

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ МНОГОКАНАЛЬНОГО 3D-ГЕОРАДАРА \*

В. Н. Марчук<sup>1</sup>, В. М. Смирнов<sup>1</sup>, О. В. Юшкова<sup>1</sup>, О. А. Бышевский-Конопко<sup>1</sup>,  
А. С. Бажанов<sup>2</sup>, В. Г. Бездудный<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, <sup>2</sup> ФГУП СКБ ИРЭ РАН,  
<sup>3</sup> Донское Археологическое общество

Получена 28 декабря 2012 г.

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы трехмерной обработки радиолокационных данных при подповерхностной радиолокации. Приведен универсальный алгоритм обработки данных 3D-георадаров. Представлены результаты обработки радиолокационных данных многоканального радара «ДАО-3D» (МАРС-300/4), полученных при его испытаниях на полигонах и археологических памятниках Юга России.

**Ключевые слова:** подповерхностная радиолокация, многоканальные георадары, обработка радиолокационных данных, построение трехмерных изображений.

**Abstract:** Problems of three-dimensional processing of radar data are considered at a subsurface radar-location. The universal algorithm of data processing of 3D - georadar is given. Results of radar data processing of a multichannel radar of "DAO-3D" (MARS-300/4) obtained at its tests on ranges and archaeological objects of the South of Russia are presented.

**Keywords:** subsurface radar-location, multichannel ground penetrating radar, processing of radar data, creation of three-dimensional images.

### Введение

В настоящее время научные и инженерно-технические достижения позволяют создавать георадары нового типа: многоканальные

---

\* Материал докладывался на 6-й Всероссийской конференции "Радиолокация и радиосвязь".

широкозахватные системы. Производительность таких устройств увеличивается пропорционально количеству каналов. Кроме того, в таких устройствах появляется возможность использования новых алгоритмов, учитывающих распространение радиоволны поперек движения радара, за счет чего можно добиться существенного улучшения разрешающей способности после дополнительной обработки полученных данных.

Многоканальные георадары показали хорошие результаты при использовании в строительстве, в службах коммунального хозяйства, в археологии, то есть там, где требуется тщательное исследование глубинного строения грунта перед проведением раскопок и прочих земляных работ (Рис.1)[1-6].



3-D Radar a Curtiss Write  
company, Norway  
<http://www.3d-radar.com>



Multi-channel ground  
penetrating radar, USA  
<http://www.UIT-Systems.com>



MALÅ Imaging Radar Array  
(MIRA) (Sweden)  
<http://www.malags.com>

Рис.1. Зарубежные многоканальные 3D-георадары.

### Алгоритм обработки радиолокационных данных многоканальных георадаров

В Институте радиотехники и электроники им. ак. В. А. Котельникова РАН разрабатываются программы и алгоритмы для обработки радиолокационных данных многоканальных георадаров [7, 8]. Эти программы применялись для обработки данных многоканального георадара «МАРС300-4», разрабатываемого для Донского археологического общества. Радар состоит из двух частей: 4-канальной (рис.2) и 6-канальной антенных систем, что в сумме

дает 10 каналов. Центральная частота излучаемого сверхширокополосного (СШП) сигнала составляет 300 МГц. Модуль из 4-каналов прошел предварительные испытания на полигонах и археологических памятниках Юга России (рис.3), которые показали удовлетворительные результаты. Испытания 10-канальной системы планируются в ближайшее время.

Программа обработки GeoRad3d-Pro разработана на основе комплекса программ для двухканального георадара Герад-2. Для обработки 3-мерных изображений она была модернизирована и дополнена подпрограммами отображения результатов трехмерной обработки в изометрической проекции (3d куба) и плоскостных разрезов. Этот пакет программ после соответствующей доработки может быть использован для обработки данных других многоканальных георадаров, в том числе и для космических применений.



Рис.2. Внешний вид радара «DAO-3d» («МАРС-300/4»).



Рис.3. Процесс георадарного исследования археологического памятника - могильника "Левоподкумский" в Малокарачаевском районе КЧР.

Для отработки новых идей при отладке алгоритма сбора и обработки трехмерного массива георадарных данных использовался разработанный в СКБ ИРЭ РАН на основе микросхемы норвежкой фирмы Новельда лабораторный образец одноканального радара КБОР (рис.4).



Рис.4. Лабораторный образец одноканального высокочастотного георадара.

Основные проблемы, которые требуется решить при разработке многоканального георадара:

- 1) калибровка и настройка каналов для формирования одинаковых сигналов по форме, амплитуде и фазе;
- 2) устранение влияния соседних антенн на качество излучаемого сигнала путем подбора их оптимального взаимного расположения и экранирования их поглощающим материалом;
- 3) теоретически-экспериментальное обоснование оптимального зазора между антенной системой и исследуемым грунтом;
- 4) минимизация весовых характеристик прибора;
- 5) повышение точности позиционирования антенной системы в процессе проведения экспериментов.

Для устранения этих проблем предложен следующий универсальный алгоритм:

- 1) выравнивание амплитуд и фаз сигналов по всем каналам;
- 2) устранение аппаратной функции (взаимовлияния антенн и усилительного тракта);
- 3) вычисление среднестатистического сигнала и удаление его из всех выборок сигнала;
- 4) подбор оптимального усиления сигнала;
- 5) предварительная фильтрация сигнала в частотной области, для устранения паразитных частот и помех;
- 6) трехмерная процедура миграции данных (синтезирование апертуры антенной системы с учетом скорости распространения радиосигнала в исследуемой среде);
- 7) выбор оптимального фильтра, выполнение согласованной фильтрации;
- 8) отображение результатов обработки в виде изометрических изображений, стратиграфических и планиметрических разрезов на заданных глубинах.

### **Результаты трехмерной обработки данных 3D-георадара**

Результаты трехмерной обработки результатов, полученных при испытаниях МногоАнтенной Радарной Системы (МАРС-300/4) приведены ниже. На рис.5 показано основное окно программы обработки, в котором осуществляется выбор алгоритма обработки данных 3D-георадара и настройка параметров процедур обработки: слева показана радарограмма, справа набор процедур обработки, между ними – осциллограмма принятого сигнала. Под радарограммой приведена шкала пройденного пути, справа от радарограммы – расчётная глубина расположения зондируемых объектов (глубина рассчитана по времени запаздывания сигнала в предположении, что диэлектрическая проницаемость равна 10).

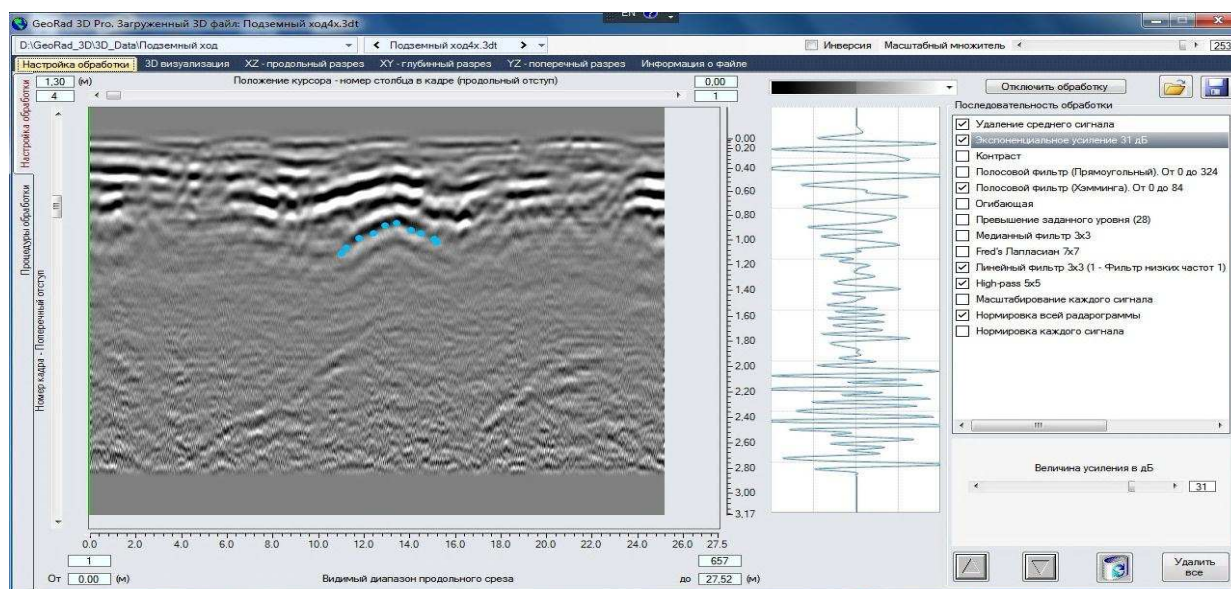
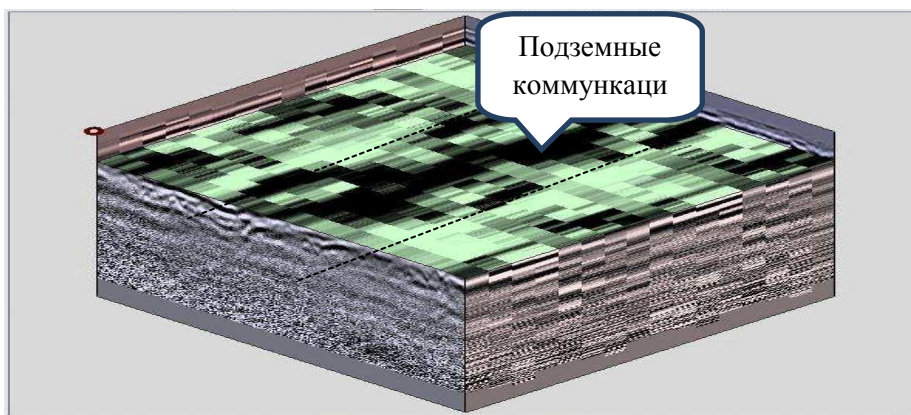
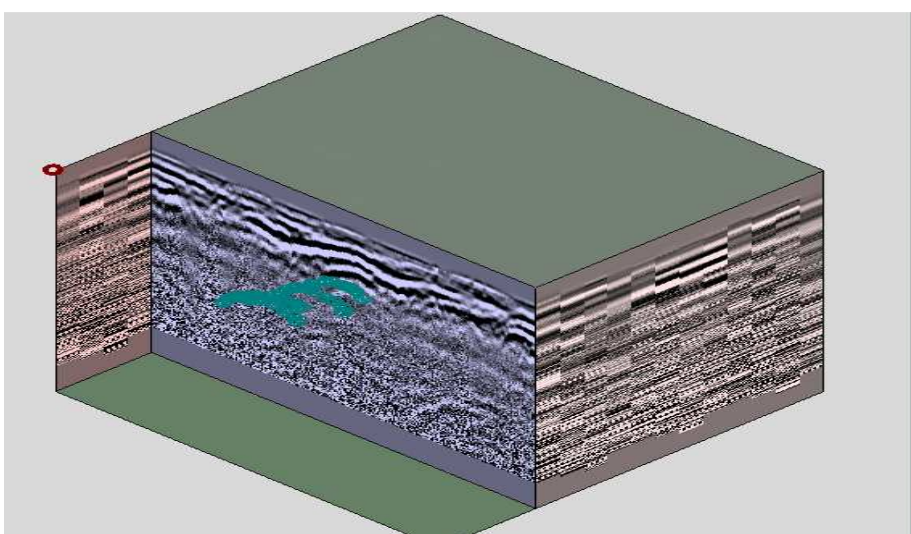


Рис.5. Настройка алгоритма обработки данных 3D-георадара: слева радарограмма, справа набор процедур обработки, между ними – осциллограмма принятого сигнала.

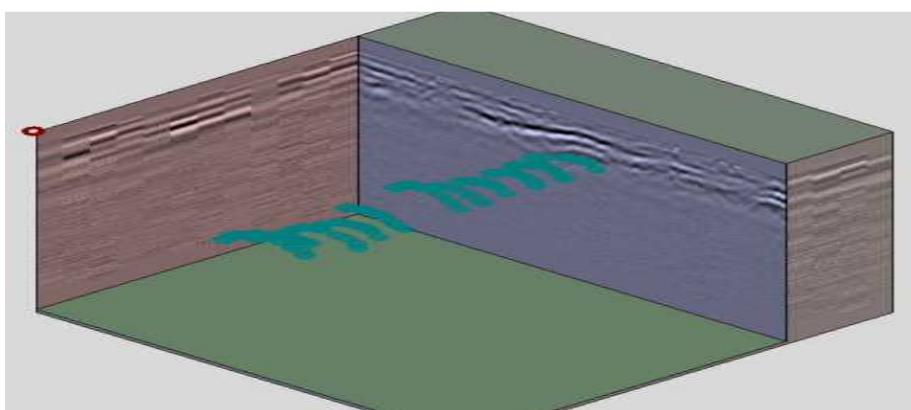
На рис.6 показано 3D-изображение обработанных данных в изометрической проекции. В данном случае исследовалась возможность обнаружения подземных коммуникаций (коллектор): его проекция на глубинный разрез хорошо видна на рис.6 в виде протяженной узкой области черного цвета (рис.6.а).



а)



б)



в)

Рис.6. 3D-изображение обработанных данных подземного коллектора в изометрической проекции: а) планиметрический разрез верхней кромки; б) процесс выделения маркерами верхней части свода коллектора на стратиграфическом разрезе; в) результат выделения маркерами свода коллектора.

Из-за неоднородности грунта над коллектором результат получился не очень наглядным, хотя на каждом отдельном вертикальном (стратиграфическом) разрезе верхняя кромка свода коллектора визуально определялась с высокой степенью достоверности, поэтому была проведена маркировка вручную обнаруженного свода на каждом разрезе (рис.6.б), (маркерами синего цвета) в результате чего удалось однозначно определить направление и пространственное расположение коллектора (рис.6.в).

Далее приведены результаты георадарного исследования могильника "Левоподкумский" в Малокарачаевском районе КЧР. Часть памятника уже исследована археологическим Кисловодским отрядом Института Археологии РАН. При раскопках были обнаружены Аланские катакомбные погребения, некоторые с подквадратным ровиком и ожидалось наличие аналогичных комплексов поблизости. Исследовался участок размером 80x80 м. Временные затраты – 6 часов рабочего времени. Поверхность памятника – бывшая пашня, в данный момент используется под выпас скота. Если и существовали остатки насыпей и других археологических объектов на поверхности, то они уничтожены интенсивной вспашкой в XX в. На рис.7 приведен результат двумерной обработки георадарных данных. На глубинах от 0,4 до 0,8 м наблюдается граница между плодородным слоем почвы и так называемым материковым слоем (суглинки, глина). Особенно хорошо эта граница видна в правой части рис.7, где наблюдается понижение материкового слоя. Вполне возможно, георадар зафиксировал засыпанную осадочным материалом древнюю промоину. На рис.8 показан приповерхностный планиметрический разрез (на проекции гео-куба) участка могильника с четким контуром старой полевой дороги, не читаемой с поверхности. Ниже, на глубинах порядка 1 м,



видны отражения от погребенных объектов, однако более информативным в данном случае является результат анализа послойных планов на глубинах 0,73м; 0,99м; 1,09м, соответственно (рис.9.1-9.3) и трехмерного разреза (геокуба) (рис.10). По итогу георадарных исследований могильника можно констатировать, что на участке исследования наблюдается несколько подквадратных ровиков и отдельных аномалий, маркирующих катакомбы, по центру ровиков. Через весь участок проходят скальные трещины и заполненные осадочным материалом промоины.

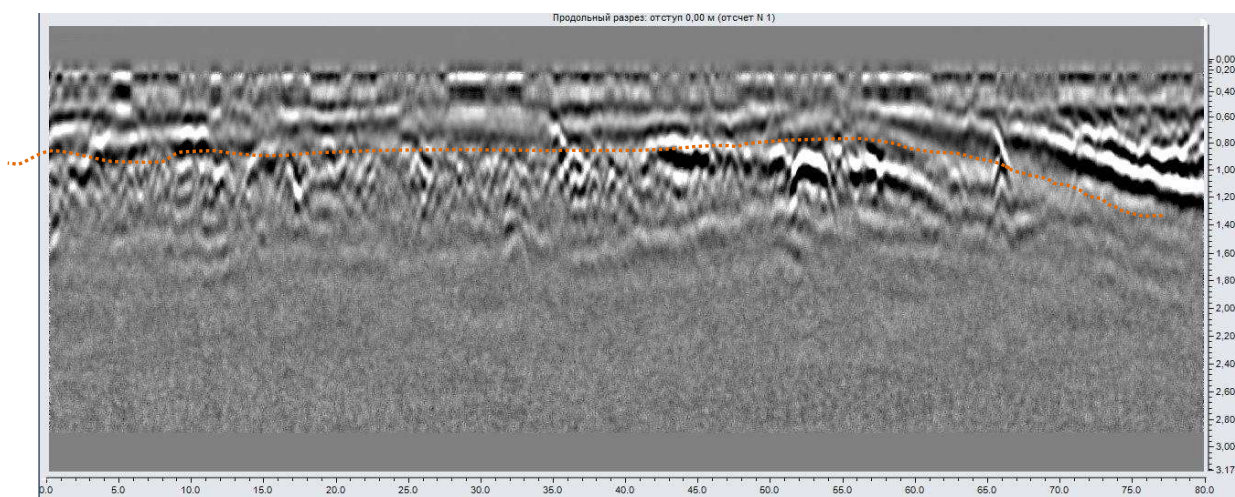


Рис.7. Радарограмма георадарного профиля 80 м на могильнике "Левоподкумский" в Малокарачаевском районе КЧР (результат двумерной обработки георадарных данных): оранжевой линией показана граница между плодородным и материковым слоями.

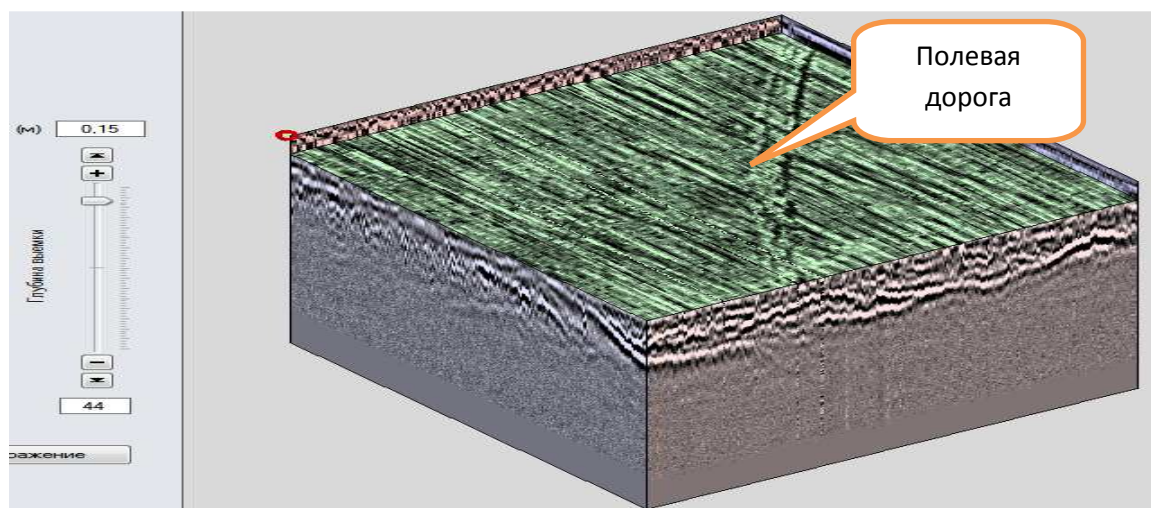
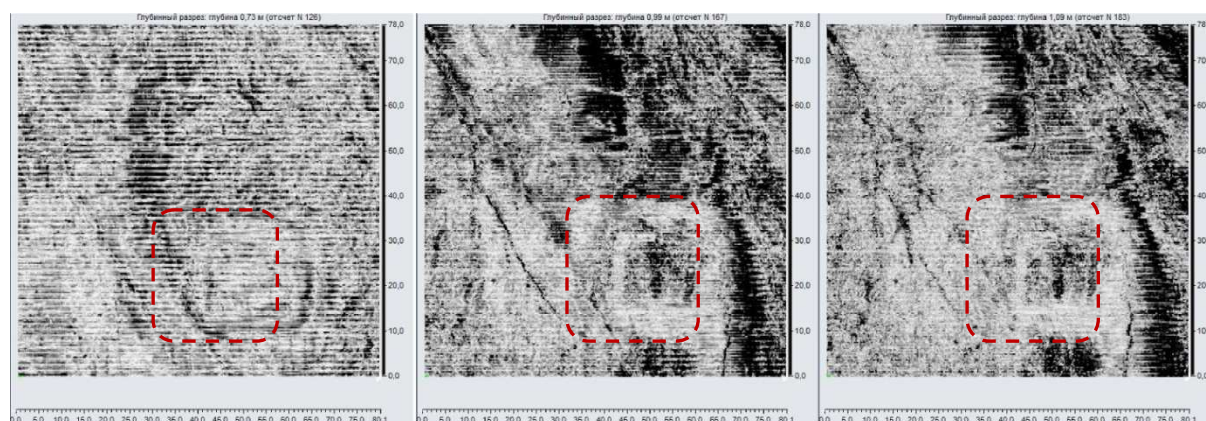


Рис.8. Приповерхностный планиметрический разрез (Гео-куб), на котором видна старая полевая дорога. Могильник "Левоподкумский" в Малокарачаевском районе. КЧР.



9.1

9.2

9.3

Рис.9.(1-3) Планиграфические разрез (послойные планы) на глубинах 0,73 м; 0,99 м; 1,09 м, соответственно, участка георадарного исследования 80x80м. Могильник "Левоподкумский" в Малокарачаевском районе. КЧР. Красным пунктиром обозначены выявленные ровики вокруг катакомбных погребений.

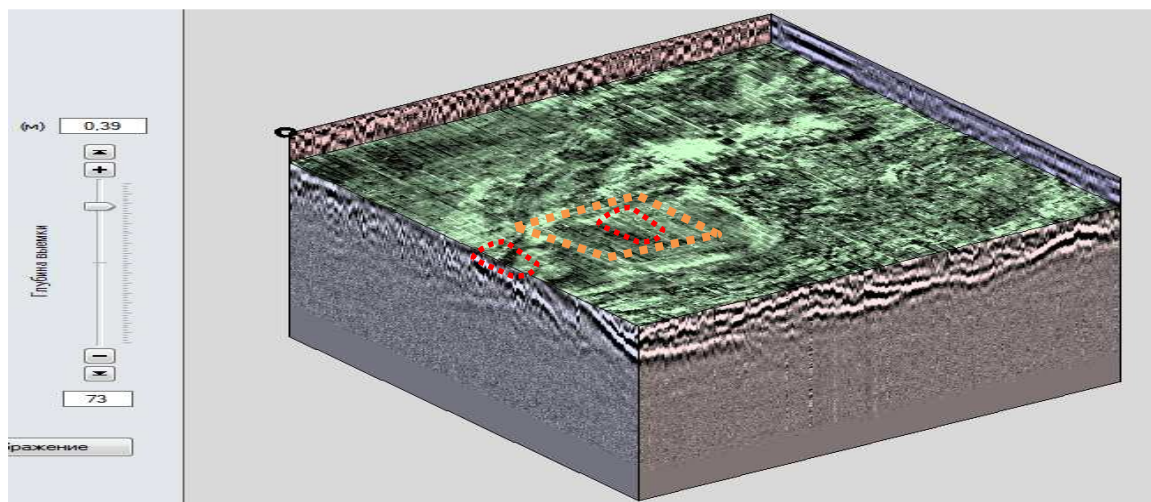


Рис.10. Планиметрический разрез (Гео-куб), участка георадарного исследования 80x80м. Красным и оранжевым пунктиром обозначены выявленные ровики вокруг катакомбных погребений. Могильник "Левоподкумский" в Малокарачаевском районе. КЧР.

**Выводы:** рассмотренный алгоритм сбора и обработки радиолокационных данных 3D-георадаров подповерхностного зондирования позволяет существенно улучшить качество и увеличить объем получаемой информации о скрытых подповерхностных объектах при археологических и прочих исследованиях, проводимых до начала раскопок. Применение многоканальных георадаров позволяет значительно (почти на порядок) увеличить производительность работ по подповерхностному зондированию, что предопределяет их широкое распространение в будущем.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы» и программы ОФН РАН «Радиоэлектронные методы в исследованиях природной среды и человека», а так же при участии РРОО «Донское Археологического Общества» и Кисловодского археологического отряда Института Археологии РАН.

## Литература

1. Linford N., Linford P., Martin L. and Payne A. Stepped frequency ground-penetrating radar survey with a multi-element array antenna: Results from field application on archaeological sites. *Archaeological Prospection*, 17, 2010, pp.187–198.
2. Dean Goodman, Alexandre Novo, Geostudi Astier, Gianfranco Morelli, Geostudi AstierSalvatore Piro, Doria Kutrubes, Henrique Lorenzo. *Advances in GPR imaging with multi-channel radar systems from engineering to archaeology // SAGEEP 2011 Charleston, South Carolina USA.*
3. Immo Trinks, Jaana Gustafsson, Jesper Emilsson, Christer Gustafsson, Bernth Johansson et Johan Nissen. Efficient, large-scale archaeological prospection using a true 3D GPR array system // *ArcheoSciences*, suppl. 33, 2009, pp. 367-370.
4. U.Wollschlager, H. Gerhards, Q. Yu, and K. Roth. Multi-channel ground-penetrating radar to explore spatial variations in thaw depth and moisture content in the active layer of a permafrost site // *The Cryosphere*, 4, 2010, pp.269–283, [www.the-cryosphere.net/4/269/2010/](http://www.the-cryosphere.net/4/269/2010/)
5. Marshall Bradley, Thomas Witten, Robert McCummins, Mike Crowe, Scott Stewart, Mike Duncan. Mine detection with a multi-channel stepped-frequency ground penetrating radar // Part of the SPIE Conference on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IV • Orlando, Florida • April 1999, SPIE, Vol. 371, pp.953-960.
6. Ralf Birken, Douglas E. Miller, Maclyn Burns, Paul Albats, Robert Casadonte, Ross Deming, Tony Derubeis, Thorkild Hansen and Michael Oristaglio. Efficient large-scale underground utility mapping in new york city using a multi-channel ground-penetrating imaging radar system // *Proc. SPIE Vol. 4758*, 2002.
7. Marchuk V.N., Bazhanov A.S., Shtern D.Ya., et.al. The Two-Channel Georadar “Gerad-2” / 32nd Microsymp. on Comparative Planetology: abst. int. conf. - Moscow, October 9-11, 2000. - p. 171.

8. Марчук В.Н. Алгоритм обработки данных комплексной радиоакустической системы для подповерхностного обнаружения локальных объектов. //4-я Междунар. научно-практ.конф. «Георадар-2004». Тезисы доклада, Москва, МГУ, 29 марта -2 апреля, 2004, с.47.