УДК 550.837

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВСКОГО ГОРОДИЩА (КАЛУЖСКАЯ ОБЛАСТЬ)

В.А.ШЕВНИН, *д-р физ.-мат. наук, профессор, shevninvlad@yandex.ru*
А.А.БОБАЧЕВ, *канд. физ.-мат. наук, доцент, bobachev@gmail.com*
С.В.ИВАНОВА, *инженер, ivnsvt@gmail.com*
Московский государственный университет, Россия

Александровское городище (памятник археологии) находится в Калужской области на берегу р.Вори вблизи базы учебных геофизических практик МГУ в дер.Александровка. Работы методом естественного электрического поля (ЕП) в 2013 г. впервые проводились с неполяризующимися электродами второго поколения, сменившими медно-купоросные электроды ВИРГ, что позволило заметно поднять качество работ. Данные ЕП рассматривались совместно с электротомографией. Были откартированы фильтрационные аномалии (места разгрузки подземных вод); доказано диффузионно-адсорбционное происхождение региональной аномалии ЕП (пониженные значения потенциалов на пойме и повышенные на 30 мВ потенциалы на плато), установлено, что зона Александровского городища отмечается понижением потенциала ЕП.

Ключевые слова: метод естественного поля (ЕП), электротомография, неполяризующиеся электроды, фильтрационные аномалии ЕП, диффузионно-адсорбционные аномалии ЕП.

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 [3]. На смену традиционным неполяризующимся электродам с $Cu/CuSO_4$ французским специалистом Ж.Петье были разработаны новые неполяризующиеся электроды (так называемые электроды второго поколения) с $Pb/PbCl_2$ [5]. 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 [4]. Совместное использование данных ЕП и метода сопротивлений (электротомографии) помогает пониманию природы аномалий ЕП и их количественной интерпретации [1-3].

Аппаратура. Для измерения ЕП использовались неполяризующиеся электроды второго поколения на основе $Pb/PbCl_2$. Для измерения напряжений постоянного тока применялся мультиметр с ценой деления 0,1 мВ и входным сопротивлением более 1 МОм.

Для электротомографии использовались генератор Астра-100, измеритель МЭРИ-24 и коммутатор COM x 64. Использовалась частота 2,44 или 4,88 Гц, ток от 10 до 100 мА.

Используемые неполяризующиеся электроды. Неполяризующиеся электроды второго поколения [5] изготовлены на основе $Pb/PbCl_2$. 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 электродов $Cu/CuSO_4$, у которых дрейф потенциала может достигать нескольких милливольт в час. В электроде Ж.Петье кроме соли $PbCl_2$, имеющей низкий предел растворимости (10 г/л), в раствор добавлена соль NaCl в концентрации до 450 г/л, что уменьшает внутреннее сопротивление электрода ($\leq$ 400 Ом). За счет добавления соляной кислоты HCl величина pH находится в интервале 4-5, где потенциал электродов наиболее стабилен и, в частности, влияние темпера-

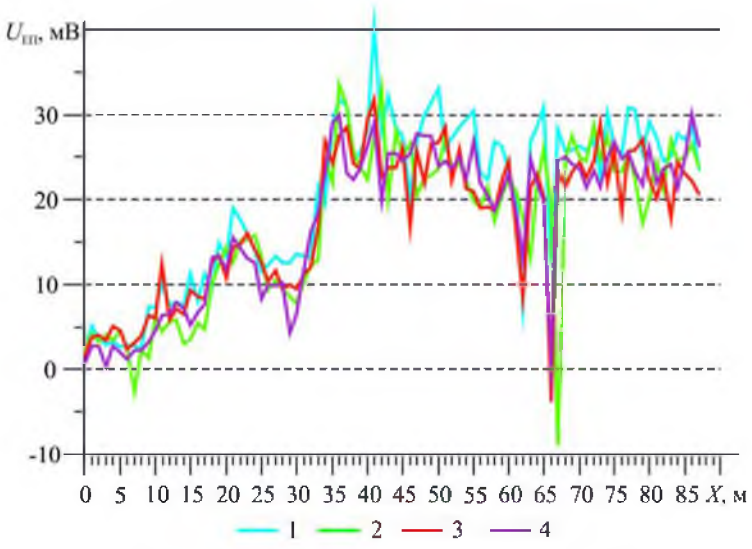


Рис.1. Графики потенциала ЕП для циклов 1-4 измерений по одному профилю

туры не превышает 0,22 мВ/°С, что существенно ниже, чем у медно-купоросных и серебряных электродов. Время работы однажды заряженного электрода 15 лет.

Методика измерений и обработки данных. В методе ЕП неподвижный электрод *N*, был размещен на пойме р.Вори и подключен к отрицательной клемме мультиметра, а измерялся потенциал ЕП перемещаемого по профилю с шагом 1 м подвижного электрода *M*. Расстояния между профилями составляли примерно 20 м. На рис.1 показаны графики для четырех циклов измерений ЕП по одному профилю. Методика четырех циклов измерений и частый шаг по профилю с последующим осреднением профильных данных и их сглаживанием в скользящем окне из пяти точек, сложилась в 2011-2012 гг. Тогда она имела цель преодолеть сильный дрейф потенциалов электродов $Cu/CuSO_4$ и случайные ошибки измерений. При использовании электродов $Cu/CuSO_4$ из четырех циклов измерений два обычно браковались, а два лучших цикла усреднялись для повышения точности и затем сглаживались в скользящем окне из пяти точек.

В 2013 г. средняя разница между значениями яетырех циклов с рис.1 составила 3,5 мВ с хорошим совпадением аномалий. С электродами $Pb/PbCl_2$ все циклы оказались равноценны. Поэтому далее измерения проводили только в два цикла для осреднения и оценки точности.

Хотя глубокий минимум на 66-м метре профиля подтверждается повторными наблюдениями, подобные точечные экстремумы при шаге 1 м не полезны для картирования. Поэтому применялось сглаживание в скользящем окне из пяти точек (рис.2), ширина окна была выбрана экспериментально.

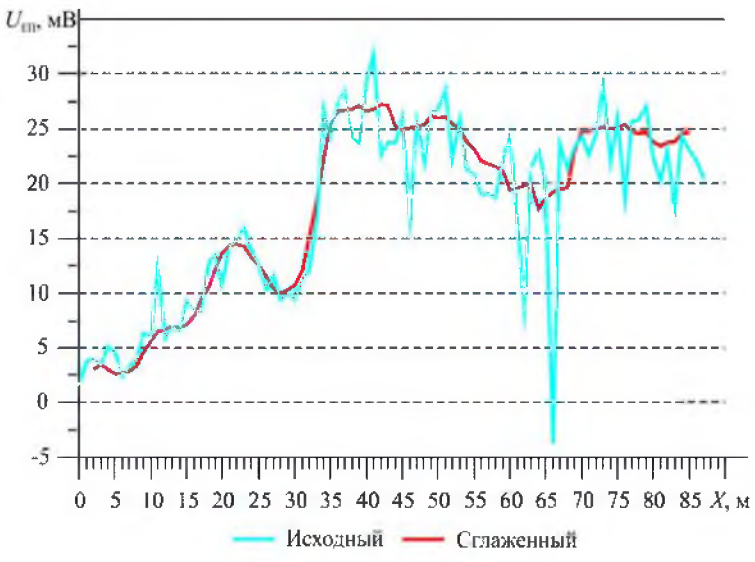


Рис.2. Пример исходного и сглаженного по пяти точкам графиков потенциала ЕП

По нашему опыту электроды $Pb/PbCl_2$ 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. Один профиль ЭТ, измеренный в сентябре 2012 г., был выполнен с межэлектродным расстоянием и шагом по профилю 1 м. Раз-

носы менялись от 1,5 м до 36,5 м. В 2008-2009 гг. участок был неоднократно изучен профилями ЭТ, которые также анализировались.

Контроль и достигнутая точность. Точность измерений потенциала ЕП в 2012 г. с электродами $Cu/CuSO_4$ менялась от 2,5 до 9 мВ, составляя в среднем 4,2 мВ. Точность измерений в 2013 г. с электродами $Pb/PbCl_2$ 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 лунок хуже. Раздельные оценки для склона и плато показали точность в 1,7-2 мВ на склоне и 2,4-4 мВ на плато.



Рис.3. Участок съемки ЕП. Сплошные линии – профили ЕП, штриховые – ЭТ, показаны контуры городища (Г) и зона разгрузки воды (Ф)

Привязку координат точек выполняли по GPS с барометром, также делая 100-процентный контроль. Точность определения горизонтальных координат с GPS (в лесу и на склоне) составила 4 м, высот 2,5 м (лучшая точность оценки высот 0,35 м). Барометрические высоты дополнительно корректировались привязкой к абсолютным высотным отметкам топокарты.

Применение метода ЕП в 2013 г. Метод ЕП в 2013 г. использовался вблизи Александровского городища на переходе от Александровского плато к р.Воря (рис.3). Здесь съемками 2008-2011 гг. выявлено наличие нулевого потенциала ЕП на пойме р.Вори и повышенного (до 25-30 мВ) на плато (рис.4). Размах аномалии в 30 мВ позволяет ее уверенно регистрировать. Эта аномалия имеет предположительно диффузионно-адсорбционную (Д-А) природу. На фоне этой аномалии на некоторых профилях обнаруживаются небольшие положительные фильтрационные аномалии потенциала амплитудой 5-6 мВ как на точке 22 м (рис.4, кривые 1, 2), сопровождающие выходы подземных вод на поверхность.

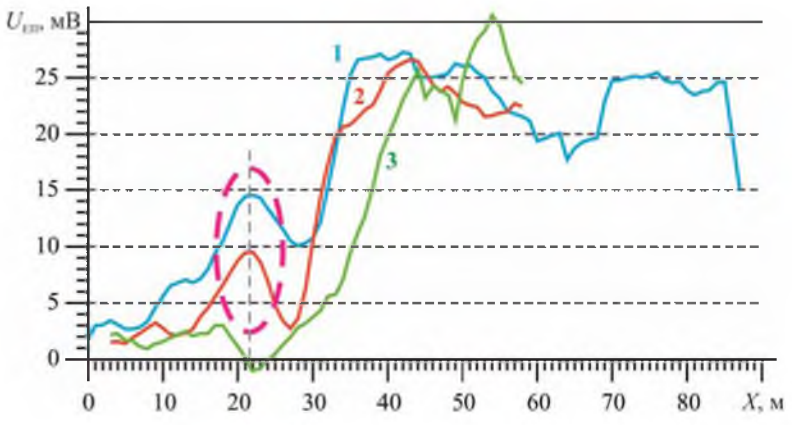


Рис.4. Аномалии ЕП на склоне от Александровского плато к р.Воря
1 и 2 – над выходом подземных вод (Пк15-28); 3 – на участке без фильтрации

В 2013 г. участок площадью 120 × 220 м (см. рис.3) был пересечен 12 профилями (997 точек измерений) и лишь на части из них выявлены

фильтрационные аномалии. Плато и склон сложены ледниковыми отложениями четвертичного возраста, представляющими собой чередование флювиогляциальных песков и моренных суглинков, подземная вода движется по пескам, а подстилающие суглинки являются водоупорным слоем. В местах разгрузки воды (к северо-востоку от городища) вблизи р.Воря суглинки превращаются в липкую грязь, пройти по которой трудно даже в сапогах. В местах без фильтрации воды нет аномалии ЕП (см. рис.4, кривая 3), грунт сухой и профиль легко проходимый.

По трем профилям была выполнена электротомография (ЭТ), и в результате инверсии получены геоэлектрические разрезы, отражающие геологический разрез участка. На разрезе ЭТ (рис.5) хорошо видны два слоя песков, разделенных и подстилаемых моренными суглинками. На контакте нижнего слоя песков и подстилающих суглинков наблюдается разгрузка подземных вод. Профиль ЭТ, показанный на рис.5, попадает в зону разгрузки воды. Для сравнения на этом же рисунке показан разрез скважины 2 2009 г., находящейся в 200 м южнее профиля.

Карта потенциала и ее описание. На карте потенциала ЕП (рис.6) 2013 г. видны три группы объектов: места разгрузки подземных вод (4); границы Александровского городища (3); зона Д-А аномалии ЕП на переходе от поймы р.Вори к Александровскому плато. Граница плато отмечена штриховой линией 2. Профили преобладают в северо-восточной части участка в связи с ее большей доступностью и наличием интересующей нас зоны выхода подземных вод.

Александровское городище. Александровское плато отличается повышенными потенциалами ЕП (до 20-30 мВ), но в пределах городища потенциалы ЕП снижены (до 8-12 мВ). Так как эта часть плато более 4 столетий использовалась человеком, природный грунт подвергся изменению (мощность культурного слоя достигла 1 м), и поле ЕП снизилось.

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^2. С северо-запада оно ограничено высоким обрывом, у основания которого протекает р.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^2. 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 можно количественно оценить возможности водоснабжения из родника.

Фильтрационная аномалия ЕП. Формулу Гельмгольца, связывающую аномалию ЕП и перепад давления ΔP [2], удобнее использовать, заменив перепад давления ΔP на скорость фильтрации V:

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

где ξ – дзета-потенциал, обычно $\xi = +(20\div50)$ мВ; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_0 = 8{,}85\div10^{-12}$ Ф/м; $\varepsilon_{\text{отн}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_{\text{отн}} = 80$ (безразмерная величина); ρ – удельное сопротивление фильтрующей породы (песок), Ом·м; r – радиус капилляров грунта, для песка $r = 10^{-4}$ м.

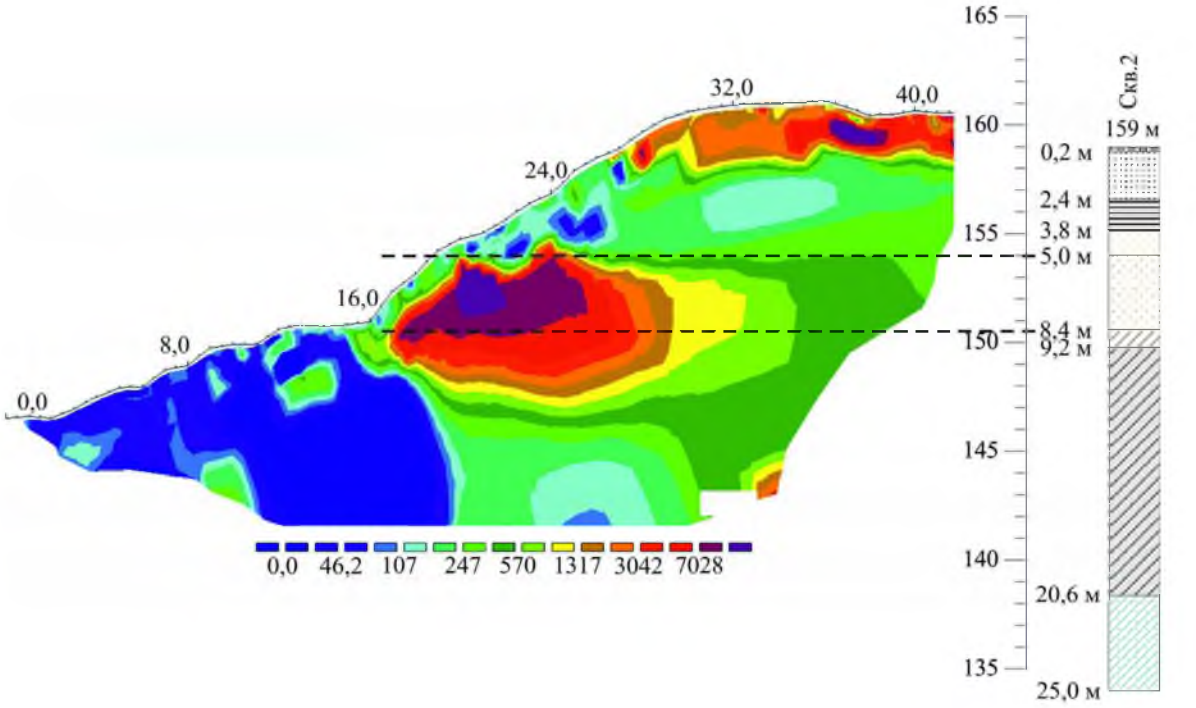


Рис.5. Геоэлектрический разрез ЭТ (11.06.2008) и результаты бурения (скв.2-2009)

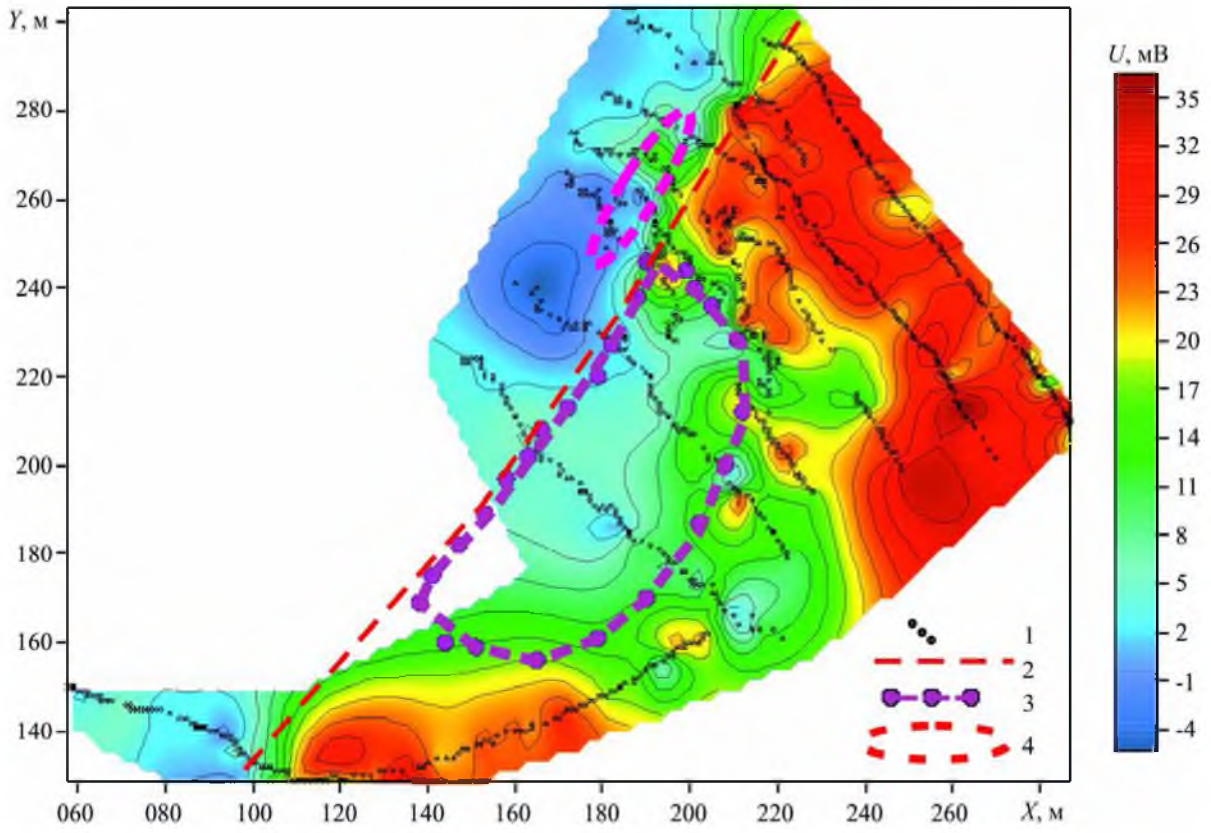


Рис.6. Карта потенциала ЕП по результатам съемки 2013 г.

1 – точки измерения; 2 – край плато; 3 – граница городища; 4 – зона выхода подземных вод

Фильтрационная аномалия (см. рис.4) имеет рост потенциала в 7 мВ на 5,5 м или E = 1,27 мВ/м. Оценив по этим данным скорость течения

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

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

Для расположенного неподалеку родника «У купальни», похожего на наш источник, в июле 2013 г. был измерен дебит родника; он равен 15 л/мин или 21,6 м^3/сут, или 78840 м^3/год.

Для родника под Александровским городищем ширина выхода воды 30 м, пласт водоносного песка имеет вертикальную мощность 5 м и часть его водонасыщена (см. 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^3/сут воды или 82125 м^3/год, что похоже на родник «У купальни». При мощности водонасыщенной части пласта в 0,3 м родник может дать до 8212 м^3/год.

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

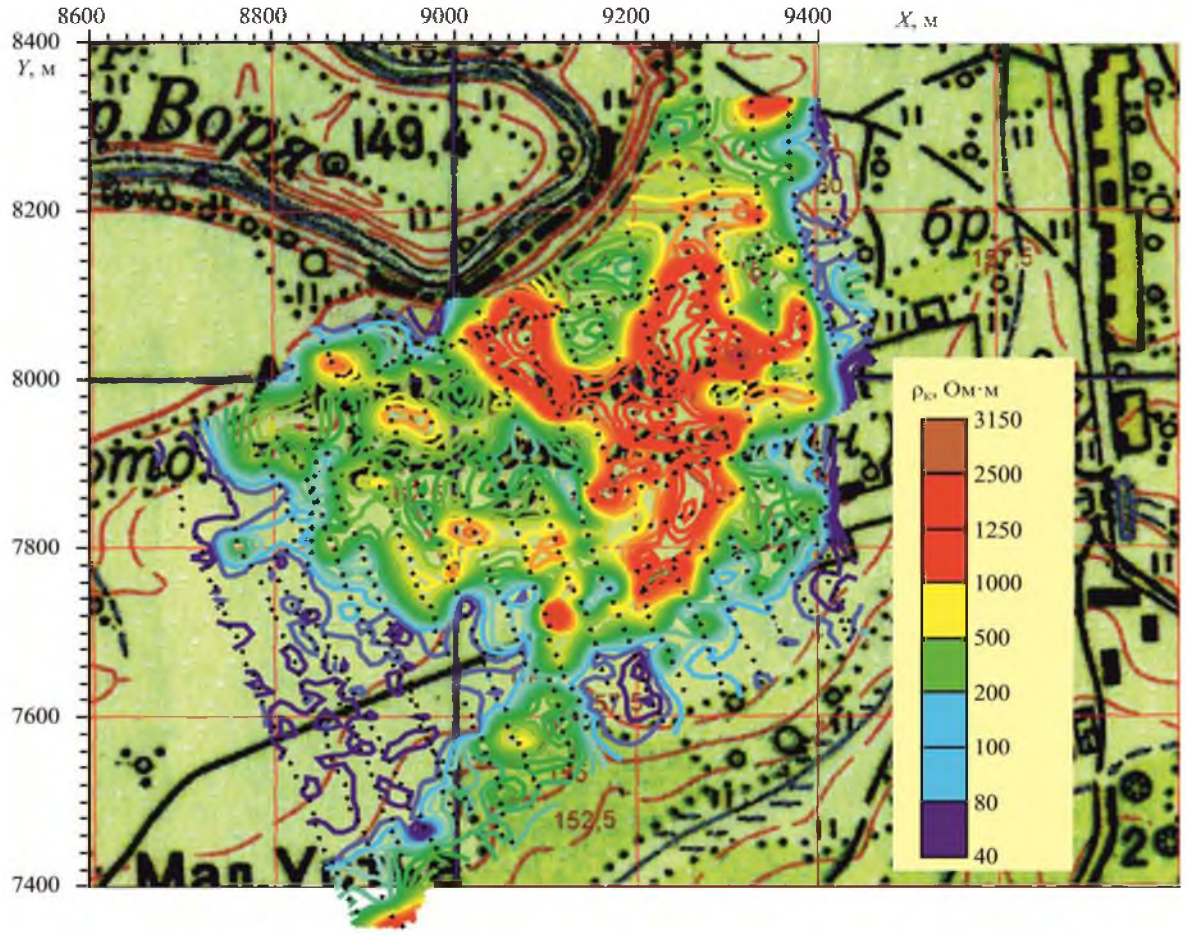


Рис.7. Карта электропрофилирования Александровского плато

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 $K_ф$ можно оценить с помощью связи глинистости (в относительных единицах) и $K_ф$: $K_ф = C^{-2} \cdot 7{,}2 \cdot 10^{-4}$ м/сут [5]. Сопротивление суглинка 40 Ом·м, сопротивление воды 24 Ом·м, содержание глины в таком суглинке 20 %. Для такой глинистости $K_ф$ оценивается в 0,018 м/сут, время просачивания $t = \sum_{i=1}^{3} H_i / V_i$, где i – номер слоя; H – мощность слоя; V – скорость просачивания, равная $K_ф$ слоя. При указанных выше мощностях трех слоев 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^3/сут или 950 м^3/год. Родник мог бы удовлетворить такие потребности в воде в объеме от 1 до 10 % от его дебита.

Корреляция потенциала и электрического сопротивления. По В.А.Комарову [1], 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.

$$\Delta U_{ЕП} = U_{ЕП}^{(M)} - U_{ЕП}^{(N)} = bLg(\rho^{(M)} / \rho^{(N)}), \qquad (3)$$

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 формуле (3) мало меняется в пределах однородных по составу участков пород и в разных районах составляет от –250 до +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 формуле (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.

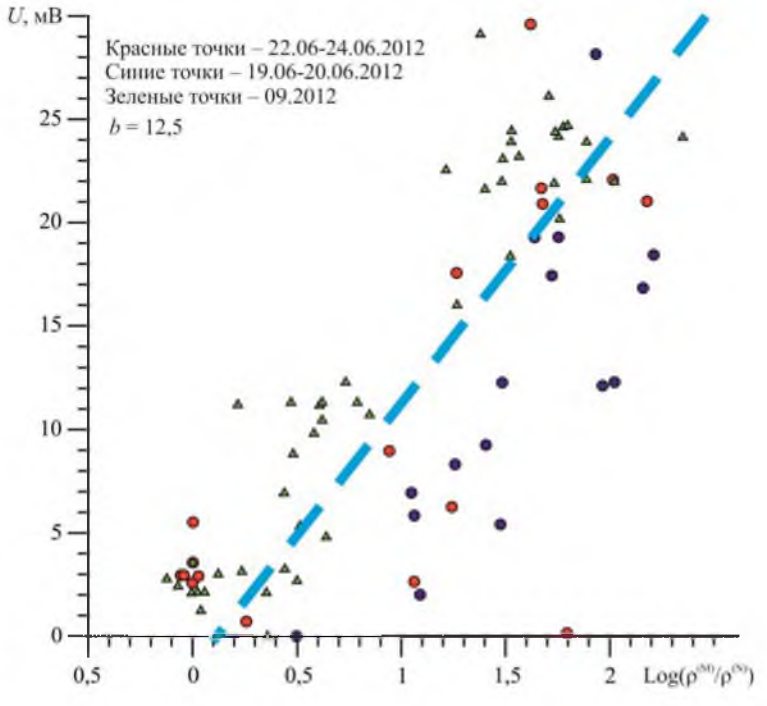


Рис.8. Корреляция нормированных величин Lg(ρ/ρ) (по оси X) и потенциала U (по оси Y)

Выводы. Опробование неполяризующихся электродов Петье $Pb/PbCl_2$ 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 осмысления результатов ЕП.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Комаров В.А.* Геоэлектрохимия. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та. 1994. 136 с.
2. Комплексные акваторные электроразведочные исследования в восточной части Германии / А.А.Бобачев, С.И.Волков, Д.Л.Коларов, И.Н.Модин, А.Мюллер, Е.В.Перваго, В.А.Шевнин // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С.22-27.
3. *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. P.447-462.
4. *Husband C.R., Cassidy N.J. and Stimpson I.G.* The geophysical investigation of lake water seepage in the regulated environment of the Bosherston Lily Ponds, South Wales, UK. Part 1: natural, fracture-related pathways. Near Surface Geophysics, 2009. P.499-515.
5. *Petiau G.* Second Generation of Lead-lead Chloride Electrodes for Geophysical Applications. Pure and applied geophysics. 157 (2000). P.357-382.
6. *Shevnin V., Delgado-Rodríguez O., Mousatov A. and Ryjov A.* Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. Geofísica Internacional. 2006.Vol.45. N 3. P.195-207.

REFERENCES

1. *Komarov V.A.* Geojelektrohimija (*Geoelectrochemistry*). St Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo un-ta. 1994, p.136.
2. *Bobachev A.A., Volkov S.I., Kolarov D.L., Modin I.N., Mjuller A., Pervago E.V., Shevnin V.A.* Kompleksnye akvatornye jelektrorazvedochnye issledovanija v vostochnoj chasti Germanii (*Integrated aquatorial electrical studies in Eastern part of Germany*). Razvedka i ohrana nedr. 2004. N 5, p.22-27.
3. *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, p.447-462.
4. *Husband C.R., Cassidy N.J. and Stimpson I.G.* The geophysical investigation of lake water seepage in the regulated environment of the Bosherston Lily Ponds, South Wales, UK. Part 1: natural, fracture-related pathways. Near Surface Geophysics. 2009, p.499-515.
5. *Petiau G.* Second Generation of Lead-lead Chloride Electrodes for Geophysical Applications. Pure and applied geophysics. 157 (2000), p.357-382.
6. *Shevnin V., Delgado-Rodríguez O., Mousatov A. and Ryjov A.* Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. Geofísica Internacional. 2006.Vol.45. N 3, p.195-207.

RESULTS OF APPLYING SELF-POTENTIAL METHOD AND ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY TO STUDY ALEXANDROVSKY SETTLEMENT (KALUGA REGION)

V.A.SHEVNIN, *Dr. of Physics and Mathematics, Professor, shevninvlad@yandex.ru*
A.A.BOBACHEV, *PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, bobachev@gmail.com*
S.V.IVANOVA, *Engineer, ivnsvt@gmail.com*
Moscow State University, Russia

Alexandrovsky ancient settlement is situated in the Kaluga region near the river Voria and Alexandrovka village. Self potential (SP) measurements with new non-polarizing electrodes of the second generation instead of traditional copper-copper sulfate electrodes were performed in 2013 and increased the quality of measurements. SP data were analyzed together with electrical resistivity tomography (ERT). The authors found filtration SP anomalies and proved that the main SP anomaly has diffusion-adsorption origin, determined that the Alexandrovsky site of the ancient settlement has decreased SP values.

Key words: self potential survey (SP), electrical resistivity tomography, non-polarizing electrodes, filtration SP anomalies, diffusion-adsorption SP anomalies.