

УДК 550.83:553.632

**Григорьев Данила Вячеславович**

младший научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075 г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [danilging@gmail.com](mailto:danilging@gmail.com)

**Ведерников Андрей Сергеевич**

научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [avedernikov@igduran.ru](mailto:avedernikov@igduran.ru)

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ПОИСКОВ КАРСТОВЫХ ПУСТОТ В УСЛОВИЯХ СОЛЕОТВАЛА\*

#### Аннотация:

Существует проблема безопасной эксплуатации калийных солеотвалов в условиях непрерывного развития карстовых полостей, вызванная постоянным водопритоком поверхностных и грунтовых вод. В процессе проведения мер по устранению и предотвращению последствий проявлений карста возможно возникновение угрозы жизням людей, повреждения имеющихся зданий и сооружений и повреждения строительной техники. Для наиболее эффективного решения данной проблемы рекомендуется проводить инженерно-геофизические изыскания, с помощью которых производится оценка положения и размеров карстовых полостей и других неоднородностей массива отвала. В данной работе показан поиск карстов вблизи конвейерной линии, где запланированы работы по постройке фундамента для этой линии. При помощи беспилотного летательного аппарата была построена трехмерная модель земной поверхности. По имеющейся априорной информации была создана геолого-геофизическая модель отвала. Измерения электротомографией были проведены по нескольким профилям. Затем данные были обработаны в программах для двумерной и для трехмерной инверсии данных. Данные, полученные в результате трехмерной инверсии, показали более качественную корреляцию с геолого-геофизической моделью. Найденные аномалии затем были подтверждены при производстве строительных работ. Таким образом, данные, полученные в результате двумерных измерений, могут быть результативно подвергнуты трехмерной инверсии.

**Ключевые слова:** калийное месторождение, солеотвал, карстовые полости, геофизические исследования, 3D-электротомография

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.137

**Grigoryev Danila V.,**

Junior Researcher,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075, Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [danilging@gmail.com](mailto:danilging@gmail.com)

**Vedernikov Andrey S.**

Researcher,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
email: [avedernikov@igduran.ru](mailto:avedernikov@igduran.ru)

### RESULTS OF 3D ELECTRICAL IMAGING SURVEYS FOR SEARCHING OF KARST CAVERNS IN SALT TAILINGS PILES

#### Abstract:

There is a problem of safe exploitation of potash salt tailings piles in conditions of continuous propagation of karst caverns, which is caused by constant surface and ground water flow. The measures to eliminate and prevent the consequences of karst impacts may cause the threat to lives of people, the damage to existing buildings and structures and the damage to construction equipment. To solve this problem most effectively it is recommended to carry out engineering and geophysical surveys which enable to evaluate the position and size of karst caverns and other heterogeneities of the tailings pile. This paper shows the search for karsts near the conveyor line, where the construction of the foundation for this line is planned. The unmanned aerial vehicle helped in building a three-dimensional model of the earth's surface. According to available a priori information, a geological and geophysical model of the blade was created. Electrotomography measurements were carried out on several profiles. Then the data were processed in programs for 2D and 3D data inversion. The data obtained from the three-dimensional inversion showed a better correlation with the geological and geophysical model. The anomalies found were then confirmed during the construction work. Thus, the data obtained from two-dimensional measurements can be effectively subjected to three-dimensional inversion.

**Key words:** potash deposit, salt tailings pile, karst caverns, geophysical studies, 3D electrical imaging survey.

\* Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00581-19-00. Тема № 0405-2019-0007

### *Введение*

Обеспечение безопасности при проведении любой стадии горных работ всегда стоит во главе угла на каждом осваиваемом месторождении. В не меньшей степени это справедливо и для отвалов горных пород, особенно на сильвинитовых месторождениях. Такие отвалы требуют повышенного внимания, поскольку склонны к гигроскопичности, слеживаемости, смерзаемости, а состоят в общем случае из кристаллического хлористого натрия (не менее 93 %) с примесями других солей (около 5 %) с низким содержанием нерастворимого остатка, что обуславливает высокую склонность к растворению водой. В условиях дневной поверхности воды минерализованы слабо, что только усиливает эффект растворения, который в общей толще солеотвала происходит неравномерно, с образованием карстовых полостей. Таким образом, создается опасность для устойчивости конструкций и перемещения персонала и техники по солеотвалу при условии производственной необходимости проведения работ на солеотвале. Поэтому, кроме обеспечения мер по ограничению проникновения воды в солеотвалы, необходим контроль за развитием существующих карстовых полостей и образованием новых [1].

### *Постановка задачи*

Карстовые полости, пустые или заполненные рассолом, уверенно выделяются на фоне массива отвала по контрасту свойств, наблюдаемых в геофизических полях [2]. Это является благоприятным фактором применения геофизических методов при поисках карстовых пустот в солеотвалах. Комплекс геофизических методов, позволяющий успешно обнаружить карст, может варьироваться в зависимости от целей, задач и возможностей исследователей [3 – 7].

### *Методы исследования*

В нашем случае для определения актуального состояния солеотвала с целью обеспечения безопасности при проведении сваястроительных работ был предложен комплекс геофизических методов, состоящий из электроразведки методом сопротивлений по методике электротомографии (ЭТ) и георадарного зондирования, дополнительно был применен беспилотный летающий аппарат (квадрокоптер) для создания цифровой модели рельефа и ортофотоплана [8].

В рамках данной статьи осветим особенности применения электротомографии.

Высотные отметки по профильным линиям для учета влияния рельефа при последующей обработке измерений и построении моделей среды получены по результатам расчетов цифровой модели местности и ортофотоплана, полученных с использованием беспилотного летающего аппарата (рис. 1).

В геофизике существует проблема с неоднозначностью при решении обратной задачи. В данной работе для повышения качества интерпретации результатов инверсии данных электротомографии, а также для оценки соответствия геоэлектрической модели и геологии опирались на инженерно-геологический разрез, построенный по двум скважинам, карту рельефа участка работ, составленную до возведения солеотвала, справочные данные о параметрах удельного электрического сопротивления (УЭС, Ом·м) встречающихся горных пород, результаты предыдущих геофизических исследований в данном месте [9]. В результате на первоначальном этапе была составлена геолого-геофизическая модель массива по параметру УЭС (рис. 2).

Исходя из геолого-геофизической модели и обводненности проявления карста в итоговой модели УЭС среды могут проявляться в двух вариантах: либо аномально низкими значениями УЭС (0,05-1 Ом·м), если карстовая полость заполнена водой, либо аномально высокими значениями УЭС (более 1200 Ом·м), если карстовая полость заполнена в основном воздухом.

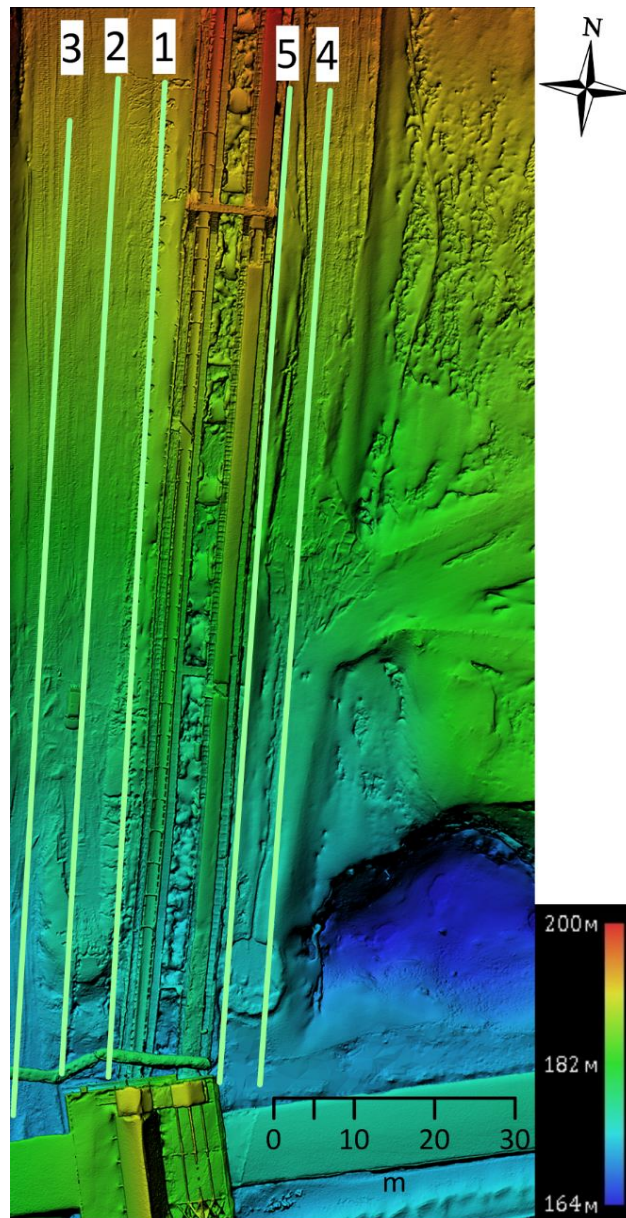


Рис. 1 – Детальная 3D-модель рельефа исследуемого участка (составил Замятин А.Л.).  
Светло-зелеными линиями отмечено положение профилей электромиграции,  
числами с 1 по 5 обозначены их номера

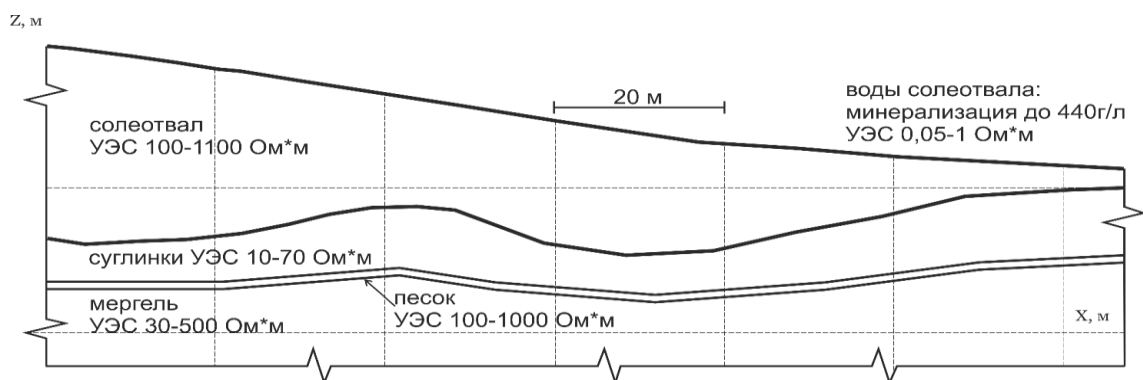


Рис. 2 – Разрез по геолого-геофизической модели участка исследований

Работа выполнялась с помощью электротомографического комплекса, состоящего из электроразведочного оборудования, предназначенного для работ со стандартной четырехэлектродной установкой: генератора ВП-1000, измерителя SGD-EETMEDUSA, соединенных с помощью коммутатора CommDD2-64 с комплектом кос и электродов. Измерения выполнялись по протоколам, включавшим установки Шлюмберже и дипольную осевую. На каждой установке осуществляется по несколько сотен физических наблюдений. Всего было выполнено 5 параллельных профилей, каждый длиной 123 м и с шагом по профилю между электродами 3 м. Расстояние между соседними профилями составило 5 м, кроме расстояния между профилями 1 и 5, расстояние между которыми составило 16 м. Все профильные линии располагались вдоль конвейерной эстакады. Глубина исследований, исключая краевые области профилей, составила около 30 м. Согласно исходной геолого-геофизической модели, максимальная мощность толщи солевотвала составляет до 25 м.

### Результаты исследований

При обработке результатов измерений в программе двумерной инверсии данных электротомографии последующем построении разрезов УЭС выявилась проблема с геологической интерпретацией [10]. Изменяя алгоритм инверсии, коэффициент влияния топографии, предварительного положения границы УЭС в модели, не удавалось добиться хорошего соответствия положения границы ложа солевотвала априорным данным, а именно это соответствие было предложено в качестве критерия достоверности получаемой модели УЭС. На примере 2D-инверсии данных измерений по профилю 4 хорошо виден этот момент несоответствия (рис. 3). При этом результат инверсии надежен при оценивании через индекс DOI. Индекс DOI (depthofinvestigationindex, индекс глубины исследования) показывает, насколько можно доверять результатам инверсии [11]. В приведенном примере прозрачность модели выражена через индекс DOI, т.е. чем «прозрачней» (бледнее заливка цветом) участок модели, тем менее надежны результаты инверсии (см. рис. 3).

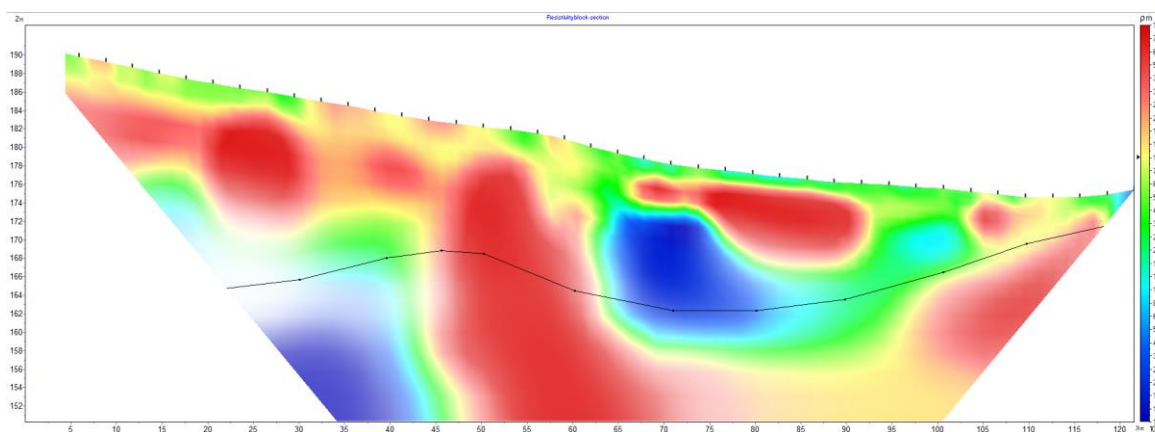


Рис. 3 – Разрез УЭС по профилю 4, полученный в результате 2D-инверсии данных электротомографии

Следующим этапом следует использование программы трехмерной инверсии данных электротомографии [12, 13]. Это является возможным для данных двумерных установок, т.к. по большей части профилей была соблюдена рекомендация по расстоянию между профилями, равному не более 2 шагов между электродами. В программе была создана объемная блочная модель массива размерами  $128 \times 34 \times 37$  м со следующими параметрами единичного блока:  $X = 1,5$  м (в половину шага электродов),  $Y = 4,86$  м,  $Z$  от 0,5 м, увеличиваясь с каждым шагом в 1,1 раза, всего было 16 шагов. Значение коэффициента топографии было установлено 4.

В результате инверсии в 3D-варианте удалось получить хорошее соответствие границы подошвы солеотвала по каждому профилю. Данная граница уверенно выделяется переходом от повышенных значений УЭС модели к пониженным значениям. На рис. 4 приведен пример с разрезом УЭС по профилю 2.

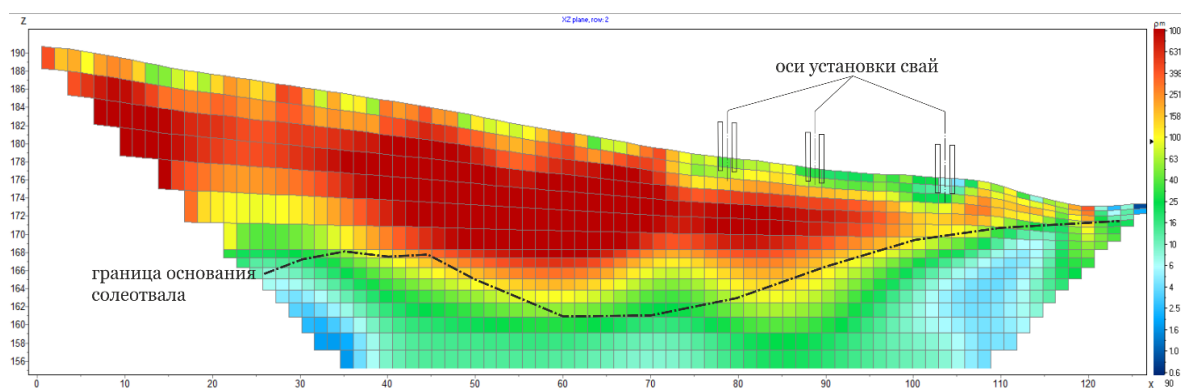


Рис. 4 – Разрез УЭС по профилю 2, полученный в результате 3D-инверсии данных электротомографии

Теперь можно изучать модель с целью поиска аномальных значений УЭС. Солеотвалу соответствуют значения в пределах 100 – 1100 Ом·м. Горным породам, слагающим основание солеотвала, состоящим из суглинков, соответствуют значения 3 – 100 Ом·м.

На разрезах по профилям 1-3 структур, которые могут быть охарактеризованы как карстовые полости, не обнаружено. На профиле 4 в районе отметок 63 – 100 м (рис. 5) в теле солеотвала наблюдается протяженная аномалия пониженных значений УЭС 3-10 Ом·м, которая имеет мощность от 4 до 9 м, кровля аномалии расположена на расстоянии от 5 до 8 м от поверхности. Данная аномалия характеризует возможную зону разуплотнения, заполненную солевым раствором и рыхлым материалом.

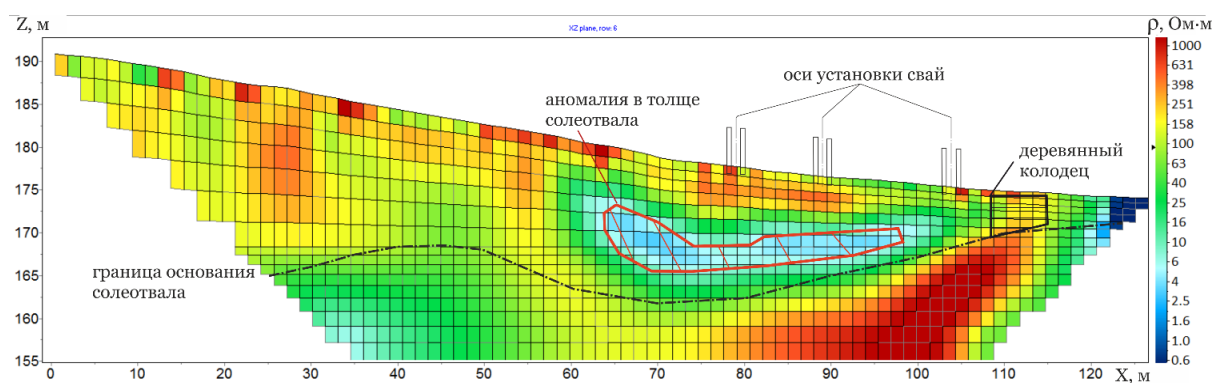


Рис. 5 – Блочная модель УЭС по профилю 4 с зонами разуплотнения

Выявленная аномалия морфологически располагается в пределах одного лога с открытым карстовым провалом. Ранее в данном месте уже выявлялась подобная аномалия предыдущими исследованиями специалистов АО «ВНИИ Галургии».

#### Обсуждение результатов

Исходя из значений УЭС аномалии 3-10 Ом·м, что несколько больше по сравнению с ожидаемыми значениями 0,05-1 Ом·м для карстовой полости, заполненной только минерализованной водой, а также после проведенных обсуждений с исследователями из АО «ВНИИ Галургии», данная аномалия низких значений УЭС в теле солеотвала интерпретирована как пространство, заполненное строительным мусором, остатками старых конвейерных лент, металлоломом, шинами, минерализованной водой.

Однако на момент выдачи рекомендаций по безопасности сваяустроительных работ данная аномалия интерпретировалась как карстовая полость, заполненная рыхлым материалом и минерализованной водой. В результате было выработано несколько консервативное понимание, что размещение над данной зоной без специальных предохранительных мероприятий тяжелой строительной техники небезопасно. В итоге строительные работы по возведению свай были выполнены в полном объеме и без происшествий.

#### *Заключение*

Проведение электроразведочных работ по методике 3D-электротомографии в сложных условиях солеотвала позволяет получать результаты, которые лучше согласуются с геологией в случаях, когда результаты 2D-инверсии не дают удовлетворительного результата. При этом входными данными могут выступать данные профильных измерений электротомографии при расстоянии между профилями не более двойного шага между электродами. Благодаря использованию такого подхода удалось выявить опасные и безопасные зоны. В результате была успешно решена задача обеспечения безопасности проведения работ на солеотвале.

#### **Литература**

1. Далатказин Т.Ш. Исследование последствий затопления подземного рудника на селитебной территории / Т.Ш. Далатказин, Т.Ф. Харисов // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. - № 2. – С. 38 - 51.
2. Опыт применения комплекса геофизических методов для выявления карстовых полостей в отвалах калийных рудников / А.А. Жуков, А.М. Пригара, И.Ю. Пушкарева, Р.И. Царев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. - № 5. – С. 120 - 130.
3. Zhou W., Lei M. Summary editorial for karst hydrogeology: advances in karst collapse studies. Environmental Earth Sciences – 2018. - 77, 803. doi:10.1007/s12665-018-7990-5
4. Chalikakis K., Plagnes V., Guerin R. et al. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. Hydrogeology Journal 19, 1169. - 2011. doi:10.1007/s10040-011-0746-x
5. Óscar Pueyo Anchuela, Aránzazu Luzón, Héctor Gil Garbi, Antonio Pérez, Andrés Pocoví Juan, María Asunción Soriano. Combination of electromagnetic, geophysical methods and sedimentological studies for the development of 3D models in alluvial sediments affected by karst (Ebro Basin, NE Spain), Journal of Applied Geophysics, Volume 102, 2014. – P. 81 - 95. ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.002>
6. F.J. Martínez-Moreno, J. Galindo-Zaldívar, A. Pedrera, T. Teixido, P. Ruano, J.A. Peña, L. González-Castillo, A. Ruiz-Constán, M. López-Chicano, W. Martín-Rosales, Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain), Journal of Applied Geophysics, Volume 107, 2014. – P. 149 – 162. ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>
7. S.C. Li, Z.Q. Zhou, Z.H. Ye, L.P. Li, Q.Q. Zhang, Z.H. Xu, Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel, Journal of Applied Geophysics. - 2015. - Volume 116.– P. 247 – 257. ISSN 0926-9851 <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.019>
8. Замятин А.Л. Осушение рудных тел в условиях повышенной обводненности и закарстованности налегающей толщи / А.Л. Замятин // Проблемы недропользования. – 2018. - №1(16). – С. 105 - 111. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.105
9. Хайрулина Е.А. Влияние стоков солеотвала калийного предприятия на химизм приповерхностной гидросферы / Е.А. Хайрулина, Н.Г. Максимович // Геохимия ландшафтов и география почв. Доклады Всероссийской науч. конф. – М., 2012. – С. 340 - 342.
10. Зуев П.И. Геофизическая диагностика состояния массива горных пород зоны комбинированной разработки Гороблагодатского железорудного месторождения /

---

П.И. Зуев, А.С. Ведерников, Д.В. Григорьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. - № 11. – С. 114.

11. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys/ M.H. Loke Dr // Geotomo Software, Res2dinv 3.5 Software. – 2004.

12 Ronczka, M., Hellman, K., Günther, T., Wisén, R., Dahlin, T., Electric resistivity and seismic refraction tomography: a challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory, Solid Earth, 8, 2017. – P. 671 – 682. <https://doi.org/10.5194/se-8-671-2017>

13 Grégory Bièvre, Laurent Oxarango, Thomas Günther, David Goutaland, Michael Massardi. Improvement of 2D ERT measurements conducted along a small earth-filled dyke using 3D topographic data and 3D computation of geometric factors, Journal of Applied Geophysics. - 2018. - Volume 153. - P. 100 – 112. ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.04.012>