УДК 550.837

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ РЫХЛЫХ ГРУНТОВ

В.А.ШЕВНИН[1], Д.А.КВОН[1], А.А.РЫЖОВ[2]
[1] *Московский государственный университет, Москва, Россия*
[2] *ВСЕГИНГЕО, Московская обл., Ногинский район, пос. Зеленый, Россия*

Рассмотрена связь геоэлектрических параметров: сопротивления, поляризуемости и нормированной поляризуемости (ρ, η, M_n), – и поверхностной проводимости (*SC* или σ") грунтов в данных вертикального электрического зондирования с измерением вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП), электропрофилирования с измерением вызванной поляризации (ЭП-ВП) и частотных характеристик с измерением вызванной поляризации (ЧХ-ВП). Показано, что поверхностная проводимость может быть определена как по данным спектральной ВП, так и по сопротивлениям грунта с помощью петрофизического подхода. При этом нормированная поляризуемость (M_n) равна поверхностной проводимости (*SC*). В свою очередь величина *SC* пропорциональна глинистости. Рост глинистости приводит к снижению гидравлической проводимости. Для истолкования результатов ЭП-ВП полезно изучать совместно графики трех параметров (ρ, η, M_n). В зоне аэрации неполная влажность заметно влияет на величины геоэлектрических параметров. Изучить влияние влажности помогает петрофизическое моделирование.

***Ключевые слова*:** рыхлый грунт, электрическое сопротивление, поляризуемость, петрофизические свойства грунтов, глинистость, поверхностная проводимость, коэффициент фильтрации

***Как цитировать эту статью*:** Шевнин В.А. Петрофизический подход к электрическим свойствам рыхлых грунтов / В.А.Шевнин, Д.А.Квон, А.А.Рыжов // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 397-404. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.397

Введение. Настоящая работа выполнена под влиянием идей А.А.Рыжова и А.Веллера. А.А.Рыжов раскрыл возможности петрофизического подхода, показав, что сопротивление грунтов может быть описано теоретически в прямой задаче (расчет сопротивления по известным петрофизическим параметрам) и в обратной задаче (оценка петрофизических параметров по измеренным геофизическим характеристикам: сопротивлению грунта, воды и др.). А.Веллер показал, что давно известный параметр вызванной поляризации (ВП), называемый в рудной геофизике металл-фактором, а в гидрогеофизике нормированной поляризуемостью $M_n = \eta_к / \rho_к$ (где $\eta_к$ – поляризуемость, $\rho_к$ – сопротивление), тесно связан с поверхностной проводимостью. Металл-фактор был предложен американскими геофизиками в конце 1950-х годов. В инженерной геофизике Н.Н.Шарапановым был предложен параметр ВП: А* [7], аналогичный металл-фактору. В.А.Шевнин изучал этот параметр в 1970-х годах при работах в Центральном Казахстане [3].

Петрофизические и электрические параметры грунта

Параметр	Известный 1	Неизвестный 1	Известный 2	Неизвестный 2	Зависит от
1. Температура	+	–	+	–	
2. ρ_воды	+	–	+	–	
3. ρ_грунта	+	–	+	–	
4. Пористость песка	+	–	–	*F*	
5. *R*_песка	+	–	–	*F*	
6. Пористость глины	–	*F*	+	–	
7. *R*_глины	–	*F*	+	–	
8. ИОЕ_глины	–	*F*	+	+	
9. Влажность	+	+	+	+	
10. Глинистость	–	+	–	+	
11. ИОЕ	–	+	–	+	
12. Пористость грунта	–	+	–	+	f(4, 6, 10)
13. K_f	–	+	–	+	f(10)
14. *RSC*	–	+	–	+	f(2, 8, 10)

Примечание. *R* – радиус капилляра, ИОЕ – ионообменная емкость, K_f – коэффициент фильтрации, *RSC* – сопротивление (величина обратная поверхностной проводимости); цифра 1 означает преобладание песка, цифра 2 – глины; плюсом обозначена известная величина, минусом – неизвестная или незначимая, *F* – рекомендуемая величина.

Методика. Описание теории связи петрофизических свойств грунтов с удельным электрическим сопротивлением было опубликовано А.А.Рыжовым в работе [6], а затем более детально в работе [2]. Грунт рассматривался как смесь двух фракций: крупнозернистой и мелкозернистой (например, песка и глины), – и поровой влаги в грунте. Сопротивление грунта зависит от пористости и радиуса капилляров каждой фракции, их долей в смеси, влажности и солености (или сопротивления) поровой влаги, ионообменной емкости и температуры. Когда параметры 1-2 и 4-10 (см. таблицу) известны, можно рассчитать сопротивление грунта и параметры 11-14. Когда экспериментально определены параметры 1-9, можно в ходе решения обратной задачи найти параметры 10, 11, а потом и 12-14.

Был выполнен 2D-разрез сопротивления, результат его пересчета в разрезы глинистости и коэффициента фильтрации показан на рис.1. Известно, что электрическая проводимость горной породы может быть представлена суммой электролитической σ' и поверхностной σ" проводимости: $\sigma = \sigma' + \sigma''$ [14]. В работе [10] авторы предложили модель двойной воды (dual-water model), в которой проводимость породы является суммой электролитической проводимости σ' (воды в широких порах) и поверхностной проводимости σ" (воды в узких порах глины). Электропроводность является комплексной величиной, ее действительная часть отражает электролитическую σ' (водного раствора), а мнимая – поверхностную σ" проводимость (связанную с двойным слоем в узких капиллярах). Ф.Борнер [9] показал, что σ" связана с Spor (относительная поверхность пор – отношение поверхности поры к ее объему) и с гидравлической проводимостью K_f (коэффициентом фильтрации). Возможность оценки гидравлической проводимости по данным спектральной ВП была показана в работах [12, 13].

Существуют два подхода к оценке поверхностной проводимости: с помощью метода СВП – спектральной вызванной поляризации [12, 13, 15] и с помощью петрофизического подхода к данным метода сопротивлений, разработанного А.А.Рыжовым [11]. В программе А.А.Рыжова «Петро» поверхностная проводимость рассчитывается по формуле $\sigma_{SC} = C_{Clay}\sigma_{Clay}/K_{Clay}$ (где C_{Clay} – глинистость; σ_{Clay} – проводимость глины, которая зависит от солености поровой влаги и ионообменной емкости; K_{Clay} – коэффициент пористости глины). Эти параметры определяются по сопротивлению грунта (УЭС) и солености поровой влаги с учетом модели грунта [5]. Часто вместо поверхностной проводимости мы используем ее обратную величину – сопротивление *RSC* [11].

В 2000-2007 годах, изучая места нефтяных загрязнений грунтов, мы обнаружили, что поверхностная проводимость давала максимальную разрешающую способность к разделению чистого и загрязненного грунта по сравнению с сопротивлением и рядом петрофизических параметров [11]. Разрешающая способность оценивалась по величине индекса разделения гистограмм $SI = dX / stnd$ (где dX – расстояние между максимумами гистограмм для чистых и загрязненных грунтов; *stnd* – стандартное отклонение, мера ширины гистограмм).

Параметр *RSC* на рис.2 был нормализован так, чтобы его значения больше нуля относились к чистому грунту, а отрицательные – к загрязненному. Он показал $SI = 6$ или по правилу трех сигм – полное разделение гистограмм. Для УЭС индекс разделения был ниже ($SI = 2{,}5$, рис.2). Поверхностная проводимость для загрязненного нефтью грунта связана с биодеградацией нефти (ее эмульсификацией и появлением биопленок – скоплений бактерий в порах породы), что приводит к изменению структуры порового пространства и к росту роли двойного электрического слоя (ДЭС) из-за роста числа тонких пор.

В работе [15] авторы показали высокую корреляцию ($R^2 = 0{,}907$) M_n и поверхностной проводимости (рис.3). Авторы установили, что отношение $M_n/\sigma'' = 0{,}2$.

Мы проверили корреляцию M_n и *SC* (σ") по данным вертикального электрического зондирования с измерением вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП) и электропрофилирования с измерением вызванной поляризации (ЭП-ВП), полученным в Калужской области (на базе геофизической практики студентов МГУ). Величина *SC* оценивалась по УЭС грунта в программе А.А.Рыжова «Петрофизика» [2]. У нас отношение M_n/SC оказалось равным единице, т.е. M_n просто равно поверхностной проводимости *SC*. Такое различие вызвано тем, что поляризуемость сильно меняется в зависимости от условий эксперимента.

На рис.4 видны две группы точек (два облака), полученных из количественной 1D-интерпретации данных ВЭЗ-ВП. Более высокие значения M_n и *SC* соответствуют суглинкам, второе облако – с меньшими значениями M_n и *SC* – пескам.

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.397*

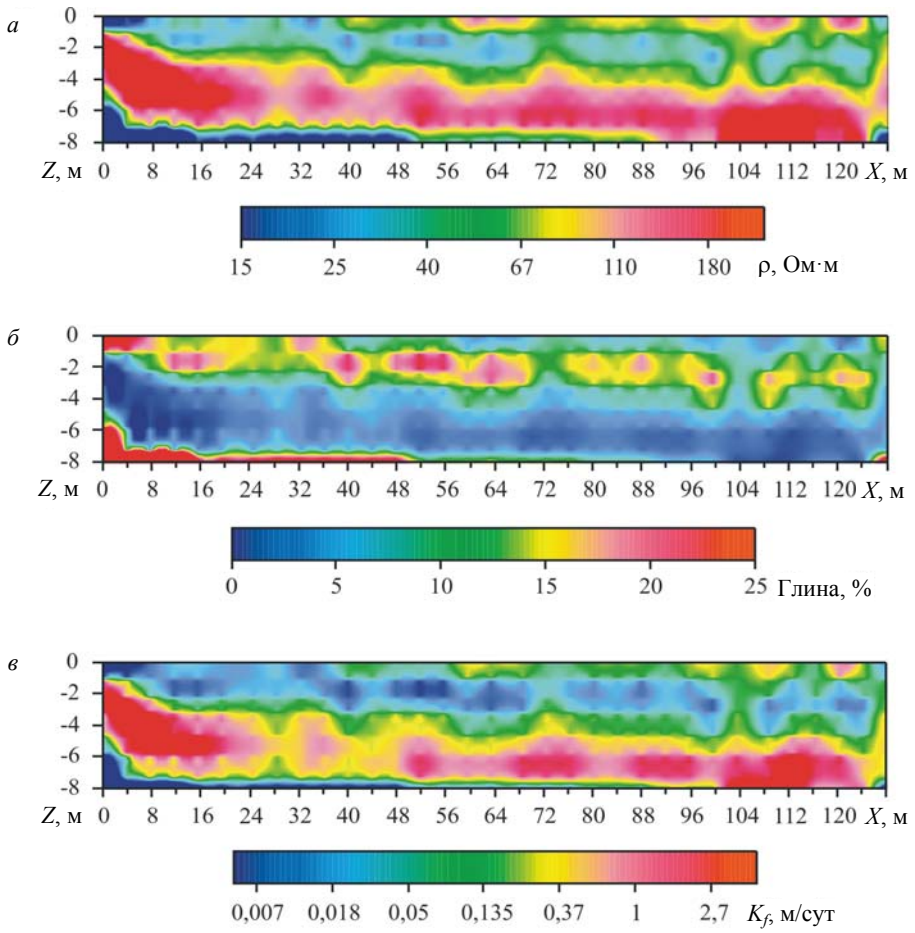


Рис.1. Пример 2D-разреза сопротивления (*а*), пересчитанного в разрезы глинистости (*б*) и коэффициента фильтрации (*в*)

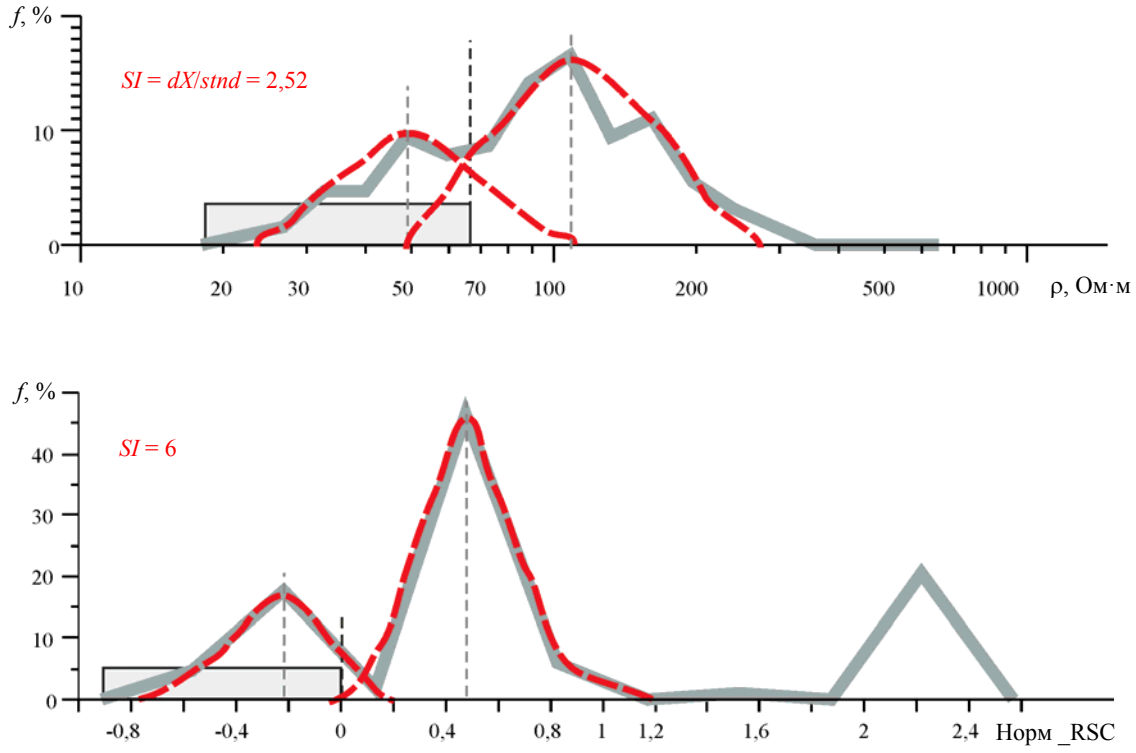


Рис.2. Гистограммы УЭС и сопротивления *RSC* грунта, связанного с его поверхностной проводимостью, и индекс разделения чистого и загрязненного грунта

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.397*

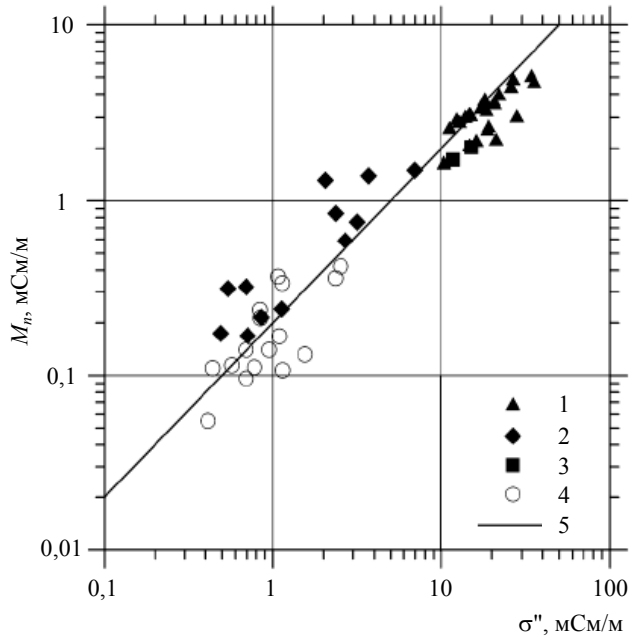


Рис.3. Корреляция M_n и поверхностной проводимости σ" [15]
1-4 – разные коллекции грунтов; 5 – линия корреляции $M_n = 0{,}2\sigma''$

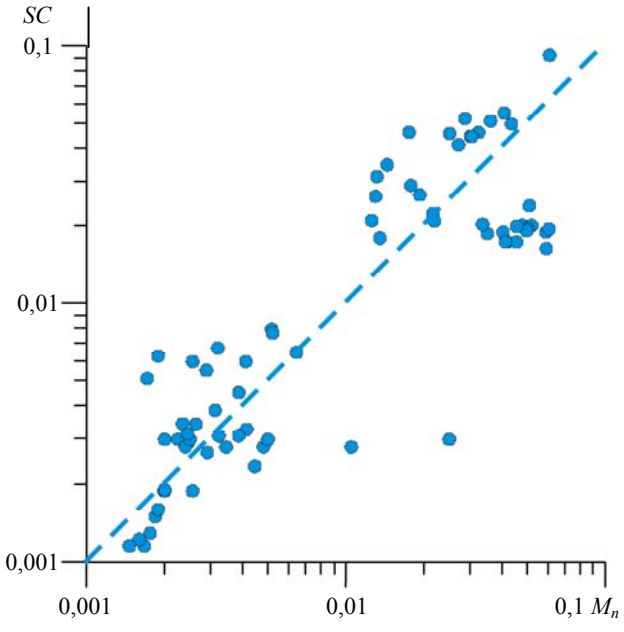


Рис.4. Корреляция значений $M_n = \eta/\rho$ и поверхностной проводимости для истинных параметров слоев (1D-интерпретация) профиля ВЭЗ-ВП (база МГУ «Малое Устье», июль 2014 г.)

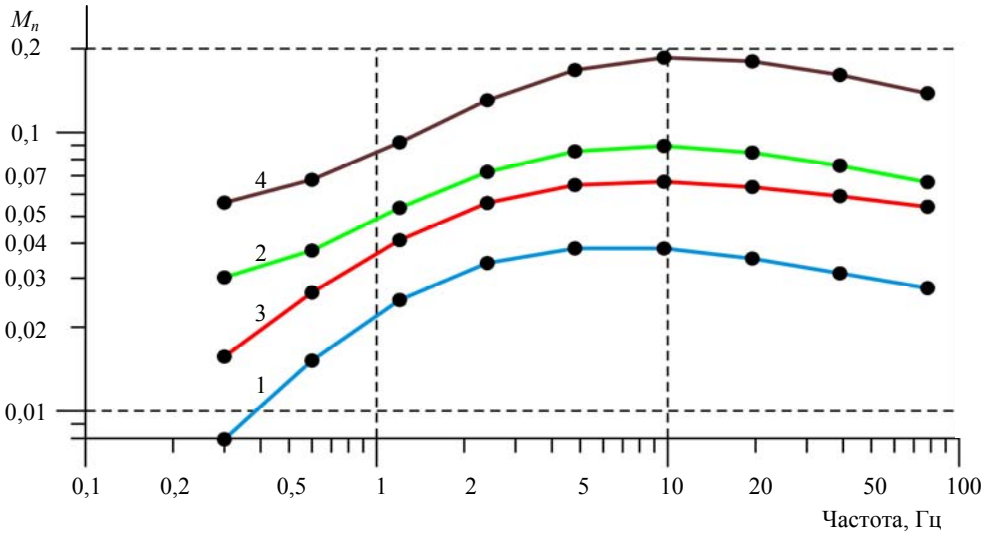


Рис.5. Зависимости $M_n = \eta/\rho$ от частоты для образцов 1-4 [8]

Были построены графики M_n от частоты (0,3-78 Гц) для четырех образцов грунта, собранных на профилях ЭП-ВП (рис.5) [8]. Мы ясно увидели преимущество параметра M_n в разделении кривых по глинистости (кривая 4 соответствует максимальной глинистости, а кривая 1 – минимальной). Подобные частотные характеристики (ЧХ) измерялись в ходе работ по ЭП-ВП в 2014-2016 годах. Частотные характеристики по величине M_n делились на два облака: верхнее для суглинков и нижнее для песков. Верхняя часть разреза той территории практики, где выполняли ЭП-ВП, в основном была сложена песками и суглинками, что и привело к такому четкому разделению кривых. Нужно отметить, что зависимости $\eta_к$ от частоты так четко, как M_n, не разделялись.

При профилировании (ЭП-ВП) добавление к графикам $\eta_к$ и $\rho_к$ еще и нормированной поляризуемости M_n помогает лучше понять структуру изучаемого разреза (рис.6). Геологический разрез определен с помощью электротомографии 23.06.2015 г. В разрезе сверху вниз залегают слои песка, моренных суглинков, еще один прослой песка и суглинков основания разреза. Реальный разрез отличался от идеализированной схемы наличием тонкого слоя осыпи на склоне, маскирующего реальные выходы границ слоев.

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.397*

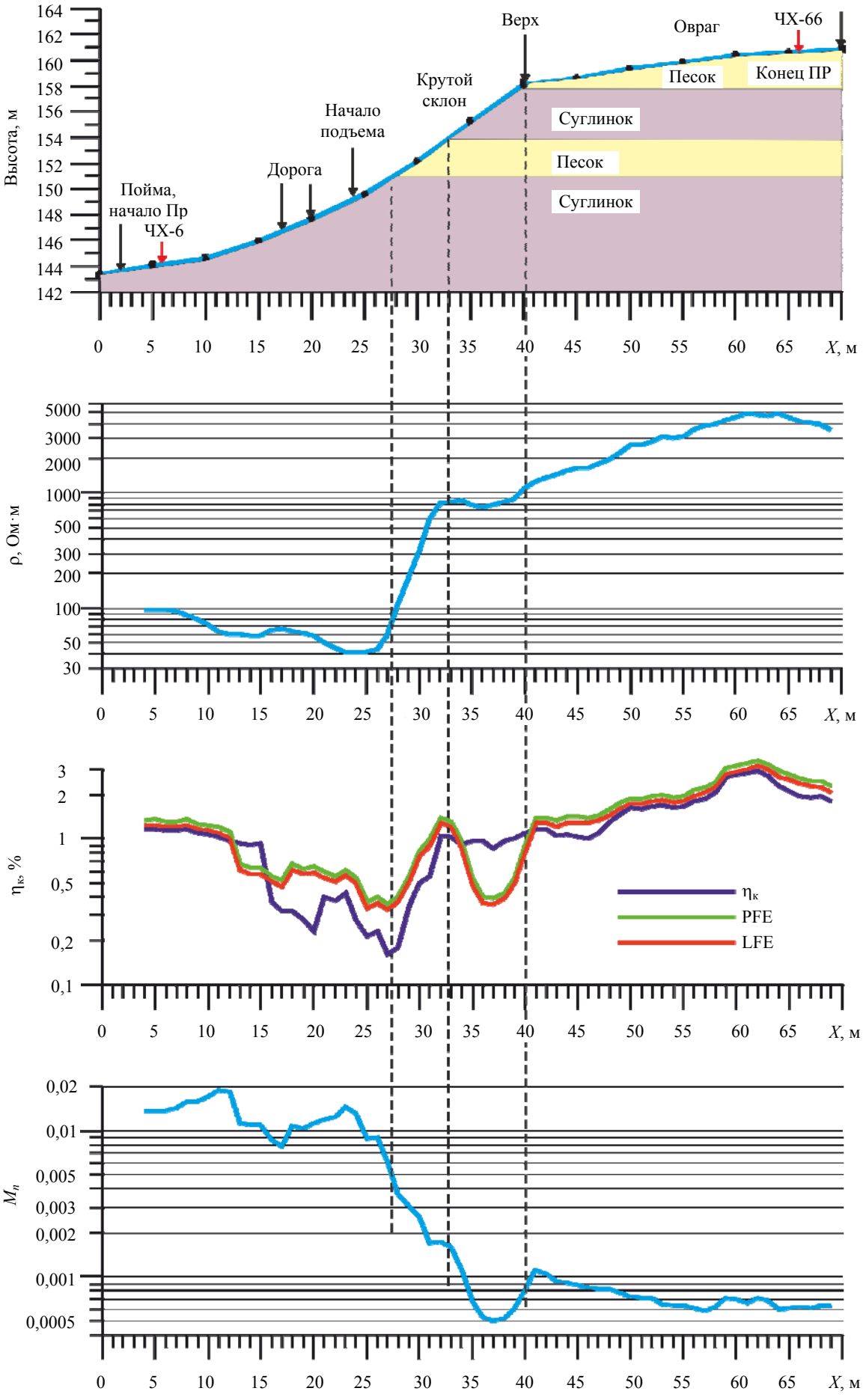


Рис.6. Графики ЭП-ВП

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.397*

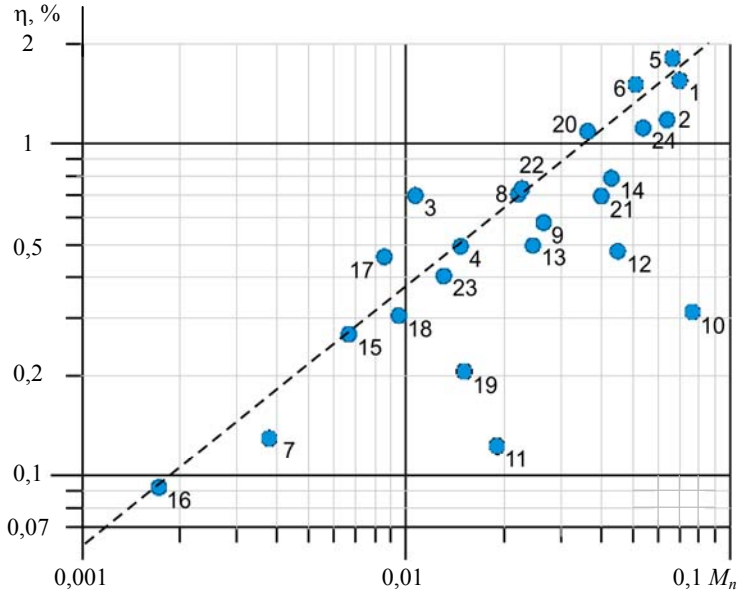


Рис.7. Корреляция значений η ВП и M_n для образцов 1-24

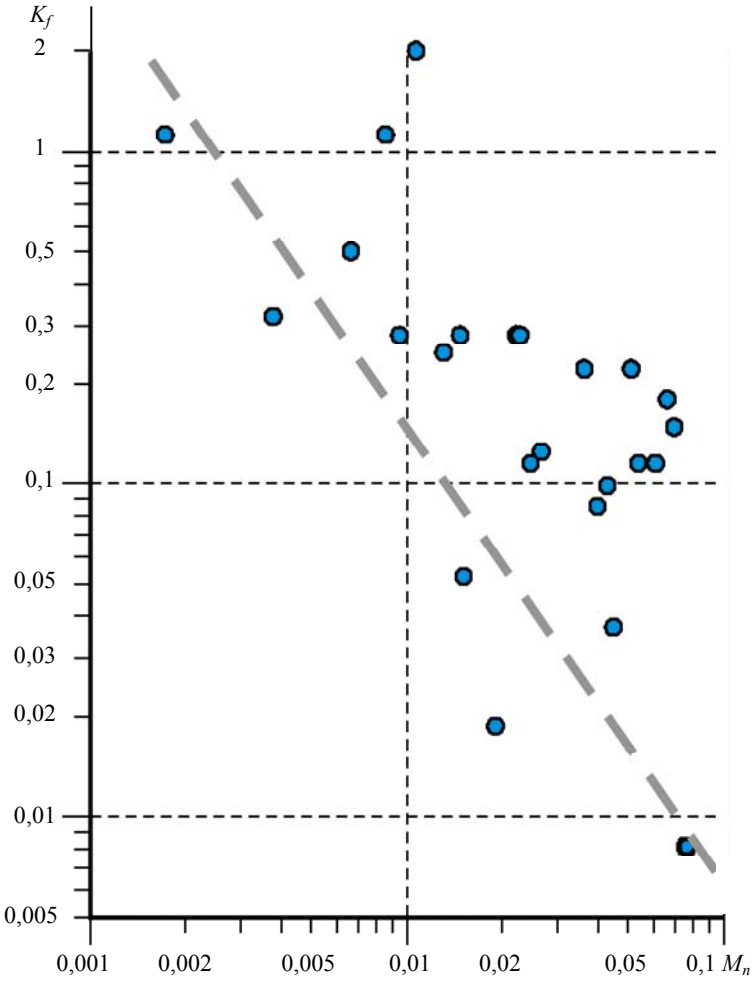


Рис.8. Корреляция K_f и M_n

Исследование ЭП-ВП выполнялось установкой Шлюмберже с $AB = 5$ м, $MN = 1$ м и шагом 1 м с аппаратурой «Астра-МЭРИ» на частоте 2,44 Гц. Измеритель МЭРИ показывал дифференциально-фазовый параметр (ДФП) для 1-й и 3-й гармоник сигнала, также регистрировались амплитуды 1-й и 3-й гармоник. По ДФП вычислялась поляризуемость $\eta_к = -2{,}5$ ДФП, а по амплитудам 1-й и 3-й гармоник – процентный частотный эффект (*PFE*) и логарифмический частотный эффект (*LFE*). По амплитуде 1-й гармоники и силе тока рассчитывалась величина $\rho_к$. Графики ЭП-ВП сглаживались в скользящем окне шириной 5 точек.

Сопоставляя графики ЭП-ВП с рельефом и схематическим геологическим разрезом, можно видеть реакцию каждого параметра на переход через геологические границы. Выход нижнего слоя песков на склон дает резкий рост сопротивления, максимум поляризуемости, уменьшение M_n (в интервале профиля $X = 27 \div 33$ м). Слой суглинков между двумя слоями песков ($X = 33 \div 40$ м) проявляется минимумом поляризуемости и M_n. Выход профиля на верхний слой песков при увеличении его мощности приводит к слабому росту сопротивления и поляризуемости при стабильном уровне M_n.

На территории учебной практики были собраны образцы грунта (с поверхности и из скважин) для измерений в лаборатории УЭС грунта при разной солености, замеров поляризуемости и M_n от частоты. Графики УЭС от солености количественно интерпретировались для оценки глинистости образцов. Корреляция поляризуемости и M_n образцов показала (рис.7), что с ростом M_n возрастала и поляризуемость. Эта зависимость несколько различалась у образцов пород, измеренных в лаборатории при полном водонасыщении, и у образцов, измеренных в поле, где породы частично находились в зоне аэрации и влажность пород заметно менялась, сильнее для песков, слабее для суглинков.

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.397

На рис.8 представлена корреляция гидравлической проводимости K_f и M_n для той же коллекции образцов. Установлено, что K_f с ростом M_n заметно убывает.

Влияние влажности грунтов в зоне аэрации может быть изучено с помощью метода ВЭЗ-ВП [4]. Конечный результат такого исследования показан на рис.9 для Александровского плато, сложенного песками. Ниже 10 м в зоне полного водонасыщения объемная влажность равна пористости песка (23 %). Зона капиллярного поднятия имеет мощность 1 м (мелкозернистый песок). В верхней части капиллярной каймы (КП) влажность составляет около 20 % от влажности на уровне грунтовых вод (УГВ) [1]. Выше капиллярной каймы влажность убывает, достигая вблизи поверхности земли 1 % (сопротивление песка при этом составляет (5-10)10^3 Ом·м). Почвенный слой представлен легкими суглинками, и в его пределах влажность возрастает. Там, где влажность песка составляет 2-5 %, метод ВЭЗ-ВП отмечает заметный рост поляризуемости (от 0,5 до 2,8 %) [5].

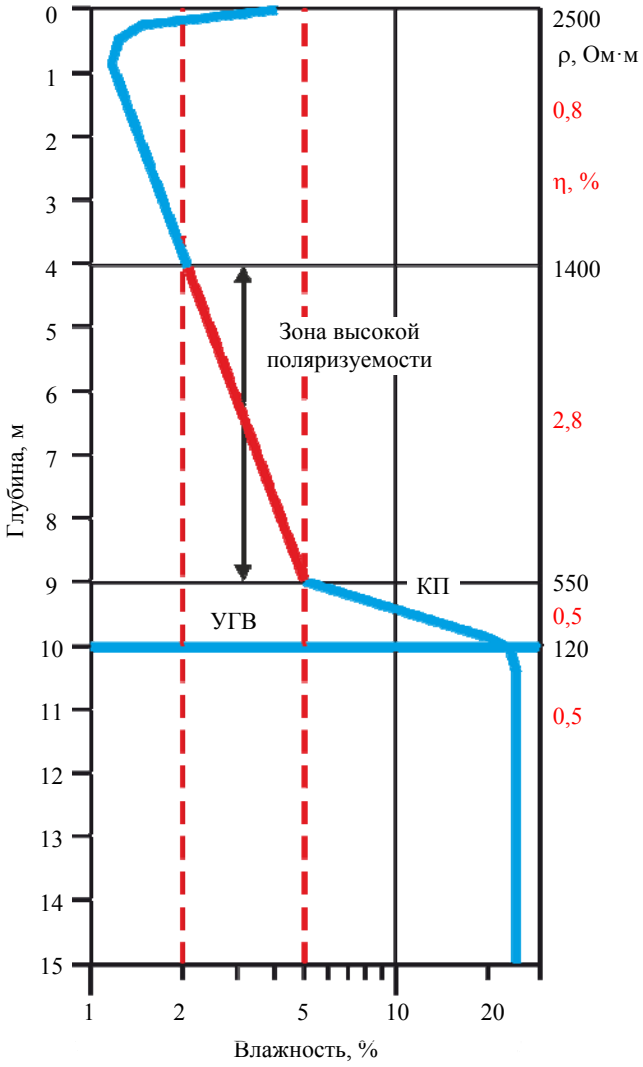


Рис.9. Изменение влажности с глубиной по данным ВЭЗ-ВП

Выводы

1. Величины поверхностной проводимости, рассчитанные из данных ВП и из данных метода сопротивлений, совпадают.

2. Нормированная поляризуемость M_n по нашим данным равна поверхностной проводимости.

3. Уровень графиков M_n от частоты отражает глинистость грунта.

4. Графики профилирования ЭП-ВП $\rho_к$, $\eta_к$ и M_n, изучаемые совместно, позволяют лучше понять строение разреза и его литологию.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лыков А.В.* Тепломассообмен: Справочник. 2-е изд, перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. 480 с.

2. *Матвеев В.С.* Геофизическое обеспечение региональных гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических и геоэкологических исследований / В.С.Матвеев, А.А.Рыжов // Разведка и охрана недр. 2006. № 2. С. 50-57.

3. *Модин И.Н.* Обработка данных ВП для выделения и оценки перспектив слабых аномалий поляризуемости / И.Н.Модин, В.А.Шевнин // Прикладная геофизика. 1985. Вып. 113. С. 33-42.

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

5. *Рыжов А.А.* Петрофизический подход к данным малоглубинной электроразведки / А.А.Рыжов, В.А.Шевнин, Д.А.Квон // Инженерная, угольная и рудная геофизика – 2015: Материалы конференции. М.: Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество, 2015. С. 26-30.

6. *Рыжов А.А.* Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач / А.А.Рыжов, А.Д.Судоплатов // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр: Науч.-техн. информ. сб. М.: ВИЭМС, 1990. С. 27-41.

7. *Шарапанов Н.Н.* Методика геофизических исследований при гидрогеологических съемках с целью мелиорации земель / Н.Н.Шарапанов, Г.Я.Черняк, В.А.Барон. М.: Недра, 1974. 178 с.

8. *Шевнин В.А.* Лабораторные измерения сопротивления и параметров вызванной поляризации рыхлых грунтов для определения литологического строения разреза / В.А.Шевнин, А.А.Бобачев, К.И.Баранчук // Инженерные изыскания. 2014. № 09-10. С. 53-58.

9. *Borner F.D.* Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements / F.D.Borner, R.Schopper, A.Weller // Geophysical Prospecting. 1996. 44. 583-601.

10. *Clavier C.* Theoretical and Experimental Bases for the Dual-Water Model for Interpretation of Shaly Sands / C.Clavier, G.Coates, J.Dumanoir // Journal SPE. 1984 April. P. 153-168.

11. Estimation of soil superficial conductivity in a zone of mature oil contamination using DC resistivity / V.Shevnin, O.Delgado-Rodríguez, A.Mousatov, A.Ryjov // SAGEEP-2006, Seattle. P. 1514-1523.

12. *Slater L.D.* Controls on induced polarization in sandy unconsolidated sediments and application to aquifer characterization / L.D.Slater, D.R.Glaser // Geophysics. 2003. Vol. 68. N 5 (September-October). P. 1547-1558.

13. *Slater L.* Near Surface Electrical Characterization of Hydraulic Conductivity: From Petrophysical Properties to Aquifer Geometries – A Review // Surv. Geophys. 2007. 28:169-197.

14. *Vinegar H.J.* Induced polarization of shaly sands / H.J.Vinegar, M.H.Waxman // Geophysics. 1984. 49. 1267-1287.

15. *Weller A.* On the relationship between induced polarization and surface conductivity: Implications for petrophysical interpretation of electrical measurements / A.Weller, L.Slater, S.Nordsiek // Geophysics. 2013. Vol. 78. N 5 (September-October). P. D315-D325.

***Авторы*: В.А.Шевнин**, *д-р физ.-мат. наук*, *профессор*, *shevninvlad@yandex.ru* (*Московский государственный университет*, *Москва*, *Россия*), **Д.А.Квон**, *инженер*, *kvonchikc@rambler.ru* (*Московский государственный университет*, *Москва*, *Россия*). **А.А.Рыжов,** *канд. геол.-минерал. наук*, *ведущий научный сотрудник*, *ryjov@yandex.ru* (*ВСЕГИНГЕО*, *Московская обл.*, *Ногинский район*, *пос. Зеленый*, *Россия*).

Статья принята к публикации 23.11.2016.