

Электротомография с погруженными установками

А.А. Бобачев

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, bobachev@gmail.com

Аннотация

При электротомографии традиционно используются поверхностные установки (на грунте или на поверхности воды). В некоторых случаях существенный прирост информативности метода может быть достигнут с использованием погружения кос.

В первую очередь это касается работы на акваториях. Если глубина воды более 5 метров, то вода будет существенно затруднять изучение верхнего слоя донных отложений. Так как этот слой будет проявляться интегрально со слоем воды. В результате мы не можем получить высокое разрешение при исследовании донных отложений. При увеличении глубины воды эта проблема будет проявляться еще сильнее. Если опускать косу на дно, то влияние воды на результаты будет гораздо слабее. Особенно для пресноводных водоемов. Понятно, что работа с донной установкой значительно более трудозатратная, но повышение качества работ окупает эти затраты.

Второе направление при использовании заглубленных установок это скважинные исследования. Проводя электротомографические исследования в скважинах, мы получаем гораздо больше информации в сравнении с обычным каротажем КС.

В настоящей работе будут показаны практические примеры электротомографических работ с погруженными установками.

Ключевые слова: метод сопротивлений, электротомография, скважинная геофизика, работа на акваториях

Введение

При выполнении работ по методике электротомографии обычно применяют многоэлектродную аппаратуру [Griffith, Turnbull, 1985], а электроды располагают на поверхности земли или воды. Измеряемое в методе сопротивлений кажущееся сопротивление зависит от распределения удельного сопротивления в значительном объеме грунта. Используя алгоритмы инверсии можно от интегрального (кажущегося) сопротивления перейти к удельному сопротивлению отдельных слоев и блоков. Разрешающая способность метода сопротивлений уменьшается с увеличением глубины исследования, которая достигается увеличением размеров используемой установки.

Для повышения надежности и эффективности метода электротомографии можно использовать погруженные установки, примеры которых даны в этой работе. Отметим, что большинство программ 2D инверсии работает с данными для погруженных установок.

Донные установки

При работах на акваториях обычно используют различные плавающие установки. Либо применяется движущаяся установка ВЭЗ (непрерывные акваторные зондирования - НАЗ) [Бобачев и Ерохин, 2011], либо используют

электротомографию с плавающей косой. Оба этих подхода хорошо работают при глубинах дна в первые метры. По мере увеличения глубины дна влияние слоя воды увеличивается. Это приводит к потере информативности поверхностных методик при глубинах больше 5-10 метров. В этом случае имеет смысл работать с неподвижными донными установками для электротомографии [Dahlin и Loke, 2018; Wang и др., 2018] (рисунок 1).



Рисунок 1. Электроразведочная коса на дне водоёма.

Основное преимущество работ с донной косой в том, что вода уже мало мешает исследованию донных отложений. Особенно, если вода пресная и ее удельное сопротивление выше или сравнимо с удельным сопротивлением донных

отложений. Таким образом, можно проводить детальные исследования при достаточно больших глубинах (первые десятки метров). С другой стороны, появляется возможность работы в транзитной зоне, в непосредственной близости от берега и даже совмещать на одном профиле донные и поверхностные наблюдения (Рисунок 2).



Рисунок 2. Электротомография в транзитной зоне.

Использование неподвижной косы позволяет получать полевые данные высокого качества. Типичная точность 2D инверсии для донных установок – 0.6-3 %. С другой стороны, существенно уменьшается производительность полевых работ. При работах по методике НАЗ измерения проводят на скорости до 10 км/час. Для данной установки необходимо размотать косу провести измерения, поднять косу, перейти к следующей расстановке. Таким образом, скорость работы - примерно две расстановки в час.

В качестве полевого примера приведем результаты, полученные на берегу Обской губы. Работы были выполнены с 72 электродной косой с шагом 4 метра с аппаратурой Syscal Pro (IRIS Instruments, Франция). Такая коса позволяет добиться глубинности около 50 метров. Полевые работы выполнялись в два этапа. В начале прибор находился на лодке. Затем прибор был на берегу, а коса разматывалась с резиновой лодки (рисунок 2). В результате 2D инверсии данных электротомографии для двух раскладок получился разрез длиной 390 метров представленный на рисунке 3. Точность 2D инверсии 1.4 м. Вверху разреза синим цветом

показан слой воды. Глубина дна достигает почти 4 м в начале профиля (370 метров от линии прибора), а последние 20 метров профиля были выполнены на пляже.

На этом разрезе четко выделяется высокоомный блок с мерзлыми породами на глубине примерно 5 м под берегом. Это блок продолжается почти на 50 метров от кромки воды до глубины воды примерно 1 метр. На многих профилях к этому боку примыкает второй высокоомный блок, залегающий на глубине около 20 метров. Наличие двух высокоомных блоков у берега хорошо видно при сравнении результатов по нескольким профилям (рисунок 4). Эти высокоомные блоки соответствуют мерзлым породам.

Относительно невысокая скорость работ с донной косой не мешает обрабатывать достаточно длинные профили. При изысканиях моста через р. Волга были отработаны три профиля длиной более трех километров каждый. Полевые данные и результаты 2D инверсии представлены на рисунках 5,6 и 7.

Электротомографические наблюдения в скважине

Падение разрешения метода сопротивлений с глубиной можно продемонстрировать сравнением результатов метода электротомографии и бурения на геофизическом полигоне МГУ "Александровка" (Калужская область). Верхняя часть разреза мощностью около 20 метров представлена четвертичными отложениями: песками и моренными суглинками. В основании разреза залегает терригенно-карбонатная толща нижнего карбона.

На рисунке 8 показаны результаты интерпретации данных электротомографии и результаты бурения. Хорошо видно, что инверсия дает мало контрастное эквивалентное решение с завышенной мощностью проводящих четвертичных отложений, без выделения отдельных слоев в высокоомном основании разреза. Электротомография уверенно показывает латеральные изменения разреза вдоль профиля: увеличение проводимости моренных отложений и увеличение интегрального сопротивления карбонатных отложений вдоль профиля, но не обладает достаточно высоким разрешением по вертикали, особенно при чередовании слоев небольшой мощности.

Для получения удельных сопротивлений отдельных горизонтов можно использовать измерения по методике электротомографии в скважине [Бобачев и Стойнова, 2014] (рисунок 9).



Рисунок 9. Опускание косы в скважину.

Методика многоэлектродных зондирований в скважине является аналогом бокового каротажного зондирования с различными установками, который выполняется с неподвижной косой с шагом ~0.5 м. Полученные данные можно интерпретировать либо качественно, либо в рамках одномерной модели. Применение нескольких разносов позволяет оценить эффект зоны проникновения и других особенностей ствола скважины. На рисунке 10 показаны результаты скважинных наблюдений для интервала скважины показанной на рисунке 8.

Отметим, что пласты, выделяемые по удельному сопротивлению, не совпадают в точности с описанием скважины. Это ярко проявилось для мощного слоя известняков (глубина 18.5 - 24.5). В нем по результатам томографии можно выделить несколько пластов с разным сопротивлением. Таким образом, электротомография позволяет уточнить глубины слоев и определить удельное сопротивление слоев с высокой точностью. Это редко удается, если использовать обычный каротаж сопротивлений (КС).

Выводы

Интегральный характер метода сопротивлений приводит к принципиальным ограничениям в

разрешающей способности метода сопротивлений. Чтобы повысить детальность результатов, необходимо уменьшать объем пород влияющий на наши измерения. Для этого нужно использовать погруженные установки и комбинирование погруженных и поверхностных систем наблюдений.

Сегодня разработаны технологии, позволяющие проводить успешные электротомографические работы с погруженными установками.

Литература

Griffith D.H. and Turnbull J. A multi-electrode array for resistivity surveying // *First Break*. — 1985 — Vol. 3, No 7 — pp. 16 - 20.

Dahlin, T., Loke, M.H. 2D Underwater ERT surveying in water with resistivity layering with example of application to site investigation for a rock tunnel in central Stockholm // *Near Surface Geophysics* — 2018 — Vol/ 16, Issue 3 — pp 230-237

Shunguo Wang, Thomas Kalscheuer, Mehrdad Bastani, Alireza Malehmir, Laust B Pedersen, Torleif Dahlin, Naser Meqbel. Joint inversion of lake-floor electrical resistivity tomography and boat-towed radio-magnetotelluric data illustrated on synthetic data and an application from the Äspö Hard Rock Laboratory site, Sweden // *Geophysical Journal International* — 2018 — Vol. 213, Issue 1, — pp 511–533

Бобачев А. А., Стойнова А. М. Электротомография в скважинном варианте // *Приборы и системы разведочной геофизики*. — 2014. — Т. 47, № 1. — С. 111–121.

Бобачев А. А., Ерохин С. А. 2011. Практика применения электротомографии на малоглубинных акваториях // *Инженерные изыскания*, № 11. С. 24–29.

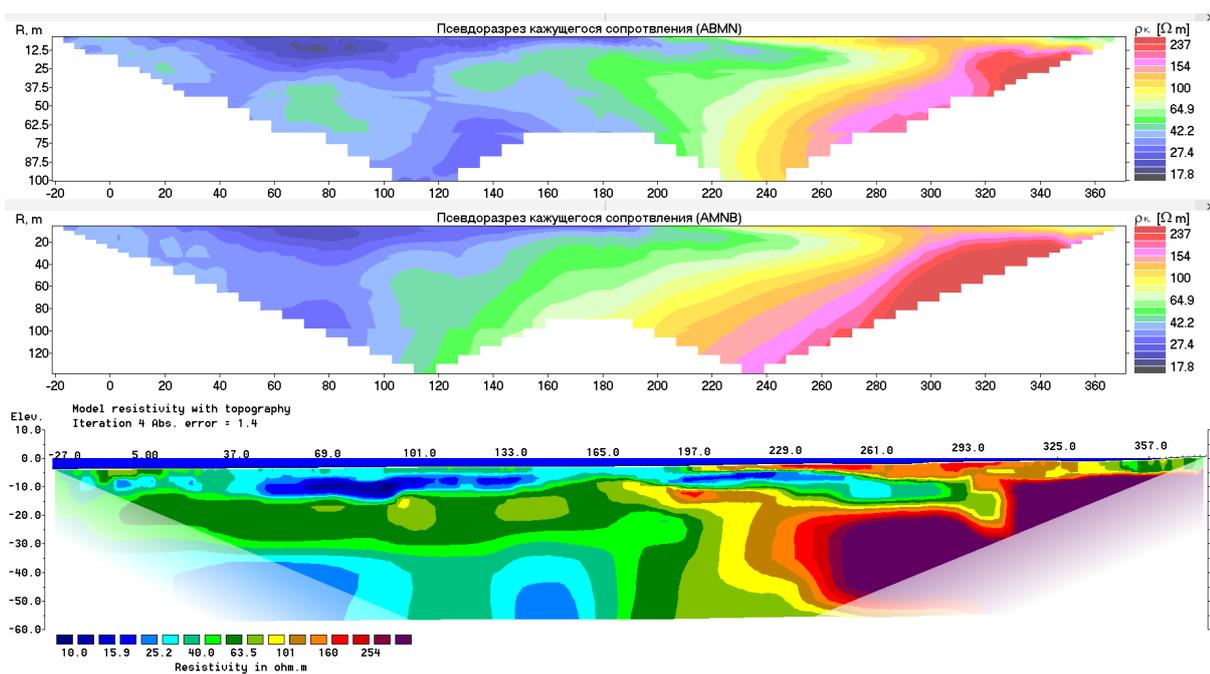


Рисунок 3. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления для двух установок (ДОЗ и Шлюмберже) и результат 2D инверсии (вода показана синим цветом).

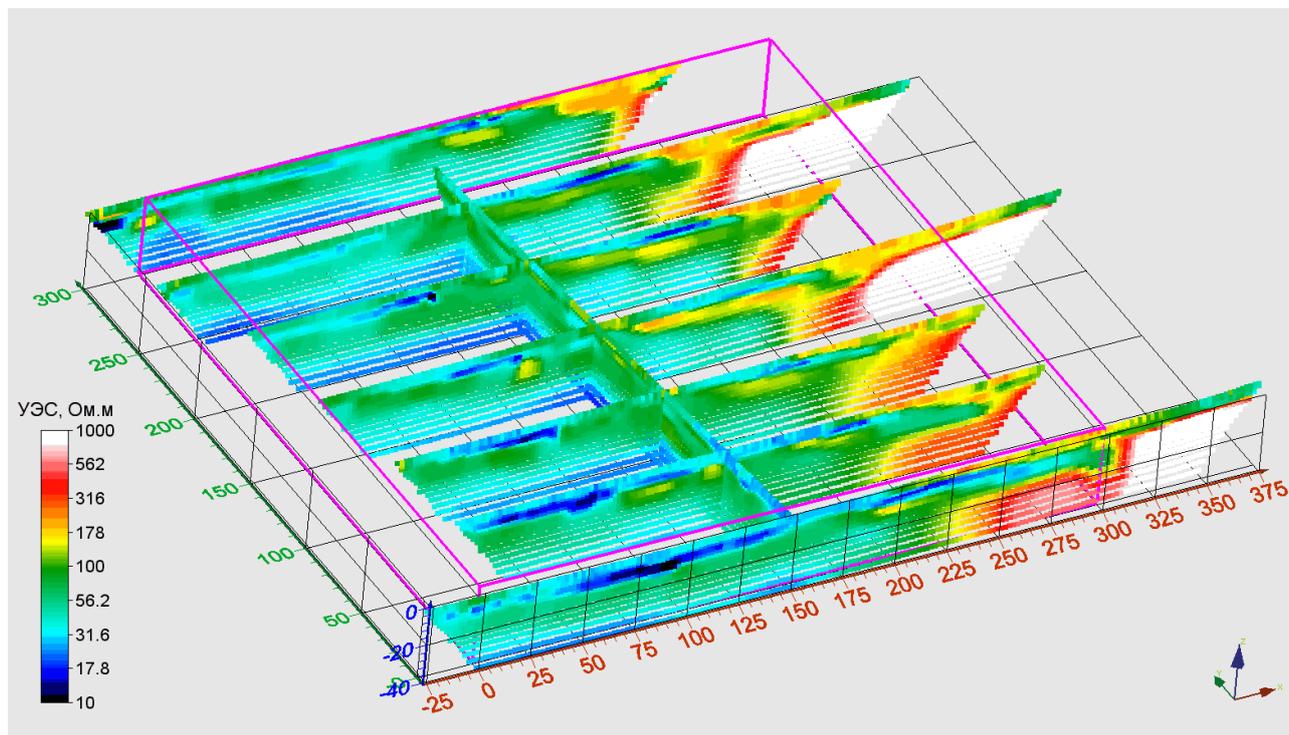


Рисунок 4. 3D представление результатов донной электротомографии по всем профилям.

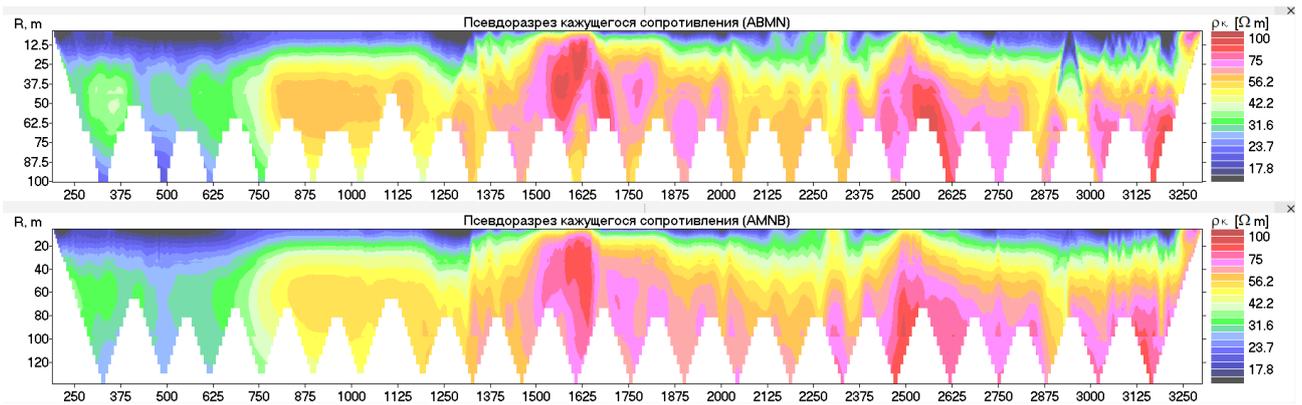


Рисунок 5. Полевые данные по профилю через р. Волга.

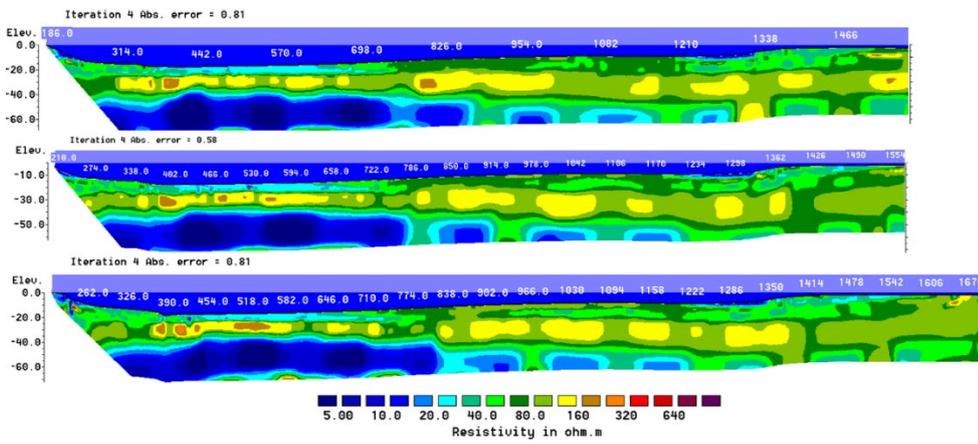


Рисунок 6. Результаты 2D инверсии по трем профилям через р. Волга у правого берега.

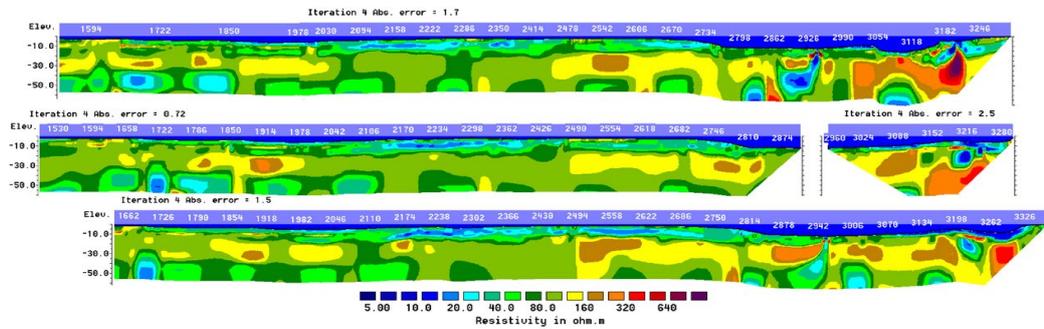


Рисунок 7. Результаты 2D инверсии по трем профилям через р. Волга у левого берега.

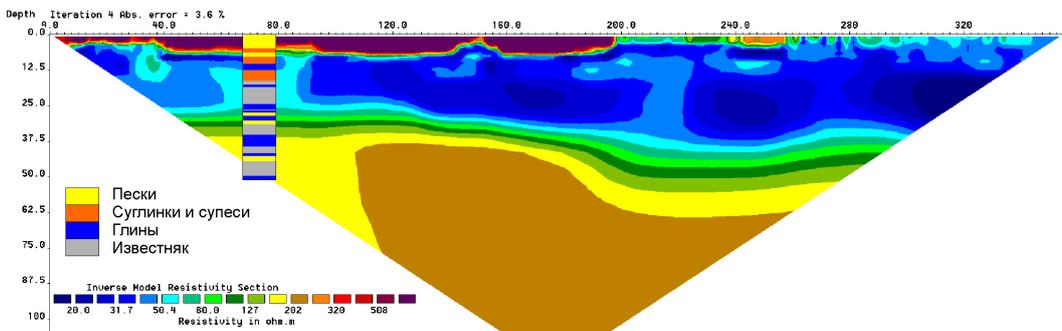


Рисунок 8. Сравнение результатов 2D инверсии данных электротомографии и бурения.

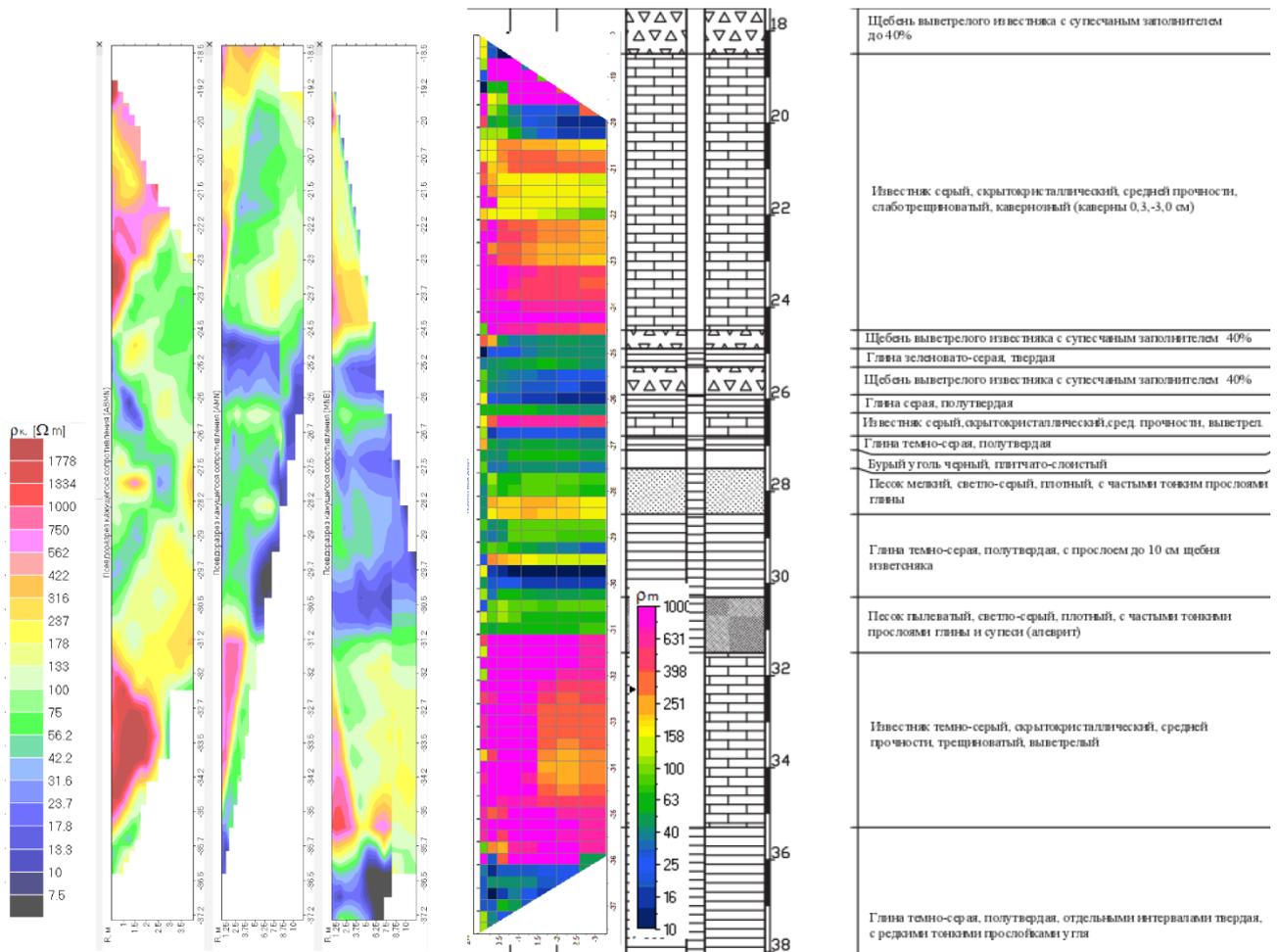


Рисунок 10. Полевые данные, результаты 2D интерпретации и фрагмент описание буровой колонки.