналом; 02 — зона с типовым разрезом; 03 — ДОТ; 04 — вертикальные стенки объекта. Пояснения в тексте.

Fig. 7. Pillboxes: *a* — machine gun pillbox; *б*, *в* — artillery bunkers; 01 — area with low frequency signal; 02 — area with standard section; 03 — pillbox; 04 — object walls. Explanation in text.

щую с периодом  $\sim 37$  нс, которая определяется геометрическими размерами и глубиной залегания объекта.

Большое значение при обследовании таких объектов, как ДОТ или ДЗОТ, имеет выбор антенн. На рис. 7, *б*, *в* приведены профили, проложенные через артиллерийский ДОТ (полигон 02), антеннами 50 и 100 МГц соответственно. На профиле (рис. 7, *б*) можно выделить две зоны (01 и 02) с характерными рисунками сигналов, где зона 01 соответствует части профиля, проложенного над ДОТом 03. Временная диаграмма сигнала в данной зоне содержит характерный НЧ сигнал с периодом  $\sim 50$  нс, в котором практически полностью отсутствует высокочастотная составляющая. В зоне 02 профиля наблюдается характерный наклонный субпараллельный геологический разрез, который соответствует углу наклона склона сопки, у основания которой расположен ДОТ. В основании ДОТ имеет шестигранную форму с размерами  $6 \times 6$  м, высота потолка в центральной части ДОТа составляет 2.3—2.5 м.

Применение более высокочастотных антенн (100 МГц) приводит к повышению детализации радиообраза ДОТа, но ухудшению «узнаваемости» объекта (рис. 7, *в*). Границы ДОТа хорошо фиксируются сигналами от вертикальных стенок объекта в виде повторяющихся гипербол (04). Металлическая арматура, входящая в качестве усилительных элементов бетонного перекрытия, дает на радарограмме характерные тонкие наклонные линии. Толщина бетонного перекрытия ДОТа порядка 70—80 см, толщина грунта над бетонным перекрытием 40—50 см.

Из приведенных результатов видно, что бетонные и железобетонные объекты типа ДОТ достаточно надежно фиксируются при субпараллельной стра-

**Мощность ППЧ по результатам георадарных измерений**  
**Thickness of pyroclastic deposits according to results of GPR survey**

№ площадки	Мощность ППЧ, м	Центральная частота зондирования, МГц	Число трасс	Географическая привязка
01	>1	50, 100	4	Район мыса Клов
02	>10	50, 150	9	Окаймление древней кальдеры вулкана
03	5—12	50, 150	8	Склон сопки Круглая
04	~5	50, 150	7	Западный склон сопки Круглая
05	6—7	50, 100	11	Восточное побережье, позиция зенитных орудий
06	4—4.5	50, 100, 150, 350	19	Артиллерийская позиция
07	3.5—6	100, 150	18	Мыс Юрлова, восточная часть
08	4—4.5	50, 100	10	Мыс Юрлова, западная часть
09	7—8	100, 150	11	Аэродром
10	2—10	100	6	У основания сопки Плоская

тификации ППЧ. На радарограммах данные объекты сопровождаются характерными признаками: НЧ сигнал, период которого характеризует размер объекта; понижение уровня сигнала на временах задержки больших, чем глубина залегания объекта; нарушение осей синфазности на границах объекта; формирование оси синфазности подобной гиперболе от кровли объекта; формирование повторяющихся гипербола, сформированных вертикальными стенками объекта.

По результатам георадарного обследования ДОТов и защитных стенок в непосредственной близости от него скрытых объектов/полостей не обнаружено. В районе ДОТов наблюдаются нарушения ППЧ, однако эти нарушения имеют локальный характер. Вдали от побережья, ближе к вулкану инженерные сооружения возводились или в склонах сопки, или у их подножья. На склонах сопки ППЧ слабо структурирован и его мощность зависит от крутизны склона и близости к вулкану.

В таблице систематизированы данные о результатах измерений ППЧ георадаром с различной центральной частотой зондирования в разных районах острова.

**Заключение.** Метод георадиолокации позволил достаточно четко отделить почвенно-пирокластический чехол от коренных пород. Средняя мощность ППЧ, перекрывающего морские террасы высокого уровня, составила 5—7 м со значительными вариациями, максимальная мощность — около 12 м — была обнаружена в нижней части склона сопки Круглая. В разрезах, имеющих субгоризонтальную стратификацию, использование георадара позволяет также выделить на радарограммах разные генетические типы почв, однако отдельные почвенные горизонты внутри них не всегда могут быть идентифицированы из-за отсутствия радиоконтрастных границ или из-за технических ограничений — разрешающей способности метода.

Применение георадарной технологии вполне осуществимо для локализации местоположения погребенных объектов и предметов в непростых для

радиозондирования геологических условиях о. Матуа (высокое затухание радиосигнала из-за высокой влажности и большого количества субгоризонтальных контрастных слоев, частично отражающих радиосигнал). Подтверждением наличия объектов, возможных нарушений структуры грунта, провалов, антропогенных и природных разрывов являются радиофизические признаки — особенности формы сигнала, нарушение осей синфазности, многочисленные сдвиги по фазе сигнала и наличие кратных переотражений сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00185.

### Список литературы

- [1] *Абкадыров И. Ф., Букатов Ю. Ю.* Первый опыт применения георадара «Око» на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2004. № 4. С. 125—129.
- [2] Атлас Курильских островов. М.; Владивосток: ИПЦ Дик, 2009. 516 с.
- [3] *Владов М. Л., Старовойтов А. В.* Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
- [4] *Воронин А. Я.* Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара «ЛОЗА-В» // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2015. Вып. 80. С. 106—126.
- [5] *Ганзей К. С., Разжигаева Н. Г., Рыбин А. В.* Изменение ландшафтной структуры о. Матуа во второй половине XX—начале XXI в. (Курильский архипелаг) // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 87—93.
- [6] *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.
- [7] *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.
- [8] *Иванов А. Н.* Особенности ландшафтной структуры острова Матуа (Центральные Курилы) // Известия Русского Географического общества. 2017. Т. 149. Вып. 5. С. 26—35.
- [9] *Иванов А. Н., Беляев Ю. Р., Дегтерев А. В., Луговой Н. Н., Рыбин А. В., Хисматуллин Т. И.* Опасные природные процессы на острове Матуа (Центральные Курилы) // Геориск. 2017. № 4. С. 20—28.
- [10] Камчатско-Курильские экспедиции (Электронный ресурс) // 2011. <http://foto.kurilstour.ru/index.php>
- [11] *Пинегина Т. К., Кожурин А. И.* Опыт применения георадара при изучении сейсмотектонических деформаций на Камчатке // Доклады научного симпозиума «Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири», 1—4 июня 2010, г. Хабаровск. С. 226—230.
- [12] *Пягай Э. Т., Белобров В. П., Молчанов Э. Н., Сео Мунг Чул, Сон Йон Кум.* Использование георадара в почвенных исследованиях // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2009. Вып. 64. С. 34—40.
- [13] *Сысуев В. В.* Георадарные исследования полимасштабных структур в ландшафтах на примере Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 4. С. 26—33.
- [14] Схема обороны и инженерного оборудования острова Мацуво-то (Электронный ресурс) // <https://pamyat-naroda.ru/documents/>

- [15] *Cagnoli B., Russell J. K.* Imaging the subsurface stratigraphy in the Ubehebe hydro-volcanic field (Death Valley, California) using ground penetrating radar // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2000. No 96. P. 45—56.
- [16] *Prokopovich I., Edemsky D., Popov A., Morozov P.* GPR Survey of Fortification Objects on Matua Island // *Proc. 17h International Conference on Ground Penetrating Radar, Rapperswil, Switzerland, June 18—21, 2018*. P. 394—398.

## Application of GPR sounding at the examination of fortification objects on Matua Island, Kuril Islands

© *E. A. Binyukov*<sup>\*, 1</sup>, *D. E. Edemskiy*<sup>\*\* , 2</sup>, *A. N. Ivanov*<sup>\*\*\*, 3</sup>, *Yu. V. Padalka*<sup>\*\*\*\*, 4</sup>,  
*A. V. Popov*<sup>\*\* , 5</sup>, *I. V. Prokopovich*<sup>\*\* , 6</sup>

\* Expedition Center of the Russian Defense Ministry, Moscow

\*\* Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,  
Troitsk, Moscow

\*\*\* Moscow Lomonosov State University

\*\*\*\* The Defense of Sevastopol Museum

E-mail: <sup>1</sup> ec.mil@yandex.ru

<sup>2</sup> deedemsky@gmail.com

<sup>3</sup> a.n.ivanov@mail.ru

<sup>4</sup> padalka2@mail.ru

<sup>5</sup> popov@izmiran.ru

<sup>6</sup> prokop@izmiran.ru

Matua Island is of volcanic origin and was formed by Sarychev Peak volcano. The island is a place of a specific anthropogenic landscape. Its structure was substantially changed by fortification constructions and other military objects. Analogues of such a landscape weren't described in scientific literature, thus, perhaps, it may be considered unique for Russia and it merits more detailed and indepth review. Results of ground penetration radar (GPR) survey of soil-pyroclastic cover of the island's southeastern part are presented, which include also an investigation of certain subsurface military objects, the greater part of which is unexplored. It's established that existence of objects, various soil disturbances, downwrappings, anthropogenic or natural faults can be located by some radiophysical indicators — details of the reflected pulse, disturbance of pulse lineups, numerous phase shifts and repeated rereflections. It is shown that elaborated methods and increased power GPR with 50—250 MHz antennas to be applied can effectively solve these tasks on complex multilayer and moist volcanic soils.

Key words: ground penetration radar (GPR), fortification objects, Matua island.

## References

- [1] *Abkadyrov I. F., Bukatov Yu. Yu.* Perviy opyt primeneniya georadara «Oko» na Kamchatke // *Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle*. 2004. No 4. P. 125—129.
- [2] Atlas Kurilkyh ostrovov. M.; Vladivostok: IPC Dik, 2009. 516 p.
- [3] *Vladov M. L., Starovoytov A. V.* Vvedenie v georadiolokaciyu. Uchebnoe posobie. M.: Izd-vo MGU, 2004. 153 p.
- [4] *Voronin A. Ya.* Kriterii identifikacii stroeniya i funkcionalnykh svoystv pochvennogo profilya v georadiolokacionnykh issledovaniyakh s ispolzovaniem georadara «LOZA-V» // *Bulleten Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*. 2015. No 80. P. 106—126.
- [5] *Ganzev K. S., Razzhigaeva N. G., Rybin A. B.* Izmenenie landshaftnoy struktury o. Matua vo vtoroy polovine XX—nachale XXI v. (Kurilskiy archipelag) // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2010. No 3. P. 87—93.

- [6] *Degterev A. B., Rybin A. B., Melekeshev I. V., Razzhigaeva N. G.* Eksplozivnye izverzheniya vulkana Pik Sarycheva v golocene (o. Matua, Centralnye Kurily): geohimiya tefry // *Tihookeanskaya geologiya*. 2012. V. 31. No 6. P. 16—26.
- [7] *Edemskiy D. E., Edemskiy F. D., Morozov P. A.* Profilirovanie i opredelenie parametrov sredy pri provedenii georadarnykh obsledovaniy // *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2010. V. 15. No 9. P. 57—63.
- [8] *Ivanov A. N.* Osobennosti landshaftnoy struktury ostrova Matua (Centralnye Kurily) // *Izv. RGO*. 2017. Vyp. 149. No 5. P. 25—36.
- [9] *Ivanov A. N., Belyaev Yu. R., Degterev A. V., Lugovoy N. N., Rybin A. V., Khismatullin T. I.* Opasnye prirodnye processy na ostrove Matua (Centralnye Kurily) // *Georisk*, 2017. No 4. P. 20—28.
- [10] Kamchatka-Kuril expeditions (Electronic resource) // 2011. <http://foto.kurilstour.ru/index.php>
- [11] *Pinegina T. K., Kozhurin A. I.* Opyt primeneniya georadara pri izuchenii seysmotektonicheskikh deformatsiy na Kamchatke // *Doklady nauchnogo simposiuma «Problemy seysmichnosti i sovremennoy geodinamiki Dalnego Vostoka i Vostochnoy Sibiri»*, 1—4 June, 2010, t. Khabarovsk, pp. 226—230.
- [12] *Pyagay E. T., Belobrov V. P., Molchanov E. N., Seo Mung Chul, Son Yon Kui.* Ispolzovanie georadara v pochvennykh issledovaniyakh // *Bulleten Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*. 2009. V. 64. P. 34—40.
- [13] *Sysuev V. V.* Georadarnye issledovaniya polimashtabnykh struktur v landshaftakh na primere Smolensko-Moskovskoy vozvyshenosti // *Vestn. Moskovsk. un-ta*. 2014. V. 5. No 4. P. 26—33.
- [14] Skhema oborony i inzhenernogo oborudovaniya ostrova Macuvo-to (Elektronniy resurs) // <https://pamyat-naroda.ru/documents/>
- [15] *Cagnoli B., Russell J. K.* Imaging the subsurface stratigraphy in the Ubehebe hydrovolcanic field (Death Valley, California) using ground penetrating radar // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2000. No 96. P. 45—56.
- [16] *Prokopovich I., Edemsky D., Popov A., Morozov P.* GPR Survey of Fortification Objects on Matua Island // *Proc. 17h International Conference on Ground Penetrating Radar, Rapperswil, Switzerland*. June 18—21, 2018. P. 394—398.

Поступила в редакцию 25.01.2019 г.

После доработки 18.02.2019 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.