

## Совместный анализ данных естественного поля и электротомографии для изучения Александровского городища (Калужская область)

В.А. Шевнин\* (МГУ), А.А. Бобачев (МГУ), С.В. Иванова (МГУ), К.И. Баранчук (МГУ)

### Введение

Метод естественного электрического поля широко применяется при решении гидрогеологических и инженерных задач. Достигнуты заметные успехи в развитии теории метода, решении прямых и обратных задач, в том числе совместно с электротомографией [Volève A., et al., 2009]. На смену традиционным неполяризующимся электродам с  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  французским специалистом Петье были разработаны новые неполяризующиеся электроды (так называемые электроды второго поколения) с  $\text{Pb}/\text{PbCl}_2$  [Petiau G., 2000]. Точность и стабильность измерений с новыми электродами стала заметно выше, чем с традиционными, и большое число зарубежных публикаций по ЕП, появившихся в последние годы, упоминают о применении именно электродов второго поколения [Husband et al., 2009]. Совместное использование данных ЕП и метода сопротивлений (электротомографии) помогает пониманию природы аномалий ЕП и их количественной интерпретации [Бобачев и др., 2004; Комаров, 1994; Volève A., et al., 2009].

### Участок работ

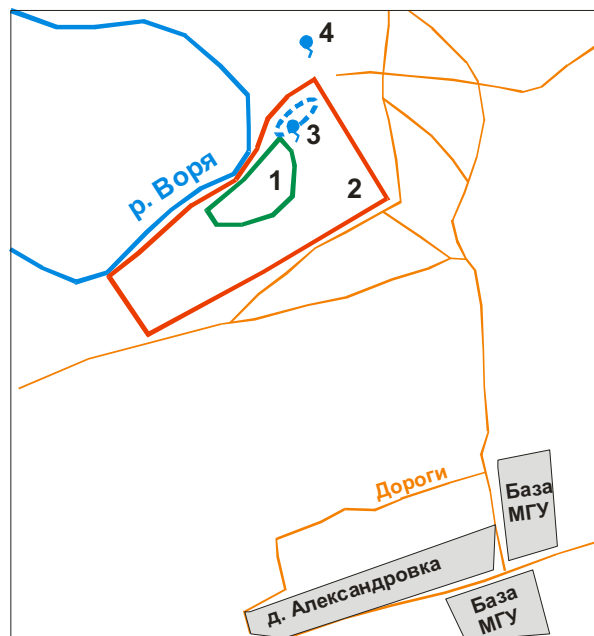
Участок работ (Рис.1) расположен в 500 м к северо-западу от базы МГУ в д. Александровке на краю Александровского плато вплоть до берега реки Воря. Длина участка 260 м, ширина от 70 до 135 м (2). В пределах участка находится пойма реки Воря, возвышенное на 15 м над поймой Александровское плато с находящимся на нем Александровским городищем (1) и к северо-востоку от городища выявлена зона фильтрации воды (3), которая могла использоваться в древности как источник водоснабжения. За пределами участка известен каптированный используемый родник "У купальни" (4).

### Аппаратура и оборудование

Для электротомографии использовались генератор Астра-100, измеритель МЭРИ-24 и коммутатор СОМ х 64. Использовалась частота 2.44 или 4.88 Гц, ток от 10 до 100 мА. На некоторых профилях использовалась аппаратура Омега - 48.

Для измерения ЕП использовались неполяризующиеся электроды второго поколения на основе  $\text{Pb}-\text{PbCl}_2$  [Petiau, 2000]. Для измерения напряжений постоянного тока применялся мультиметр с ценой деления 0.1 мВ и входным сопротивлением более 1 МОм.

Неполяризующиеся электроды второго поколения подробно описаны в работе [Petiau, 2000]. За счет ряда технических решений дрейф потенциала электродов не превышает 0.2 мВ/месяц и потенциал поляризации новых электродов не более 0.2 мВ. Этим они отличаются от традиционных  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  электродов, у которых дрейф потенциала может достигать нескольких милливольт в час. В электроде Ж. Петье кроме соли  $\text{PbCl}_2$ , имеющей низкий предел растворимости (10 г/л), в раствор добавлена соль  $\text{NaCl}$  в концентрации до 450 г/л, что уменьшает внутреннее сопротивление электрода ( $\leq 400$  Ом). Рабочий объем электрода заполнен глиной. За счет добавления соляной кислоты  $\text{HCl}$  величина рН находятся в интервале 4-5, где потенциал электродов наиболее стабилен и, в частности, влияние температуры не превышает



**Рисунок 1.** Участок работ около д. Александровки, 1 - городище, 2 - площадь съемки ЕП, 3 - участок фильтрации подземных вод около городища, 4 - известный родник "У купальни".

0.22 мВ/°С, что существенно ниже, чем у меднокупоросных и серебряных электродов. Время работы однажды заряженного электрода - 15 лет.

### Методика измерений, обработка данных, контроль и достигнутая точность

При измерениях потенциала ЕП неподвижный электрод N, был размещен на пойме реки Вори и подключен к отрицательной клемме мультиметра, а измерялся потенциал ЕП подвижного электрода М, перемещаемого по профилю с шагом 1 м. Расстояния между профилями составляли примерно 20 м.

На рис.2 показаны графики для 4 циклов измерений ЕП по одному профилю. Методика 4 циклов измерений и частый шаг по профилю с последующим осреднением профильных данных и их сглаживанием в скользящем окне из 5 точек, сложились в 2011-2012 гг., тогда она имела цель преодолеть сильный дрейф потенциалов электродов Cu/CuSO<sub>4</sub> и случайные ошибки измерений. При использовании электродов Cu/CuSO<sub>4</sub> из 4 циклов измерений два обычно браковались, а два лучших цикла усреднялись для повышения точности и затем сглаживались в скользящем окне из 5 точек.

В 2013 году средняя разница между значениями 4 циклов с рис.2 составила 3.5 мВ, с хорошим совпадением аномалий. С электродами Pb/PbCl<sub>2</sub> все циклы оказались равноценны. Поэтому далее измерения проводили только в два цикла, для осреднения и оценки точности.

Хотя глубокий минимум на 66 метре профиля подтверждается повторными наблюдениями, подобные точечные экстремумы при шаге 1 м не полезны для картирования. Поэтому применялось сглаживание в скользящем окне из 5 точек (Рис.3), ширина окна была выбрана экспериментально.

По нашему опыту электроды Pb/PbCl<sub>2</sub> меняют методику измерения и обработки данных ЕП. Практически нет сползания потенциала электродов, есть лишь влияние качества подготовки лунок.

Для электротомографии межэлектродное расстояние и шаг по профилю составляли 3 м, установка AMN+MNB, минимальный разнос - 4.5 м, максимальный - 121.5 м. Установка AMN + MNB. Профили ЭТ, измеренные в сентябре 2012 года и в сентябре 2013 года, были выполнены с межэлектродным расстоянием и шагом по профилю - 1 м. Разносы менялись от 1.5 м до 36.5 м. В 2008-2009 гг. участок был неоднократно изучен профилями ЭТ, которые также анализировались.

Точность измерений потенциала ЕП в 2012 году с электродами Cu/CuSO<sub>4</sub> менялась от 2.5 до 9 мВ, составляя в среднем 4.2 мВ. Точность измерений в 2013 году с электродами Pb/PbCl<sub>2</sub> составила 2.5 мВ. Основная причина погрешности - качество заземления электродов при рядовых измерениях. Для электродов выкапывается лунка в земле, затем грунт смешивается с водой для получения однородной грязевой смеси. На суглинистых грунтах (на пойме и на склоне плато) такая смесь получается легко, а на самом плато, сложенном сухим песком с обломками камней, качество заземлений заметно хуже. Раздельные оценки для склона и плато показали точность в 1.7-2 мВ на склоне и 2.4-4 мВ на плато.

Привязку координат точек выполняли по GPS с барометром, также делая 100% контроль. Точность определения горизонтальных координат с GPS (в лесу и на склоне)

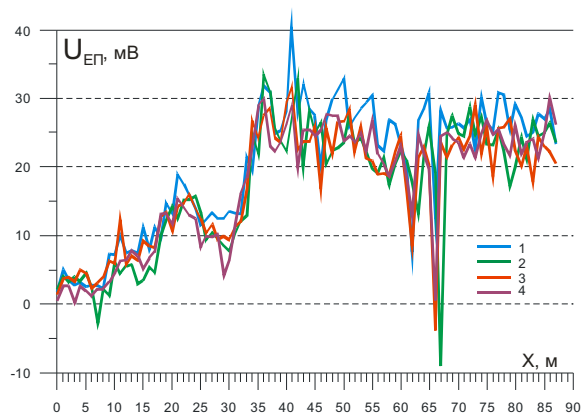


Рисунок 2. Графики потенциала ЕП для 4 циклов измерений по одному профилю.

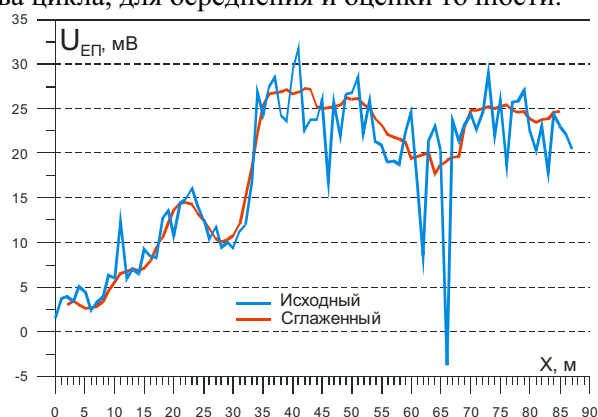
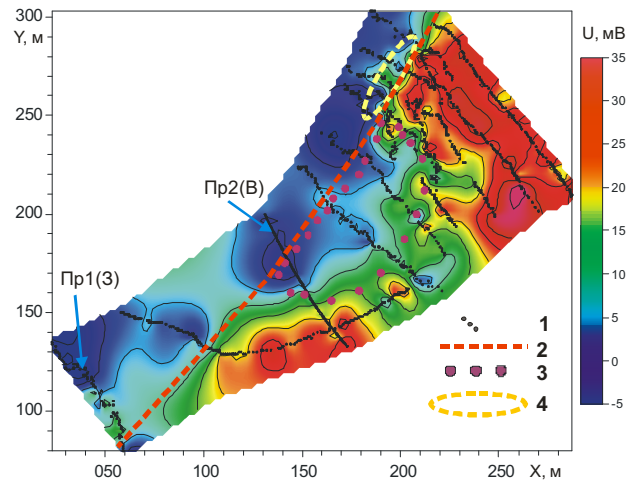


Рисунок 3. Пример исходного и сглаженного по 5 точкам графиков потенциала ЕП.

составила 4 м, высот 2.5 м (лучшая точность оценки высот - 0.35 м). Барометрические высоты дополнительно корректировались привязкой к абсолютным высотным отметкам топокарты.

## Площадные измерения ЕП

Александровское плато отличается повышенными потенциалами ЕП (до 20-30 мВ) (Рис. 4) относительно поймы реки, но в пределах городища потенциалы ЕП снижены (до 8-12 мВ). Так как эта часть плато свыше 4 веков использовалась человеком, природный грунт подвергся изменению (мощность культурного слоя достигла 1 м), и поле ЕП снизилось. Плотность наблюдений выше в восточной части участка, особенно там, где выявлена зона фильтрации и разрежена в западной части.

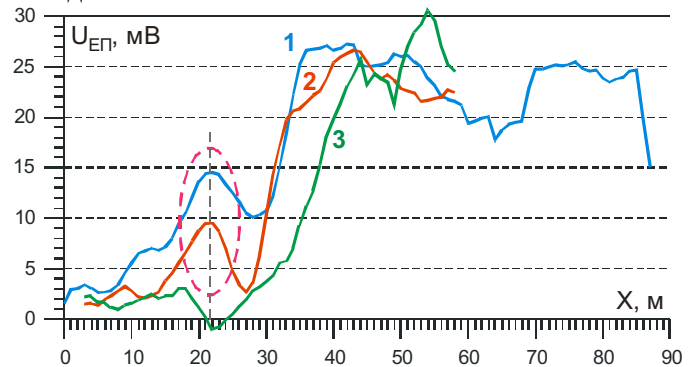


**Рисунок 4.** Участок съемки ЕП. Точечные черные линии - профили ЕП, показаны край плато (2), контуры городища (3) и зона разгрузки воды (4).

## Городище

Александровское городище относится к железному веку, его населяли восточные балты, которые в данной местности формировали мощинскую культуру. Эти племена - земледельцы и скотоводы, вели оседлый образ жизни. Свои поселения они устраивали в хорошо защищенных от нападения местах, дополнительно укрепляя их. Городище имеет форму полукруга и примыкает прямолинейной частью к обрывистому берегу р. Воря. Размеры городища составляют 30 м в ширину и около 100 м в длину. Площадь городища около 2000 м<sup>2</sup>. С северо-запада оно ограничено высоким обрывом, у основания которого протекает река Воря; с другой стороны - системой оборонительных валов и рвов. Валы высотой около 1.5 м расположены в три ряда. На подобных городищах размещалось от одного до пяти дворов. Площадь жилья составляла от 10 до 20 м<sup>2</sup>. Семья включала от 5 до 10 человек, т.е. в городище жило до 50 человек и домашние животные.

Важным вопросом жизни поселения было водоснабжение. Во-первых, вблизи городища протекала р. Воря. Во-вторых - к северо-востоку от городища до сих пор происходит постоянная фильтрация грунтовых вод, где мог быть обустроен родник. По фильтрационной аномалии ЕП (Рис.5) можно количественно оценить возможности водоснабжения из родника.



**Рисунок 5.** Аномалии ЕП на склоне от Александровского плато к р. Воре. Графики 1 и 2 получены над выходом подземных вод (Пк15-28), а график 3 - на участке без фильтрации.

## Фильтрационная аномалия ЕП

Формулу Гельмгольца, связывающую аномалию ЕП и перепад давления  $\Delta P$  [Комаров, 1994], удобнее использовать, заменив перепад давления  $\Delta P$  на скорость фильтрации  $V$ :

$$E_a = \frac{8\xi\varepsilon_0\varepsilon_{отн}\rho\pi}{r^2}V, \quad (1)$$

где  $\xi$  - дзета потенциал, обычно составляющий +(20...50) мВ;

$\varepsilon_0$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость. В системе СИ:  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$\varepsilon_{отн}$  - относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_{отн}=80$ ; (безразмерная величина);

$\rho$  - удельное сопротивление фильтрующей породы (песок), Ом·м;  
 $r$  - радиус капилляров грунта (для песка  $r = 10^{-4}$  м).

Фильтрационная аномалия (Рис.5) имеет рост потенциала в 7 мВ на 5.5 м или  $E=1.27$  мВ/м. Оценив по этим данным скорость течения по формуле:

$$V = \frac{E_a r^2}{8\xi \epsilon_0 \epsilon_{OTH} \rho \pi} \quad (2)$$

для сопротивления водонасыщенного песка в 300 Ом·м, получим скорость в 10 м/сут, что для песка является нормальной величиной коэффициента фильтрации.

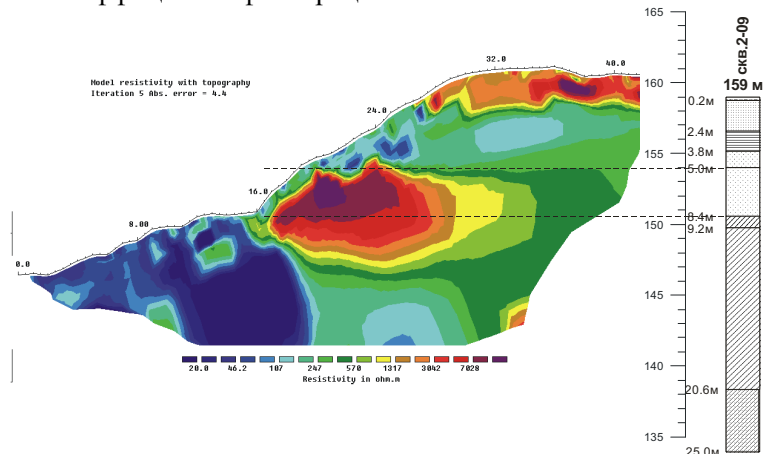
Для расположенного неподалеку родника "У купальни", похожего на наш источник, в июле 2013 года был измерен дебит родника, и он получился равен 15 л/мин или 21.6 м<sup>3</sup>/сут или 78840 м<sup>3</sup>/год.

Геологическое строение края Александровского плато вблизи р.Воря известно по данным электротомографии и бурения (Рис. 6). Разрез сверху вниз состоит из сухих песков мощностью до 2.5 м с  $\rho$  до 5000 Ом·м, под ними моренные суглинки мощностью 2.7 м с  $\rho$  40-80 Ом·м, ниже второй слой песков мощностью 5 м с  $\rho$  300-600 Ом·м и под ними суглинки основания разреза с  $\rho$  40 Ом·м.

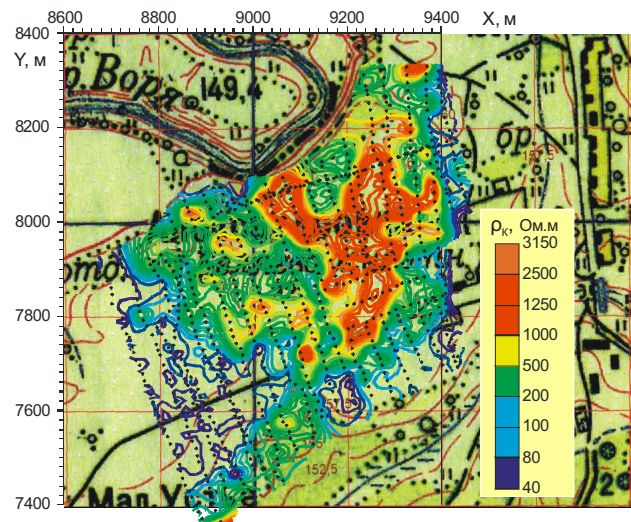
Для родника под Александровским городищем ширины выхода воды 30 м, пласт водоносного песка имеет вертикальную мощность 5 м и часть его водонасыщена (Рис. 5). При скорости фильтрации 10 м/сут, предполагая мощность водонасыщенной части пласта 3 м при пористости песка 0.25 зона фильтрации может дать 225 м<sup>3</sup>/сут воды или 82125 м<sup>3</sup>/год, что похоже на родник "У купальни". При мощности водонасыщенной части пласта в 0.3 м родник может дать до 8212 м<sup>3</sup>/год.

Откуда в земле может взяться такое количество воды? Вода вытекает из флювиогляциальных песков, которые по данным площадного электропрофилеирования занимают на плато площадь  $S$  примерно 500\*520 м или 260000 м<sup>2</sup> (Рис.7). При уровне осадков  $W=600$  мм в год, в землю на площади распространения песков попадает 156000 м<sup>3</sup> воды (Объем  $V=S*W$ ), что вдвое больше дебита родника. При всей приблизительности приведенных расчетов цифры получаются реальными.

Может ли вода, выпавшая на поверхности достичь подошвы второго слоя песков через слой верхнего песка мощностью 2.5 м, слой частично водоупорных суглинков мощностью 2.7 м и второй слой песка мощностью 5 м, и сколько времени это займет? Коэффициент фильтрации суглинков  $K_f$  можно оценить с помощью связи глинистости (в относительных единицах) и  $K_f$   $K_f = C^{-2} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4}$  м/сут [Shevnin et al, 2006]. Сопротивление суглинка 40 Ом·м,



**Рисунок 6.** Геоэлектрический разрез по ЭТ и результаты бурения (скв.2-2009)



**Рисунок 7.** Карта электропрофилеирования Александровского плато

сопротивление воды 24 Ом·м, содержание глины в таком суглинке 20% (0.2). Для такой глинистости Кф по приведенной выше формуле оценивается в 0.018 м/сут. При указанных

выше мощностях трех слоев, время просачивания  $t = \sum_{i=1}^3 H_i / V_i$ , где  $i$  - номер слоя,  $H$  -

мощность слоя, а  $V$  скорость просачивания (равная Кф слоя), получается 42 дня, из которых на суглинки приходится 41 день и менее одного дня на два слоя песка.

Потребление питьевой воды на 1 человека в сутки - 1.5 - 4 л, а с учетом других нужд - до 40 л на человека и до 60 л на голову домашнего скота. Для 50 человек и 10 коров древнего городища получим 2.6 м<sup>3</sup>/сут или 950 м<sup>3</sup>/год. Родник мог бы удовлетворить такие потребности в воде в объеме от 1 до 10% от его дебита.

### Электротомография и ЕП, корреляция полей

По В.А.Комарову [1994] корреляция потенциала ЕП и сопротивления является способом проверки того, что аномалия ЕП имеет диффузионно-адсорбционную (Д-А) природу.

В этом случае разность потенциалов ЕП пропорциональна логарифму отношения удельного сопротивления сравниваемых участков профиля или площади, т.е.

$$\Delta U_{EP} = U_{EP}^{(M)} - U_{EP}^{(N)} = b \cdot \text{Lg}(\rho^{(M)} / \rho^{(N)}), \quad (3)$$

где  $N$  - точка начала профиля (на пойме),  $M$  - рядовая точка на профиле. Значения сопротивления и потенциала ЕП нормируются к значениям своих полей в начальной точке.

В.А. Комаров полагает, что коэффициент пропорциональности  $b$  в ф-ле (3) мало меняется в пределах однородных по составу участков пород, и в разных районах составляет -250 - +50 мВ. Признаком выделения Д-А аномалий ЕП, является именно корреляция ЕП с логарифмом удельного сопротивления по формуле (3).

В нашем случае (Рис.8) величина  $b$  в ф-ле (3) равна 12.5 мВ. Для рис. 8 взяты три профиля электротомографии и совпадающие с ними профили ЕП. Для такой корреляции из данных ЭТ после инверсии извлекались сопротивления первого приповерхностного слоя мощностью около 1 м. Для профиля 1 электротомографии и ЕП сентября 2013 получен коэффициент  $b = 19.8$  мВ, для профиля 2  $b = 33.3$  мВ, что находится в указанных В.А. Комаровым пределах.

### Выводы

Опробование неполяризующихся электродов Петье Рb/РbCl<sub>2</sub> показало, что при их использовании заметно увеличивается точность съемки ЕП.

Вблизи Александровского городища выявлена зона разгрузки подземных вод. Подсчитано, что дебита такого родника было бы достаточно для водоснабжения древних людей этого поселения.

Для выявления аномалий диффузионно-адсорбционного происхождения полезно использовать корреляцию аномалий ЕП и сопротивления грунта. Региональная аномалия ЕП пойма - плато имеет именно такое происхождение.

Комплексирование метода ЕП и электротомографии очень полезно для осмысливания результатов ЕП.

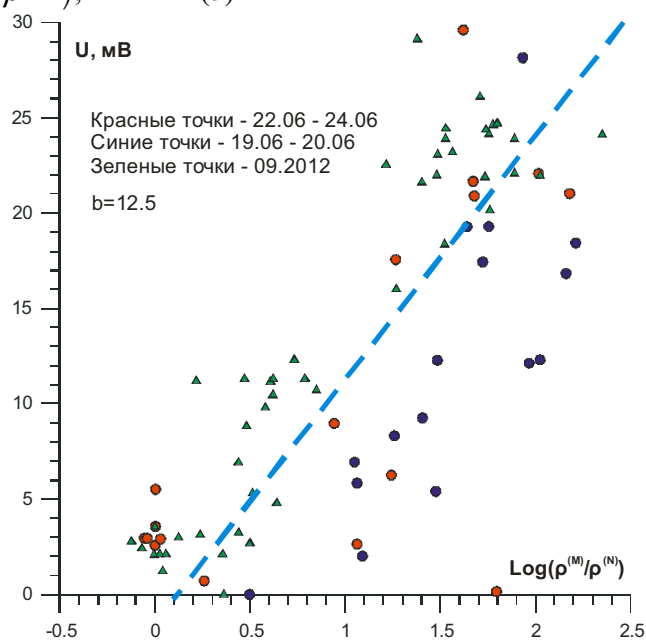


Рисунок 8. Корреляция нормированных величин  $\text{Lg}(\rho/\rho)$  (по оси X) и потенциала  $U$  (по оси Y).

## Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору СПбГУ К.В.Титову за консультации по методу ЕП, по неполяризуемым электродам Петье. Благодарим студентов-магистрантов Д. Квон и Е. Зеркаля, которые принимали участие в сентябрьской практике 2013 г. и в условиях очень скверной погоды обеспечили получение недостающих измерений ЕП и электротомографии.

## Библиография

Бобачев А.А., Волков С.И., Коларов Д.Л., Модин И.Н., Мюллер А., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Комплексные акваторные электроразведочные исследования в восточной части Германии. Разведка и Охрана Недр, 2004, N 5, С. 22 – 27. ISSN 0034-026X.

Комаров В.А. – Геоэлектрохимия: Уч. пособие. 1994. С-Петербург. СПб ун-т, 136 с.

Bolève A., Revil A., Janod F., Mattiuzzo J.L. and Fry J.-J. Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. Near Surface Geophysics, 2009, 447-462.

Husband C. R., Cassidy N. J. and Stimpson I. G. The geophysical investigation of lake water seepage in the regulated environment of the Bosherton Lily Ponds, South Wales, UK. Part 1: natural, fracture-related pathways. Near Surface Geophysics, 2009, 499-515.

Petiau G. Second generation of lead - lead chloride electrodes for geophysical applications. Pure and applied geophysics. 157 (2000) 357–382.

Shevnin V., Delgado-Rodríguez O., Mousatov A. and Ryjov A. 2006. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. Geofísica Internacional, Vol. 45, Num. 3, pp. 195-207.

## Контактная информация

Шевнин Владимир Алексеевич, [shevninvlad@yandex.ru](mailto:shevninvlad@yandex.ru)