

УДК 550.837.3

В.А. Шевнин¹

РАСПОЗНАВАНИЕ АНОМАЛИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДИФфуЗИОННО-АДСОРБЦИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Диффузионно-адсорбционные (ДА) потенциалы являются одними из трех основных аномалий в методе естественного поля (ЕП), но редко вызывают практический интерес, в отличие от аномалий окислительно-восстановительного и фильтрационного происхождения. Однако эти аномалии встречаются повсеместно и их нередко ошибочно принимают за аномалии иного происхождения. Способом распознавания ДА аномалий можно считать корреляцию поля ЕП и поля кажущихся сопротивлений. На учебной геофизической практике студентов МГУ имени М.В. Ломоносова в Калужской области получено немало профилей, на которых зафиксированы аномалии ЕП и коррелированные с ними изменения кажущегося сопротивления, что позволяет считать происхождение аномалий ЕП результатом диффузионно-адсорбционных процессов.

Ключевые слова: метод естественного электрического поля (ЕП), диффузионно-адсорбционные аномалии, распознавание природы аномалий ЕП, сочетание значений потенциала ЕП с сопротивлением и нормализованной поляризуемостью.

Diffusion and adsorption (DA) potentials are frequently the sources of self-potential anomalies, but they not arouse such practical interest as anomalies of red-ox and filtration origin. DA anomalies can be found everywhere and geophysicists sometimes make mistakes considering DA anomalies as examples of filtration anomalies. Identification of DA anomalies is based on correlation of SP and apparent resistivity values along the same profiles. At MSU students geophysical practice in Kaluga region we obtained profiles with SP and resistivity anomalies with good correlation between them. That fact allows consider such SP anomalies as a result of DA processes.

Key words: Self potential (SP) method, diffusion and adsorption (DA) anomalies, identification of SP anomalies origin, integration of SP potential values with resistivity and normalized chargeability.

Введение. Аномалии в методе естественного электрического поля (ЕП) порождаются несколькими процессами: окислительно-восстановительными на электропроводящих объектах, фильтрационными при движении воды в пористых средах и диффузионно-адсорбционными (ДА), связанными с зонами изменения солёности грунтовых вод, сменой литологии пород, с изменениями адсорбционных свойств и влажности пород. Естественные электрические поля существуют на земной поверхности повсеместно, хотя далеко не всегда встречаются электропроводящие руды или зоны активной фильтрации подземных вод. Можно предполагать, что в отсутствие окислительно-восстановительных и фильтрационных аномалий естественное поле отражает влияние ДА процессов. В ряде случаев геофизики допускают ошибки, когда ДА аномалии принимают за фильтрационные. Возможность распознавания ДА аномалий описана в работах [Семенов, 1980; Комаров, 1994] и основана на корреляции потенциала ЕП и сопротивления. На учебной практике студентов МГУ имени М.В. Ломоносова в Калужской области в течение ряда лет измеряли поля ЕП и сопротивления по одним и тем же профилям; таким

образом, был накоплен материал по изучению ДА аномалий ЕП.

Метод изучения. Измерения естественного электрического поля проводились по методике потенциала (один электрод неподвижен, а другой движется по профилю). Шаг наблюдений составлял 1 м, длина каждого профиля не превышала 100 м, поэтому не было необходимости переносить неподвижный электрод. Использовались неполяризуемые электроды Петье [Petiau, 2000], представляющие собой свинец в растворе хлористого свинца. Точность съёмки с электродами Петье составила в условиях практики студентов 2,5 мВ (при 100%-ном контроле). Для измерений электрического поля использовался мультиметр с ценой деления 0,1 мВ и входным сопротивлением свыше 1 МОм. По тем же профилям выполнялись измерения методом ЭП-ВП [Шевнин и др., 2016] с установкой Шлюмберже (AB=5 м, MN=1 м, шаг по профилю 1 м). Использовались генератор «Астра» и измеритель «МЭРИ», разработанные фирмой «Северо-Запад». Графики кажущегося сопротивления (и вызванной поляризации) сопоставлялись с ЕП для изучения ДА аномалий. Плановая привязка точек измерения выполнялась

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизики, доцент, докт. физ.-мат. н.; e-mail: shevninvlad@yandex.ru

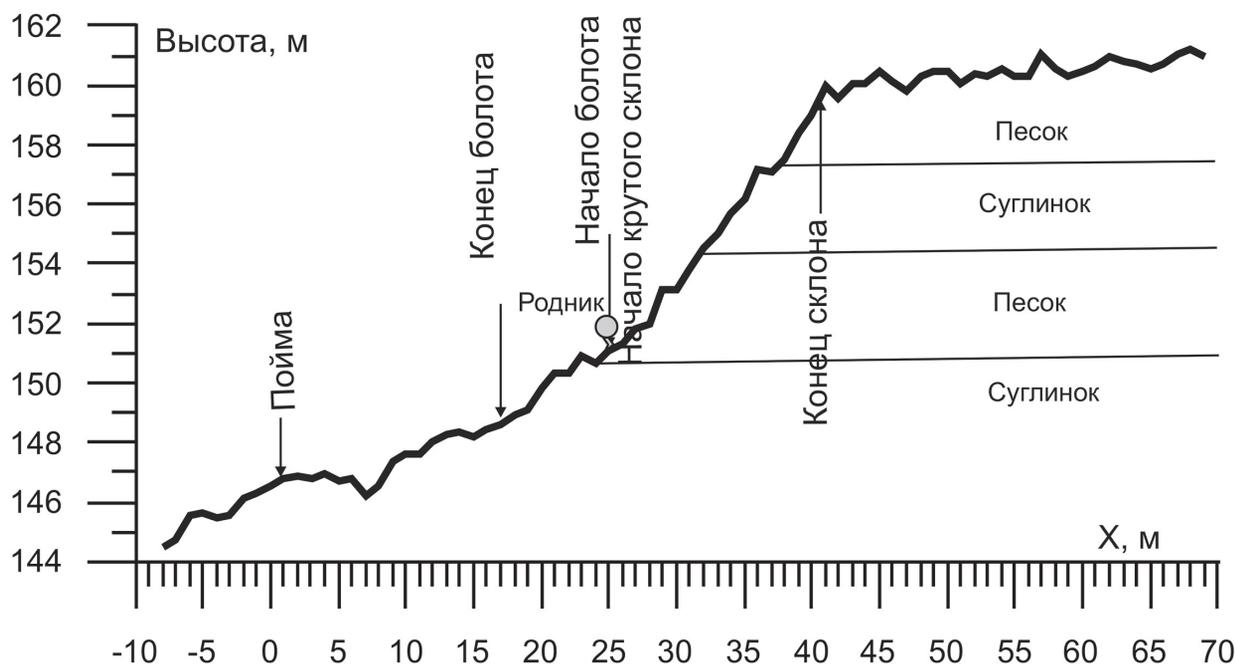


Рис. 1. Схематический разрез склона от реки к плато, где проводились измерения ЕП, сопротивления и ВП

с помощью GPS, высотная привязка — по встроенному в GPS барометру с корректировкой высот по топокарте.

Все профили проходили в сходных геологических условиях с поймы р. Воря, сложенной суглинками, с подъемом на Александровское плато, возвышающееся над поймой на 10–20 м (рис. 1). Участок работ сложен четвертичными ледниковыми отложениями (моренными суглинками и флювиогляциальными песками). Участок вытянут вдоль берега реки на 600 м, его ширина около 100 м. В разрезе четвертичных отложений до глубины 20 м прослеживаются два цикла оледенения, и в пределах каждого профиля встречаются два слоя суглинков (с $\rho=30\div70$ Ом·м) и два слоя песков (с $\rho=120\div5000$ Ом·м). Уровень грунтовых вод находился на глубине около 10 м от поверхности плато, поэтому на плато сформировалась мощная зона аэрации с объемной влажностью песков вблизи поверхности 1–2% и сопротивлением до 5000 Ом·м. Неподвижный электрод ЕП устанавливали на пойменных суглинках вблизи реки, и его потенциал принимали за ноль. Потенциал на сложенной песком поверхности плато достигал 25–30 мВ относительно ноля на пойменных суглинках. Соленость грунтовых вод в среднем составляла 0,24 г/л.

На рис. 2 представлена карта потенциала ЕП, снятая в ходе практики студентов МГУ имени М.В. Ломоносова в 2013–2016 гг. Общее число точек измерения ЕП составило 3000. В северо-западной части карты находится пойма р. Воря, сложенная суглинками, в юго-восточной — воз-

вышенное Александровское плато, покрытое песками. Наиболее сильные аномалии ЕП находятся в восточной части участка, где присутствует два слоя песков. В западной части участка верхний слой песков отсутствует и величина аномалии потенциала в 2 раза слабее. Цель работы — объяснить происхождение изображенной на карте положительной аномалии ЕП.

Основы возникновения ДА аномалий ЕП. По данным работ [Семенов, 1980; Дахнов, 1982], диффузионный потенциал зависит от валентности ионов, их подвижности, разной концентрации ионов в соприкасающихся средах, а также от температуры и ряда других факторов:

$$\Delta U_D = \frac{u_+ - u_-}{u_+ + u_-} \cdot \frac{RT}{nF} \ln \frac{\gamma_2 m_2}{\gamma_1 m_1}, \quad (1)$$

где R, F и T — известные физические постоянные и абсолютная температура соответственно; u_+ , u_- и n — подвижность и валентность ионов; γ_1 , γ_2 , m_1 , m_2 — значения коэффициентов активности и концентрации ионов соответственно. При концентрации соли, отличающейся в несколько раз, значение диффузионного потенциала не будет превышать нескольких милливольт, а при значениях концентрации, отличающейся в 100–1000 раз, оно может достигать 23–35 мВ. Сильные изменения солености в верхней части разреза изучаемого участка нами не отмечены, поэтому диффузия не рассматривалась в качестве причины возникновения ДА аномалий.

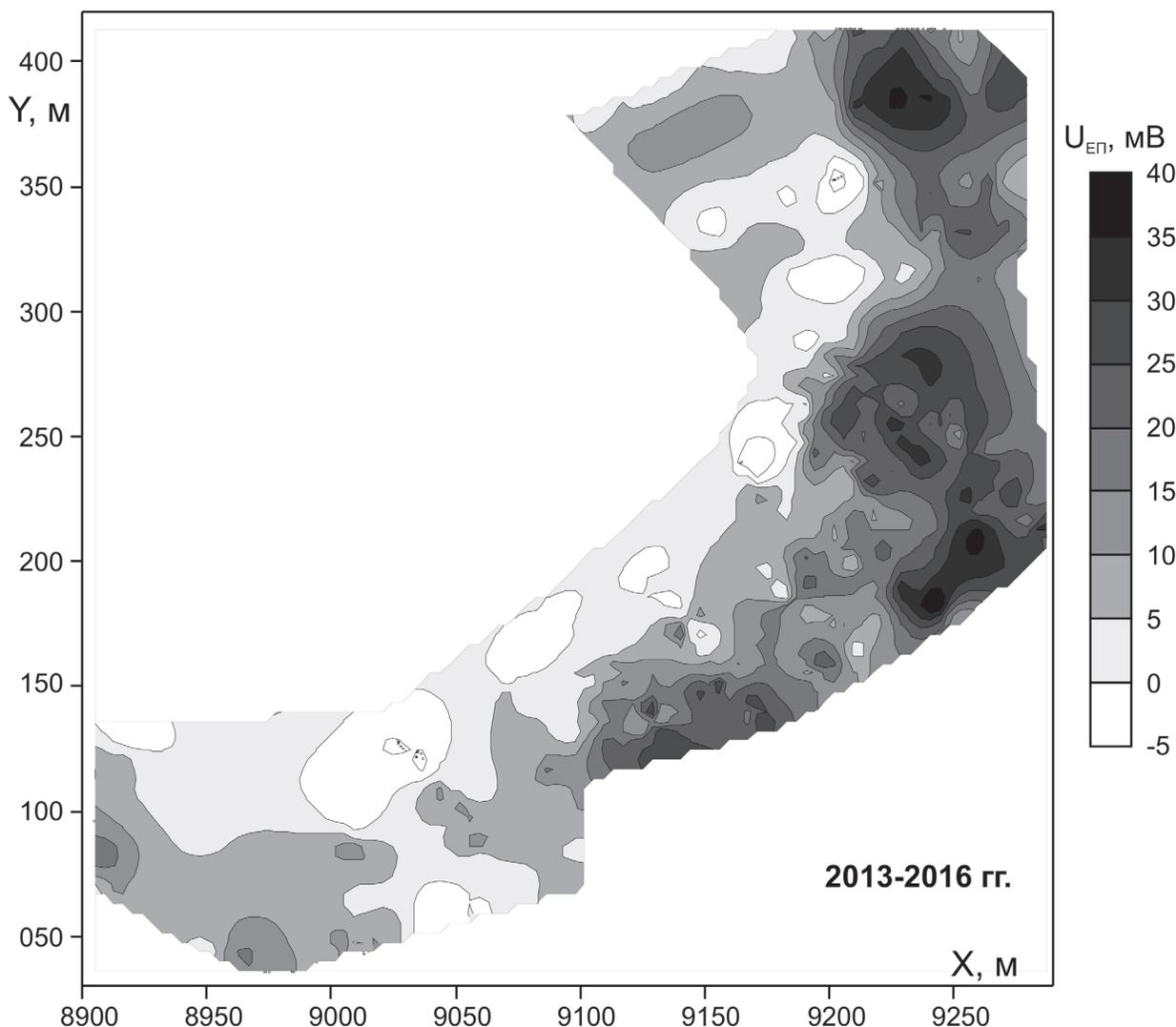


Рис. 2. Карта потенциала ЕП, составленная по результатам работ в 2013–2016 гг.

Диффузионные процессы в реальных геологических средах сопровождаются адсорбцией, особенно в мелкопористых или слабонасыщенных водой породах. Действуя совместно с диффузионными, они определяют особое электрохимическое свойство горных пород, которое В.Н. Дахнов назвал диффузионно-адсорбционной активностью. Скачки потенциала на границе водосодержащих пористых сред, обусловленные этими процессами, называются диффузионно-адсорбционными потенциалами. В природной обстановке, особенно в приповерхностной области, широкая распространенность диффузионно-адсорбционных потенциалов (полей) не вызывает сомнений [Семенов, 1980].

Фактор, дополнительно влияющий на результаты наблюдений ЕП, — разные условия заземления. Контакт насыщенного электролитом пористого сосуда (измерительного электрода) с почвой является сложной системой, в которой создается ДА потенциал, зависящий от свойств почвы и соприкасающегося с ней электрода. ДА потенциалы достигают наибольших значений в случае тонко-

пористых пород при их малой водонасыщенности и незначительной минерализации поровых вод. Один из признаков проявления неидентичности условий заземлений — плохая воспроизводимость наблюдений. Например, погрешность измерений ЕП в условиях практики составляла 1,7–2 мВ на суглинках и 2,4–4 мВ на сухих песках.

На рис. 3 показаны графики изменения сопротивления (толстые черные линии) и объемной влажности (штриховые линии) с глубиной. Эти графики привязаны к положению границ слоев разного литологического состава на участке работ. Сопротивление слоев и их изменения определены по методам ВЭЗ, электротомографии и ЭП-ВП, а влажность оценивалась по величине сопротивления, как это изложено в работе [Рыжов, Шевнин, 2014]. Колебания влажности в разрезе составляли 1–20%, колебания сопротивлений — 40–5000 Ом·м (т.е. изменялись в 100 раз и более).

Из формулы из работы В.А. Комарова [1994] следует, что:

$$\Delta U_{EP} = U_{EP}^{(M)} - U_{EP}^{(N)} = b \cdot Lg(\rho^{(M)} / \rho^{(N)}), \quad (2)$$

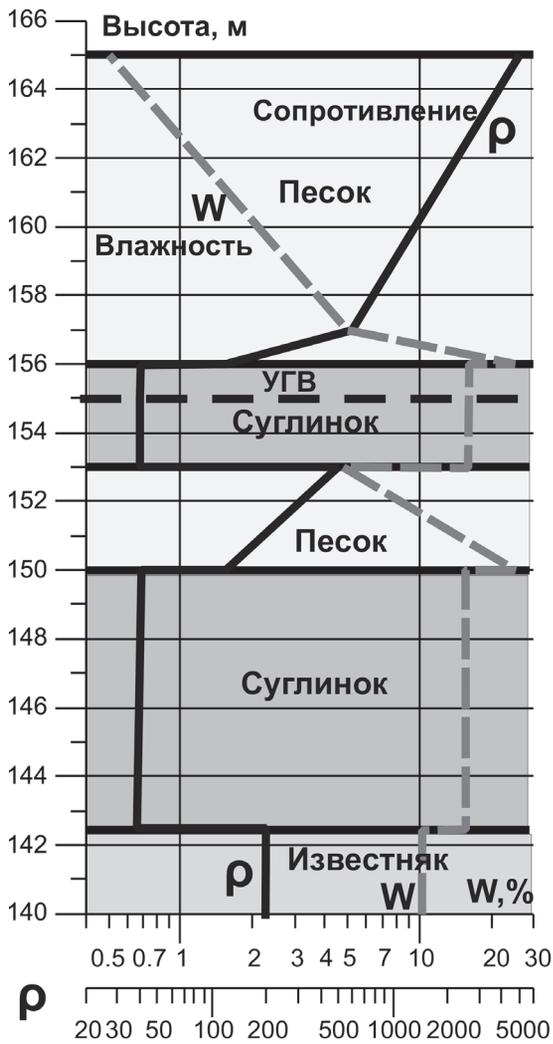


Рис. 3. Схема распределения сопротивления и влажности с глубиной

различия потенциала ЕП связаны с сопротивлением ρ по профилю. Коэффициент b мало меняется в пределах однородных по составу участков пород, но в разных районах мира колеблется в интервале $-250...+50$ мВ. Именно корреляция U и ρ , проверяемая по формуле (2), служит доказательством того, что аномалия ЕП порождена ДА процессом.

Результаты исследований и их обсуждение. В ходе практики студентов-геофизиков с 2013 г. для ЕП и с 2014 г. для ЭП-ВП в геологических условиях, показанных на рис. 1, было пройдено свыше 30 профилей ЕП и свыше 20 профилей ЭП-ВП. Из этих данных отобраны пары профилей ЕП и ρ , пройденные по одним и тем же местам, хотя и в разные дни, чтобы изучить корреляцию значений потенциала ЕП и кажущегося сопротивления, опираясь на формулу (2) и идею о том, что корреляция ЕП и сопротивлений свидетельствует о ДА природе аномалий ЕП.

По опыту измерений потенциалов ЕП диффузионно-адсорбционного происхождения в скважинах [Дахнов, 1982] пласты песка характеризуются отрицательными значениями потенциала, а пласты

глин — положительными. При наземных измерениях в Калужской области для песчаного плато выявлена положительная аномалия ЕП (25–30 мВ) относительно суглинистого основания разреза. Вероятная причина этого заключается в резком отличии влажности песков на поверхности плато и суглинков в основании разреза (до 20 раз), а также сопротивления (до 100 раз), глинистости и ионообменной емкости.

На одном из профилей, схематически показанном на рис. 1, был обнаружен родник. Место выхода воды на поверхность выявлено на контакте нижних песков и подстилающих суглинков и сопровождалось слабой аномалией потенциала ЕП с амплитудой до 5–7 мВ. Типичная ДА аномалия потенциала ЕП на плато положительна по отношению к условному нулю на суглинках вблизи реки и достигает 25–35 мВ, т.е. в 5 раз больше фильтрационной.

Рассмотрим пример одного такого профиля с измерениями ЕП и ВП (рис. 4, 5). График корреляции сопротивления и ЕП по этому профилю (рис. 4) состоит из относительно скученных и разрозненных групп точек, что связано с измерением поля то в пределах пород одного литологического состава, то в зоне его смены.

Судя по графику сопротивления (рис. 5), на участке профиля от 0 до 28 м разрез сложен пойменными отложениями суглинков и супесей, от 28 до 38 м — отмечается выход слоя песков, от 38 до 45 м — слоя суглинков, а дальше по профилю следует слой песков, слагающих Александровское плато. График ЕП начинается с нулевых значений потенциала, возрастает до 10 мВ на подошве нижнего слоя песка (этой аномалией ЕП отмечен родник), затем график ЕП снижается до 5 мВ на слое суглинков (42 м) и увеличивается до 25 мВ на верхнем слое песков (45–70 м).

На рис. 4 штриховая линия показывает характер корреляции ЕП и значений сопротивления. График сопротивления построен в логарифмическом масштабе в соответствии с формулой (2). Коэффициент b для формулы (2) равен 17,2 мВ. Среднее значение b для ряда профилей участка составляет 19–20 мВ.

Геологический разрез на рис. 1 построен с учетом рельефа этого профиля, а также графиков сопротивления и ЕП на рис. 5.

Рассчитан также градиент потенциала ($\text{grad } U$) на участке наибольшего увеличения U , согласованного с ростом сопротивления и с рельефом (рис. 5). Для разных профилей градиент меняется от 0,6 до 2,6 мВ/м, среднее значение градиента ЕП равно 1 мВ/м.

ДА аномалии, по данным работы [Семенов, 1980], связаны с изменениями солёности (это не рассматриваемый случай), с контактами пород разного литологического состава и с разными адсорбционными свойствами, а также с изменени-

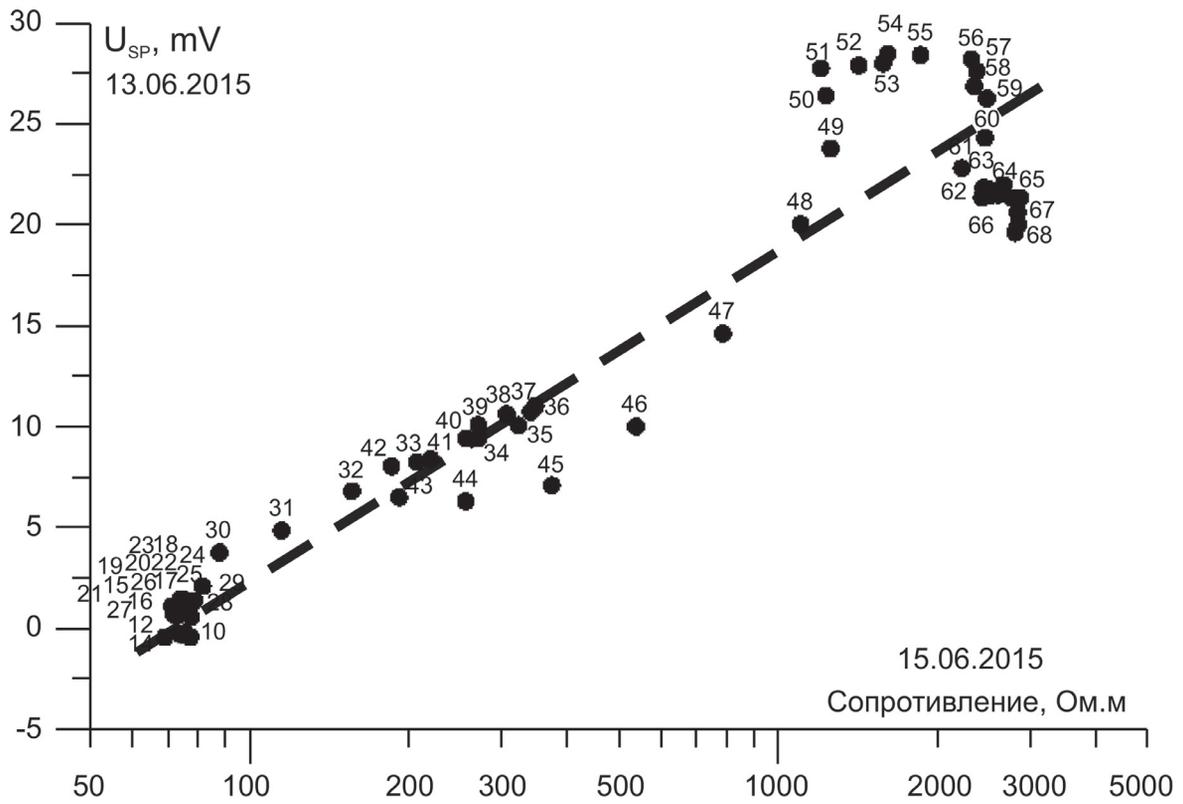


Рис. 4. Корреляция сопротивления и ЕП по профилю ЭП-ВП за 15.06.2015, ЕП 13.06.2015

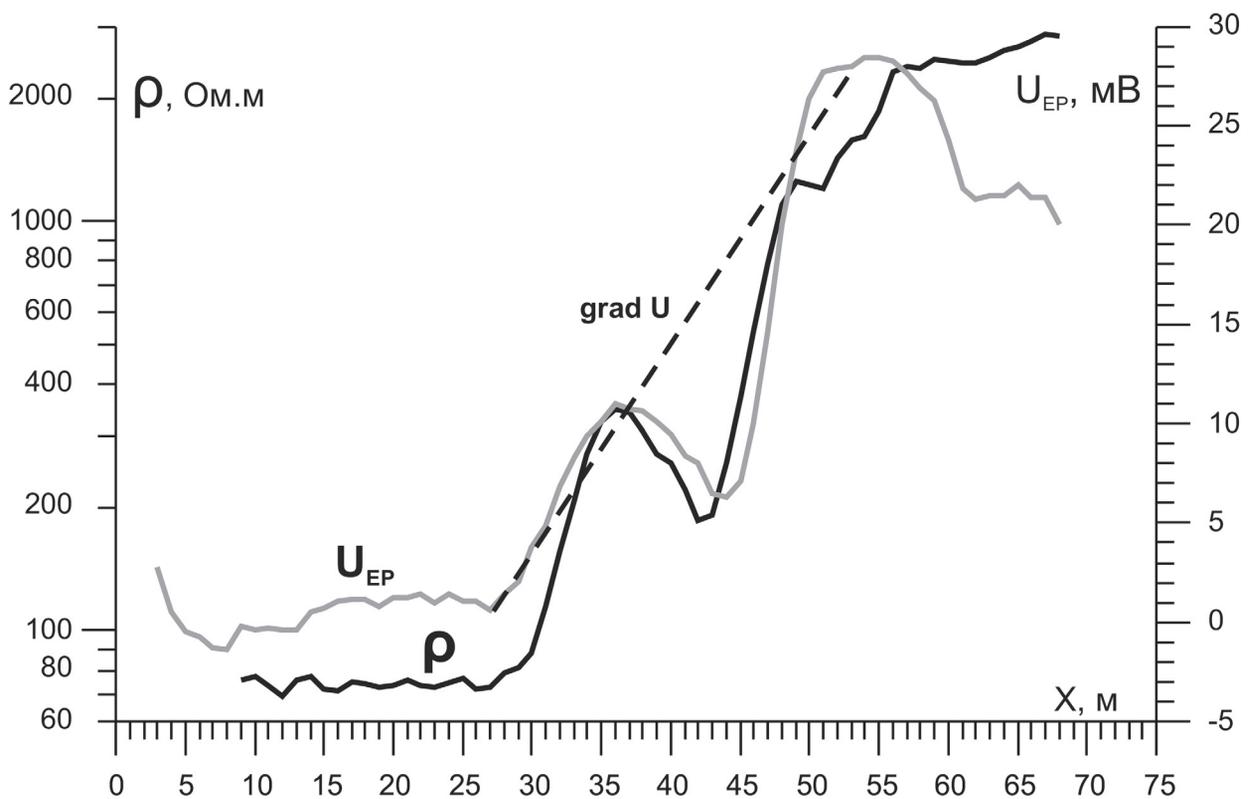


Рис. 5. Графики сопротивления и ЕП по профилю ЭП-ВП за 15.06.2015, ЕП 13.06.2015

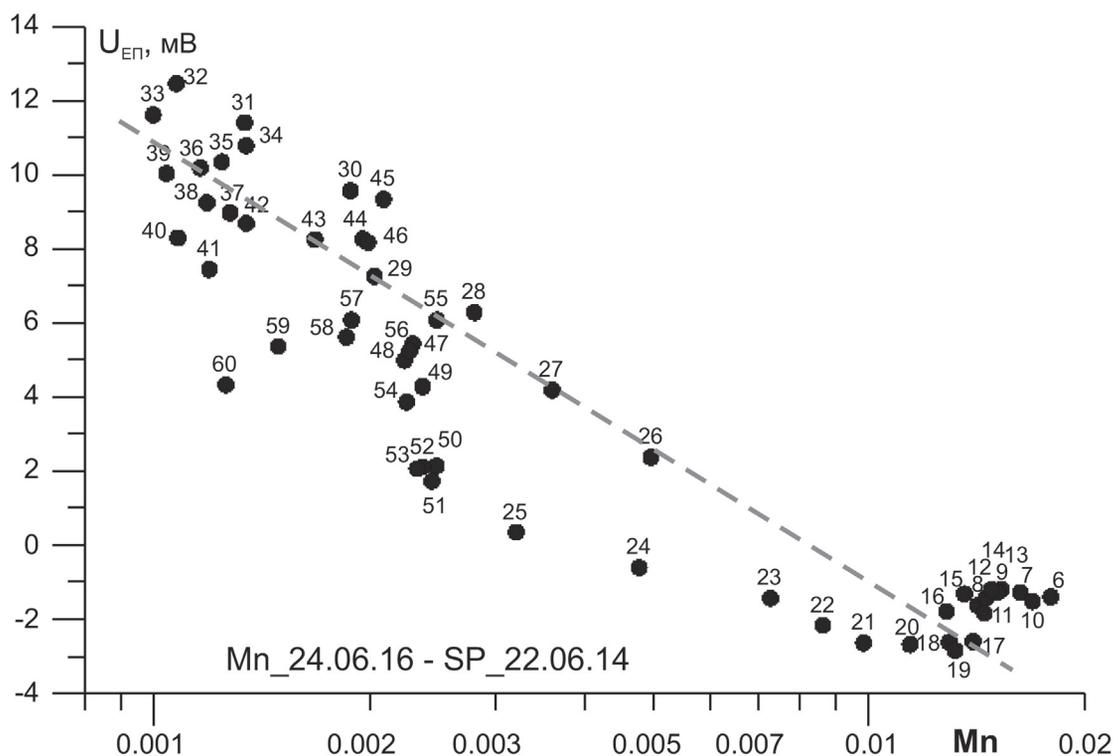


Рис. 6. Корреляция нормированной поляризуемости M_n и ЭП по профилю ЭП-ВП за 24.06.2016, ЭП за 22.06.2014

ями влажности. Адсорбционные свойства связаны с глинистостью пород. Хорошим показателем глинистости является нормированная поляризуемость M_n :

$$M_n = \frac{\eta_k}{\rho_k}, \quad (3)$$

определяемая в методе вызванной поляризации (ВП), она, по данным [Weller et al., 2013], пропорциональна поверхностной проводимости, которая в свою очередь тесно связана с глинистостью. Поэтому корреляция потенциала ЭП с M_n также представляет интерес для анализа и распознавания природы аномалий ЭП. На рис. 6 показана такая корреляция ЭП с M_n для профиля ЭП за 24.06.2016 и ЭП за 22.06.2014, где M_n изменяется в 20 раз от 0,001%/Ом·м на песках до 0,02%/Ом·м на суглинках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра, 1982. 448 с.

Комаров В.А. Геоэлектрохимия: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. 136 с.

Рыжов А.А., Шевнин В.А. О повышенной поляризуемости песка, вызванной влажностью // Геофизика. 2014. № 6. С. 30–38.

Семенов А.С. Метод естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980. 447 с.

Шевнин В.А., Рыжов А.А., Квон Д.А. Измерение сопротивления и вызванной поляризации грунтов в поле-

Выводы. 1. Обнаруженная во время учебной геофизической практики в Калужской области аномалия ЭП с амплитудой 25–35 мВ имеет диффузионно-адсорбционное происхождение, что подтверждается корреляцией потенциала ЭП и логарифма сопротивления или ЭП и нормированной поляризуемости, отражающей глинистость.

2. Эта аномалия четко привязана к участку подъема рельефа от реки к плато и переходу от нижних суглинков к вышележащим пескам. На плато величина потенциала ЭП достигает максимума в области максимальных значений сопротивления. Корреляция ЭП с M_n выглядит иначе: максимальные потенциалы ЭП соответствуют минимальным значениям M_n .

Знание природы аномалий ЭП полезно тем, что позволяет избавиться от ложной трактовки выявленных аномалий ЭП.

вых условиях // Мат-лы Междунар. конф. «Инженерная геофизика-2016», Анапа, 25–28 апреля 2016. Анапа, 2016.

Petiau G. Second generation of lead-lead chloride electrodes for geophysical applications // Pure and Applied Geophys. 2000. Vol. 157. P. 357–382.

Weller A., Slater L., Nordsiek S. On the relationship between induced polarization and surface conductivity: Implications for petrophysical interpretation of electrical measurements // Geophys. 2013. Vol. 78, N 5. P. D315–D325.

Поступила в редакцию
15.12.2017