

РУБРИКА: ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА

Обзор приповерхностных электроразведочных технологий, используемых при решении задач археологии и точного земледелия

Е. В. Балков (ИНГГ СО РАН)

Настоящее исследование носит обзорный характер, преследуя цель освещения темы технологического геофизического обеспечения, используемого при решении задач археологии и точного земледелия, и ограничивается контактными и бесконтактными электроразведочными методиками.

Ключевые слова: археогеофизика, агрогеофизика, метод сопротивлений, электромагнитное профилирование.

A review of near-surface electrical exploration technologies used in archaeology and precision agriculture

E. V. Balkov (IPGG SB RAS)

This study is of a review nature, pursuing the goal of highlighting the technological geophysical support used in archeology and precision agriculture, and is limited to contact and non-contact electrical exploration methods.

Keywords: archaeogeophysics, agrogeophysics, resistance method, electromagnetic profiling.

Введение

Геофизические методы исследования, позволяющие дистанционно определять физические и структурные свойства грунта, находят широкое применение в самых различных областях и нацелены на различные глубины. Это может быть, например, поиск и разведка полезных ископаемых на глубинах в несколько километров или же картирование приповерхностного дренажа загрязняющих веществ на глубинах в первые метры. Настоящее исследование посвящено двум направлениям, которые выделились в последние десятилетия и активно развиваются в настоящее время: архео- и агрогеофизике.

Первые работы в археологическом направлении методами сопротивлений и магнитометрии проведены в середине XX века [1, 2]. С тех пор методический и аппаратный арсенал геофизических подходов значительно расширился и усовершенствовался [3, 4]. Широко применяются методы электроразведки (электропрофилирование, электротомография, электромагнитное профилирование и зондирование), магниторазведки (магнитометрия и капаметрия), георадиолокации и даже сейсморазведки. При этом метод магнитометрии стал одним из ведущих в археологии [5]. Кроме того, бурное развитие беспилотных воздушных средств привело к их активному внедрению и в археологии [6].

Столь же широкий набор малоглубинных геофизических методов сегодня используется и в сельском хозяйстве: среди них методы электроразведки, георадиолокации и реже методы магнито- и сейсмометрии [7]. В последние десятилетия с активным развитием точного земледелия наибольшее внедрение получили малоглубинные электроразведочные методики, среди которых метод сопротивлений [8] и электромагнитное профилирование [9], используемые для картирования электропроводности. Для агрогеофизики характерны оригинальные специализированные аппаратные реализации контактных измерений методом сопротивлений ввиду необходимости равномерного покрытия больших по площади сельхозугодий.

Наличие контраста электрического удельного сопротивления у различных типов грунта и горных пород обуславливает эффективное использование методов малоглубинной электроразведки в археологической и агрогеофизике. Среди различий решаемых задач главное заключается в масштабе исследований. Локальные археологические объекты, имеющие минимальный характерный размер около 1 м, требуют высокого разрешения при проведении геофизической съемки с шагом от первых десятков сантиметров вдоль профиля и до 1–2 м между профилями. Минимальный размер отдельных участков, которые требуется локализовать, не менее чем на порядок больше описанного, что, соответственно, приводит к более редкой системе наблюдений. Схожесть этих двух направлений заключается в следующем: исследуется в обоих

случаях только приповерхностная часть грунта — в большинстве случаев до 1–2 м в глубину; исследования проводятся в основной своей части на территории сельскохозяйственных угодий без плотной застройки и коммуникаций. Это обуславливает практически единый набор технологий, которые успешно применяются при решении задач как археологии, так и точного земледелия.

Настоящее исследование носит обзорный характер, преследуя цель освещения темы технологического геофизического обеспечения, используемого в археологии и точном земледелии, и ограничивается контактными и бесконтактными электроразведочными методиками.

Метод сопротивлений

Классическая четырехэлектродная установка уже более полувека успешно применяется в археологической и агрогеофизике. Благодаря своей простоте в методической и технической реализации измерения, характеризующие изменение кажущегося УЭС вблизи поверхности, предоставляют достаточно информативный материал. Основным ограничением таких работ является их низкая производительность.

Здесь был найден и внедрен достаточно простой, малозатратный и эффективный способ повышения производительности электропрофилирования за счет фиксации электродов на жесткой раме (рис. 1), на которой могут быть разведены провода и закреплено измерительное оборудование. Так, английская фирма Geoscan Research выпускает несколько вариантов рам, которые позволяют применять двух-, трех- и четырехэлектродные установки с несколькими разносами (рис. 1), в то время как американская фирма Landviser производит устройства для быстрых измерений с установкой Веннера [10]. Первые активно применяются для археологических исследований, последние — для картирования кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) сельскохозяйственных полей [11].



Рисунок 1. Устройства для электропрофилирования: RM (слева, Geoscan Research, Англия) и ERM-01 (справа, Landviser, США)

Для автоматизации и масштабирования процесса измерений на большие площади вводились разнообразные конструкции. Например, четырехэлектродная конструкция со скользящим, немного заглубленным электродом, смонтированная на тракторе для изучения пашни [9] (рис. 2). Или телега MSP25, обеспечивающая контакт за счет металлических колес, напоминающих по форме шестерни с заостренными зубцами (рис. 2), применяемая для археологических исследований (www.geoscan-research.co.uk). В конструкции MSP25 предусмотрена возможность дополнительного монтажа GPS приемника и магнитометра.



Рисунок 2. Устройства для автоматического электропрофилирования: монтаж на трактор для исследования пашни (слева, J. D. Rhoades, США) и сборка в виде телеги, колеса которой служат заземлителями (справа, Geoscan Research, Англия)

Достаточно оригинальными конструкциями отличаются также прицепы, реализующие автоматическое электропрофилирование, — Veris и ARP (рис. 3) [12]. Первое устройство (Veris 3100, США) использует заточенные круглые диски для контакта с пашней и является успешным коммерческим проектом для картирования кажущегося УЭС в точном земледелии. Второе устройство (ARP 03, Франция), опять с контактами, напоминающими шестерни, активно применяется в археологии и точном земледелии.

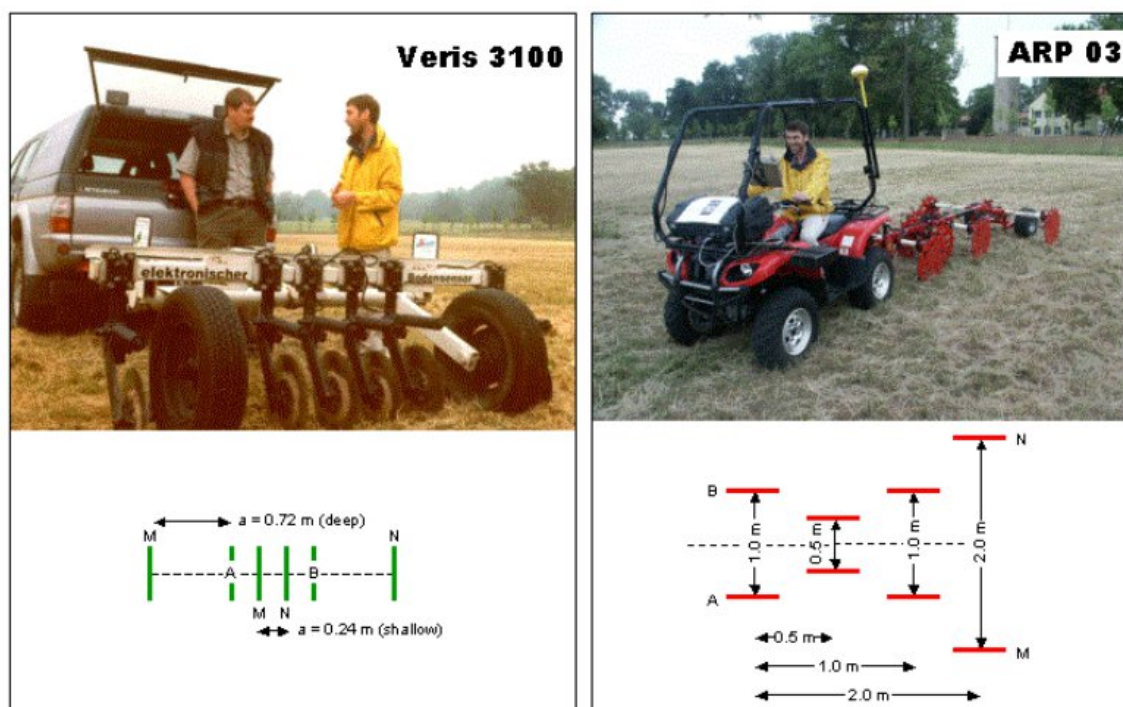


Рисунок 3. Устройства для автоматического электропрофилирования в виде прицепов: VERIS 3100 (Veris Ltd, США) и ARP 03 (Geocarta, Франция)

Электромагнитное профилирование

Основным отличием метода электромагнитного профилирования является то, что он не требует заземления и, соответственно, на результаты измерений не влияет качество заземлений. Однако это имеет другую сторону, заключающуюся в необходимости калибровки нулей, температурного дрейфа аппаратуры, а также высоты ее расположения над поверхностью. Приборы канадской фирмы Geonics Ltd являются своего рода стандартом в агрогеофизике на территории Северной Америки, и применяются более четырех десятилетий [9]. В настоящее время в пешеходных вариантах широко применяется аппаратура электромагнитного профилирования Geonics, Dualem, EMP-400 [13]. Для механизации измерений внедряют различного рода конструкции, которые монтируются на технику либо буксируются за ней (рис. 4 и рис. 5).

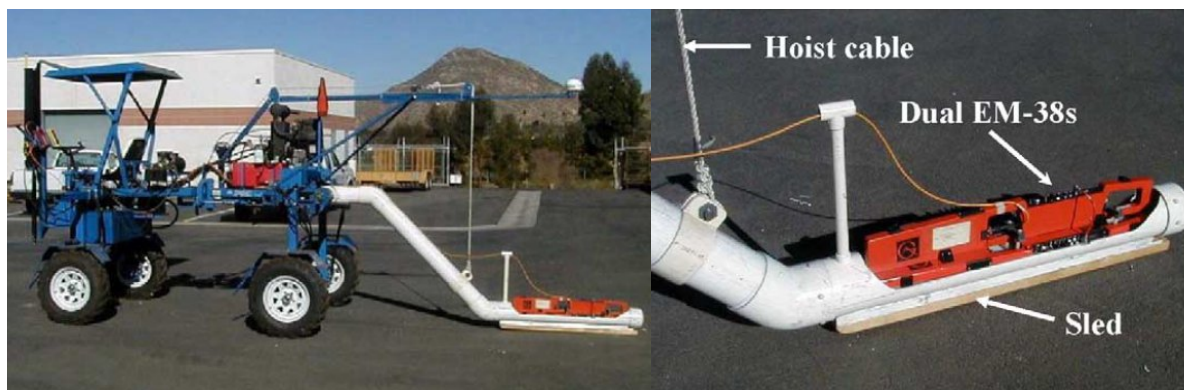


Рисунок 4. Устройство для электромагнитного профилирования (Dual EM-38s), смонтированное на специализированную сельхозмашину

На рисунке 4 приведен пример буксировки на полужесткой сцепке двух ортогонально расположенных на санях EM38. На рисунке 5 (слева) показан пример полевых работ с помощью многокатушечного прибора DUALEM421s, который кроме профилирования используется также для зондирования на первые метры, позволяя делать инверсию в простых слоистых моделях [14]. Справа на рисунке 5 демонстрируется прибор австрийской разработки TopSoil Mapper (Geoprospectors GmbH, Австрия), который по устройству аналогичен EM38, экранирован от трактора и используется, в частности, для коррекции глубины распашки в реальном времени [15].

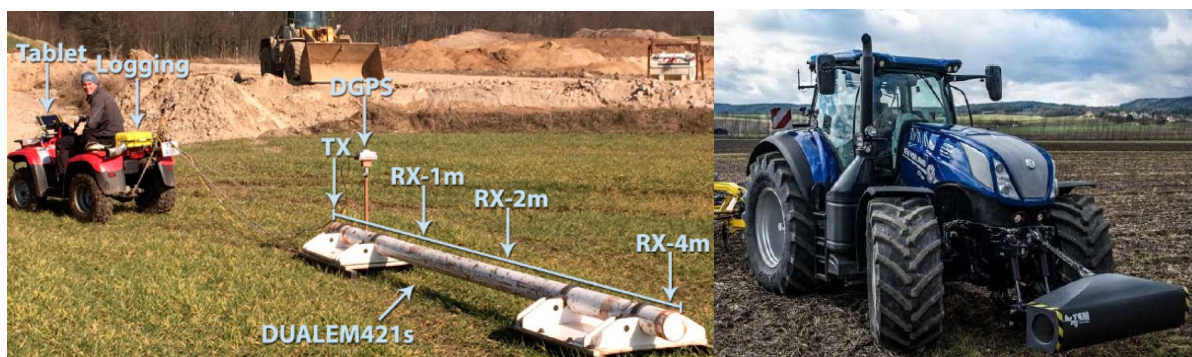


Рисунок 5. Устройства для электромагнитного профилирования: DUALEM421s, буксируемое за квадроциклом, (слева) и Topsoil, смонтированное на трактор, (справа)

Можно отметить российскую аппаратную разработку АЭМП-14, которая более 20 лет успешно применяется в археологии [16, 17], а в настоящее время демонстрирует высокую эффективность в точном земледелии для зондирования полей по параметру кажущейся электропроводности [18]. Для буксировки прибора за различными транспортными средствами используются санки или тележки (рис. 6).



Рисунок 6. *Российская аппаратура для многочастотного электромагнитного профилирования АЭМП-14 в ходе исследований сельскохозяйственных полей в Ростовской и Новосибирской областях, при буксировке сельхозмашиной и гусеничным транспортером*

Заключение

По результатам проанализированных материалов можно отметить, что методы малоглубинной электроразведки широко и регулярно применяются в археологических изысканиях в России и за рубежом. Об этом свидетельствуют многочисленные научные публикации и информационные ресурсы в сети. Внедрение же описанных технологий в агросектор носит массовый характер только за рубежом. Несмотря на активные исследования и научные публикации в этом направлении отдельных отечественных коллективов, широкого внедрения в практику до сих пор не осуществлено.

В целом археология и точное земледелие являются отличными направлениями внедрения приповерхностных электроразведочных технологий. При исследовании грунта до глубины первых метров результаты легко подлежат проверке и корректировке. За счет того, что здесь могут требоваться, с одной стороны, высокое разрешение, а с другой, съемка огромных площадей, создаются условия для развития новых технических и методических приемов.

Благодарности

Работа выполнена в ИНГГ СО РАН в рамках проекта НИР № FWZZ-2026-0049.

Список литературы

1. Atkinson R. J. C. Methodes electriques de prospection archeologie / Atkinson R. J. C. // La Decouvert de Passe. — Picard, 1952. — P. 59–70.
2. Aitken M. J. Physics and archaeology, 2nd ed. / Aitken M. J. — Clarendon Press, Oxford, 1974. — 291 p.
3. Oswin J. A Field Guide to Geophysics in Archaeology / Oswin, John. — Springer-Praxis, 2009. — 221 p. — <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76692-6>.
4. World Archaeo-Geophysics: Integrated Minimally Invasive Approaches Using Country-Based Examples / ed. Cuenca-Garcia C. [et al.]. — Springer Cham, 2024. — 482 p. — <https://doi.org/10.1007/978-3-031-57900-4>.
5. Fassbinder J. Magnetometry for Archaeology / Fassbinder J. // Encyclopedia of Geoarchaeology. — Springer Science+Business Media, 2017. — <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4409-0>.
6. Campana S. Drones in Archaeology. State-of-the-Art and Future Perspectives / Campana S. // Archaeological Prospection. — 2017. — Vol. 24. — № 4. — Pp. 275–96. — <https://doi.org/10.1002/arp.1569>.
7. Allred B. Application of Geophysical Methods to Agriculture: An Overview / Allred B. J., Freeland R. S. // Fast Times. — 2010. — Vol. 15. — № 4. — Pp. 13–27.
8. Поздняков А. И. Электрофизика почв / Поздняков А. И., Позднякова А. Д. — М.: Дмитров, 2004.
9. Corwin D. L. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture / Corwin D. L., Lesch S. M. // Computers and Electronics in Agriculture. — 2005. — Vol. 46. — Pp. 11–43.
10. Golovko L. Electrical Geophysical Methods in Agriculture / Golovko L., Pozdnyakov A. I & Landviser, LLC // Proceedings of the 4th International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture (ISIITA). October 26–29, 2007, Beijing, China. — Pp. 457–471.
11. Pozdnyakova L. A. In-field Assessment of Soil Salinity and Water Content with Electrical Geophysics / Pozdnyakova L. A., Trubin A. Yu., Orunbaev S., Mansteind Yu. A., Umarova A. B. // Moscow University Soil Science Bulletin. — 2023. — Vol. 78. — № 5. — Pp. 451–460. — <https://doi.org/10.3103/S0147687423050034>.

12. Dabas M. Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale / Dabas M., Lück E., Gebbers R., Domsch H. // *Near Surface Geophysics*. — 2009. — Vol. 7. — № 3. — Pp. 179–190.
13. Doolittle J. A. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies / Doolittle J. A., Brevik E. C. // *Geoderma*. — 2014. — Vol. 223–225. — Pp. 33–45.
14. Christiansen A. Improved Geoarchaeological Mapping with Electromagnetic Induction Instruments from Dedicated Processing and Inversion / Christiansen A., Pedersen J., Auken E., Sørensen N., Holst M., Kristiansen S. // *Remote Sens.* — 2016. — Vol. 8. — № 12. — P. 1022. — <https://doi.org/10.3390/rs8121022>.
15. Feudis C. Practical insights for ECa-based soil mapping: Case studies in croplands and vineyards / C. De Feudis, C. Ferré, R. Comolli // *Smart Agricultural Technology*. — 2025. — Vol. 10. — P. 9. — <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100697>.
16. Балков Е. В. Опыт применения электромагнитного частотного зондирования для решения археолого-геофизических задач / Балков Е. В., Манштейн А. К., Чемякина М. А., Манштейн Ю. А., Эпов М. И. // *Геофизика*. — 2006. — № 1. — С. 43–50.
17. Балков Е. В. Опыт детализации результатов магнитной съемки археологических памятников электроразведочными методами / Балков Е. В., Позднякова О. А., Дядьков П. Г., Карин Ю. Г., Шапаренко И. О., Фадеев Д. И. // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. — 2019. — Т. 17. — № 4. — С. 13–22. — <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2019-17-4-13-22>.
18. Балков Е. В. Внутрипольное зонирование почвенного покрова по данным геофизических методов / Балков Е. В., Барсуков П. А., Шалагинов А. Е., Карин Ю. Г., Прокопьев А. В., Русалимова О. А. // *Почвы и окружающая среда*. — 2025. — Т. 8. — № 3. — С. 10.

References

1. Atkinson R. J. C. Methodes electriques de prospection archeologie / Atkinson R. J. C. // *La Decouvert de Passe*. — Picard, 1952. — P. 59–70.
2. Aitken M. J. *Physics and archaeology*, 2nd ed. / Aitken M. J. — Clarendon Press, Oxford, 1974. — 291 p.
3. Oswin J. *A Field Guide to Geophysics in Archaeology* / Oswin, John. — Springer-Praxis, 2009. — 221 p. — <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76692-6>.

4. World Archaeo-Geophysics: Integrated Minimally Invasive Approaches Using Country-Based Examples / ed. Cuenca-Garcia C. [et al.]. — Springer Cham, 2024. — 482 p. — <https://doi.org/10.1007/978-3-031-57900-4>.
5. Fassbinder J. Magnetometry for Archaeology / Fassbinder J. // Encyclopedia of Geoarchaeology. — Springer Science+Business Media, 2017. — <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4409-0>.
6. Campana S. Drones in Archaeology. State-of-the-Art and Future Perspectives / Campana S. // Archaeological Prospection. — 2017. — Vol. 24. — № 4. — Pp. 275–96. — <https://doi.org/10.1002/arp.1569>.
7. Allred B. Application of Geophysical Methods to Agriculture: An Overview / Allred B. J., Freeland R. S. // Fast Times. — 2010. — Vol. 15. — № 4. — Pp. 13–27.
8. Pozdnyakov A. I. Elektrofizika pochv / Pozdnyakov A. I., Pozdnyakova A. D. — M.: Dmitrov, 2004 (in Russ.).
9. Corwin D. L. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture / Corwin D. L., Lesch S. M. // Computers and Electronics in Agriculture. — 2005. — Vol. 46. — Pp. 11–43.
10. Golovko L. Electrical Geophysical Methods in Agriculture / Golovko L., Pozdnyakov A. I & Landviser, LLC // Proceedings of the 4th International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture (ISIITA). October 26–29, 2007, Beijing, China. — Pp. 457–471.
11. Pozdnyakova L. A. In-field Assessment of Soil Salinity and Water Content with Electrical Geophysics / Pozdnyakova L. A., Trubin A. Yu., Orunbaev S., Mansteind Yu. A., Umarova A. B. // Moscow University Soil Science Bulletin. — 2023. — Vol. 78. — № 5. — Pp. 451–460. — <https://doi.org/10.3103/S0147687423050034>.
12. Dabas M. Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale / Dabas M., Lück E., Gebbers R., Domsch H. // Near Surface Geophysics. — 2009. — Vol. 7. — № 3. — Pp. 179–190.
13. Doolittle J. A. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies / Doolittle J. A., Brevik E. C. // Geoderma. — 2014. — Vol. 223–225. — Pp. 33–45.
14. Christiansen A. Improved Geoarchaeological Mapping with Electromagnetic Induction Instruments from Dedicated Processing and Inversion / Christiansen A., Pedersen J., Auken E., Sørensen N., Holst M., Kristiansen S. // Remote Sens. — 2016. — Vol. 8. — № 12. — P. 1022. — <https://doi.org/10.3390/rs8121022>.

15. Feudis C. Practical insights for ECa-based soil mapping: Case studies in croplands and vineyards / C. De Feudis, C. Ferré, R. Comolli // Smart Agricultural Technology. — 2025. — Vol. 10. — P. 9. — <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100697>.
16. Balkov E. V. Opyt primeneniya elektromagnitnogo chastotnogo zondirovaniya dlya resheniya arheologo-geofizicheskikh zadach / Balkov E. V., Manshteyn A. K., Chemyakina M. A., Manshteyn Yu. A., Epov M. I. // Geofizika. — 2006. — № 1. — P. 43–50 (in Russ.).
17. Balkov E. V. Opyt detalizacii rezul'tatov magnitnoy s'emki arheologicheskikh pamyatnikov elektrorazvedochnymi metodami / Balkov E. V., Pozdnyakova O. A., Dyad'kov P. G., Karin Yu. G., Shaparenko I. O., Fadeev D. I. // Vestnik NGU. Seriya: Informacionnye tehnologii. — 2019. — Vol. 17. — № 4. — P. 13–22. — <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2019-17-4-13-22> (in Russ.).
18. Balkov E. V. Vnutripol'noe zonirovaniye pochvennogo pokrova po dannym geofizicheskikh metodov / Balkov E. V., Barsukov P. A., Shalaginov A. E., Karin Yu. G., Prokop'ev A. V., Rusalimova O. A. // Pochvy i okruzhayuschaya sreda. — 2025. — Vol. 8. — № 3. — P. 10 (in Russ.).