

УДК 621.316.9:621.311:624.131.38(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-12-25-31

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ГРУНТА В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОДСТАНЦИЙ
КЫРГЫЗСТАНА**

А.К. Асанов, Н.К. Джусупбекова, Р.Б. Тентиев, Ж.А. Бокова

Аннотация. На основании анализа результатов вертикального электрического зондирования грунтов в местах расположения энергообъектов Кыргызстана получено статистическое распределение слоистости грунтов и их мощности. Определены основные соотношения слоев грунта по типовым кривым вертикального электрического зондирования. Определено, что более половины высоковольтных энергообъектов Кыргызстана находятся на высоте более 1000 м над уровнем моря, что характеризует сложные геофизические условия грунтов. Произведен анализ влияния климатических воздействий на верхний слой грунта и определены погрешности при расчете параметров вертикальных электродов. Показано, что погрешность определения значения сопротивления вертикальных электродов может достигать 80 %. Сравнение расчетных и экспериментальных значений сопротивления заземляющего устройства показало высокую степень совпадения.

Ключевые слова: вертикальное электрическое зондирование; грунт; двух и трехслойная модель грунта; энергообъект; заземляющее устройство; вертикальный электрод.

**КЫРГЫЗСТАНДЫН ЖОГОРКУ ВОЛЬТТОГУ КӨМӨКЧОРДОНДУРУ
ЖАЙГАШКАН ЖЕРЛЕРДЕ КЫРТЫШТЫН ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫК
МҮНӨЗДӨМӨЛӨРҮН ИЗИЛДӨӨ**

А.К. Асанов, Н.К. Джусупбекова, Р.Б. Тентиев, Ж.А. Бокова

Аннотация. Кыргызстандын энергетикалык объектилери жайгашкан жерлерде кыртыштарды вертикалдуу электрдик зонддоонун натыйжаларын талдоонун негизинде топурак катмарынын жана алардын калыңдыгынын статистикалык бөлүштүрүлүшү алынган. Кыртыш катмарларынын негизги катыштары вертикалдуу электрдик зонддун типтүү ийри сызыктары боюнча аныкталат. Кыргызстандагы жогорку вольттогу энергетикалык объектилердин жарымынан көбү деңиз деңгээлинен 1000 метрден ашык бийиктикте жайгашканы аныкталган, бул кыртыштын татаал геофизикалык шарттарын мүнөздөйт. Климаттык таасирлердин кыртыштын үстүнкү катмарына тийгизген таасирине талдоо жүргүзүлүп, вертикалдык электроддордун параметрлерин эсептөөдө каталар аныкталган. Тик электроддордун каршылык маанисин аныктоодогу ката 80% жетиши мүмкүн экени көрсөтүлгөн. Жерге туташтыруучу түзүлүштүн каршылыгы эсептелген жана эксперименталдык маанилерин салыштырууда дал келүүнүн жогорку даражасын көрсөттү.

Түйүндүү сөздөр: вертикалдуу электрдик зонд; топурак; эки жана үч катмарлуу топурак модели; энергетикалык түзүлүш; жерге туташтыруучу түзүлүш; вертикалдуу электрод.

**INVESTIGATION OF THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS
OF THE SOIL IN THE LOCATIONS OF HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS
IN KYRGYZSTAN**

A.K. Asanov, N.K. Dzhusupbekova, R.B. Tentiev, Zh.A. Bokoeva

Abstract. Based on the analysis of the results of vertical electrical sounding of soils at the locations of energy facilities in Kyrgyzstan, a statistical distribution of soil layering and their thickness was obtained. The main relationships of soil

layers were determined using typical curves of vertical electrical sounding. It was determined that the location of more than half of the high-voltage energy facilities in Kyrgyzstan is at an altitude of more than 1000 m above sea level, which characterizes complex geophysical soil conditions. The paper analyzes the influence of climatic effects on the upper soil layer and determines the errors in calculating the parameters of vertical electrodes. It is shown that the error in determining the resistance value of vertical electrodes can reach up to 80%. Comparison of the calculated and experimental values of the resistance of the grounding device showed a high degree of coincidence.

Keywords: vertical electrical sounding; soil; two- and three-layer soil model; energy facility; grounding device; vertical electrode.

Введение. Заземляющее устройство (ЗУ) электроустановок выполняет три основные функции: обеспечивает электробезопасность для обслуживающего персонала, обеспечивает нормальный режим работы электрооборудования, а также электромагнитную совместимость технических средств в электроэнергетике [1].

Согласно Правилу устройства электроустановок (ПУЭ) [2], сопротивление заземляющего устройства (ЗУ) в сетях, напряжением выше 1000 В с эффективно заземленной нейтралью, должно иметь в любое время года не более 0,5 Ом с учетом сопротивления естественных и искусственных заземлителей. Но в районах с большим удельным сопротивлением земли $\rho > 500$ Ом·м, допускается повысить требуемые значения сопротивлений ЗУ в 0,002р раз.

Сопротивление ЗУ зависит от удельного электрического сопротивления грунта (УЭС). Чем меньше УЭС грунта, тем меньше сопротивление растеканию тока, следовательно, более благоприятные условия для ЗУ.

УЭС грунта зависит от состава грунта, размеров и плотности прилегания друг к другу его частиц, влажности и температуры, концентрации в нём растворимых химических веществ, а также влияния грунтовых вод. Сопротивление верхнего слоя грунта изменяется в зависимости от атмосферных и климатических условий: в зимний период времени земля промерзает, увеличивая сопротивление грунта, а с наступлением теплоты она оттаивает и увлажняет грунт, повышая электрическую проводимость, а летом просыхая, приводит к увеличению сопротивления грунта.

Кыргызстан – горная страна, в которой нет отметок ниже 500 м над уровнем моря: около 43 % территории находится на высотах более 3000 м, и только около 15 % – на высотах ниже 1500 м. Характеристика грунтов Кыргызстана в горной местности и у подножия гор представлена преимущественно галечниками, валунниками, щебнем, песками, песчаниками, глинами, суглинками, известняками, конгломератами, алевролитами, мергелами – что характеризуется большими УЭС; в равнинной местности грунты представлены в основном каштановыми почвами, суглинками, супесями, глинами – с малыми УЭС, а также песками, песчаниками, гравийно-галечниками с песчаным заполнителем [3, 4].

На территории Кыргызстана имеются более 200 высоковольтных подстанций (ПС) 110 кВ и выше, расположены они на высоте от 600 до 3800 м над уровнем моря (рисунок 1).

На рисунке 1 видно, что более половины ПС расположены на высоте более 1000 м над уровнем моря, это говорит о том, что большинство из них находятся в грунтах с большим УЭС.

Вводом мощностей ТЭЦ г. Бишкек, Камбаратинской ГЭС-2, модернизацией ГЭС на территории Кыргызстана, строительством и вводом ЛЭП 500 кВ «Датка-Кемин» и др., увеличились токи короткого замыкания (КЗ) в сетях напряжением 110 кВ и выше. КЗ и удары молнии на шинах подстанций являются наиболее мощными источниками электромагнитных помех для всех вторичных цепей. Указанные процессы сопровождаются протеканием больших токов по ЗУ и возникновению больших потенциалов, что приводит к пробое изоляции кабелей вторичных цепей, ложному срабатыванию устройств релейной защиты и автоматики, нарушению электромагнитной совместимости и выходу из строя электрооборудования, приводящие к сложным авариям. Примером этого могут служить аварии [5] на Курпсайской ГЭС (2012 г.), ПС «Кыргызская» (2014 г.), ПС «Орок» (2016 г.), ПС «Айни» (2017 г.), ПС «Ананьево» (2022 г.), а также систематическим нарушениям ЭМС в работе РЗА на ПС. Следует отметить, что все эти энергообъекты расположены в местах с большими УЭС грунта.

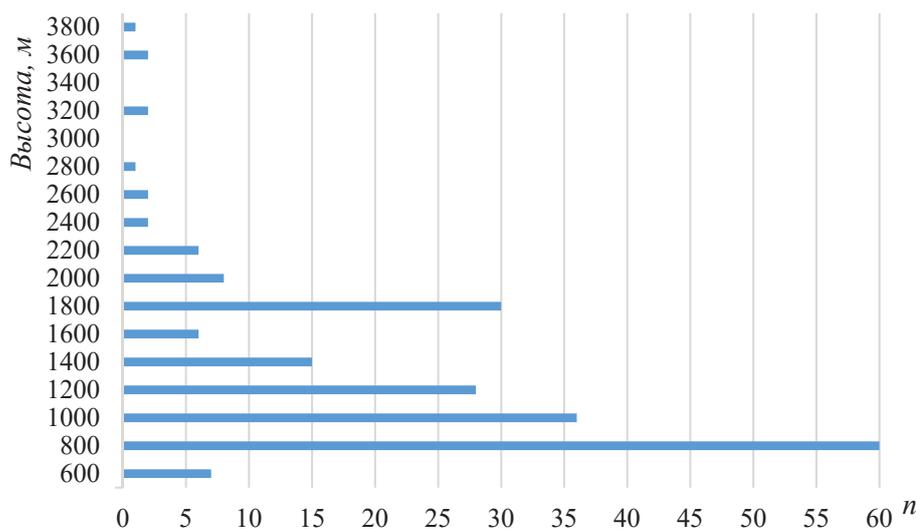


Рисунок 1 – Расположение высоковольтных ПС КР над уровнем моря

В сложившейся ситуации исследование электрофизических характеристик грунта и определение оптимальных конструкций ЗУ является приоритетной задачей по обеспечению нормального функционирования электрооборудования, электробезопасности и электромагнитной совместимости технических средств на объектах электроэнергетики.

В период с 2021 по 2024 г. было проведено инструментальное обследование параметров ЗУ и электрических характеристик грунтов 87 ПС 110–500 кВ по всем регионам Кыргызстана (рисунок 2), что составляет не менее 4 % от всех ПС 110 кВ и выше.

Измерения удельного сопротивления грунта проводили за пределами подстанции по методу вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [4].

Сопротивление растеканию измеряли с помощью классического метода «амперметра-вольтметра» интегрированным прибором MRU-120. Токовый и потенциальный зонды были вынесены за территорию ПС на расстояние порядка 3D (диагональ) метров соответственно. Измеренное сопротивление растеканию приведено с учетом естественных заземлителей (система «трос-опора», брони кабелей и др.).

Анализ результатов ВЭЗ. Согласно экспериментальных кривых ВЭЗ и интерпретации кривых ВЭЗ [5, 6] были определены параметры многослойной модели грунта, которые представлены на рисунках 3–5.

Анализ экспериментальных кривых ВЭЗ и гистограмм показал, что на территории энергообъектов УЭС грунтов для одно- и двухслойных грунтов лежат в пределах от 25 до 1670 Ом·м, с мощностью верхнего слоя от 1,5 до 25 метров, а для трехслойного грунта – от 15 до 3962 Ом·м, с мощностью h_1 от 1,1 до 10 метров, h_2 – от 3 до 23 метров. В таблице 1 приведены статистические характеристики УЭС грунта по типовым кривым ВЭЗ.

Таким образом, определены диапазоны предельных и наиболее часто встречающихся значений ЭФХ грунтов в местах расположения энергообъектов в рассматриваемых регионах.

Оценка сопротивления вертикального электрода с учетом климатического воздействия на верхние слои грунта. В конфигурации ЗУ одним из основных элементов являются вертикальные заземлители, так как их нижняя часть менее подвержена климатическим изменениям. Горизонтальные заземлители и верхняя часть вертикальных электродов в зимнее время при промерзании грунта

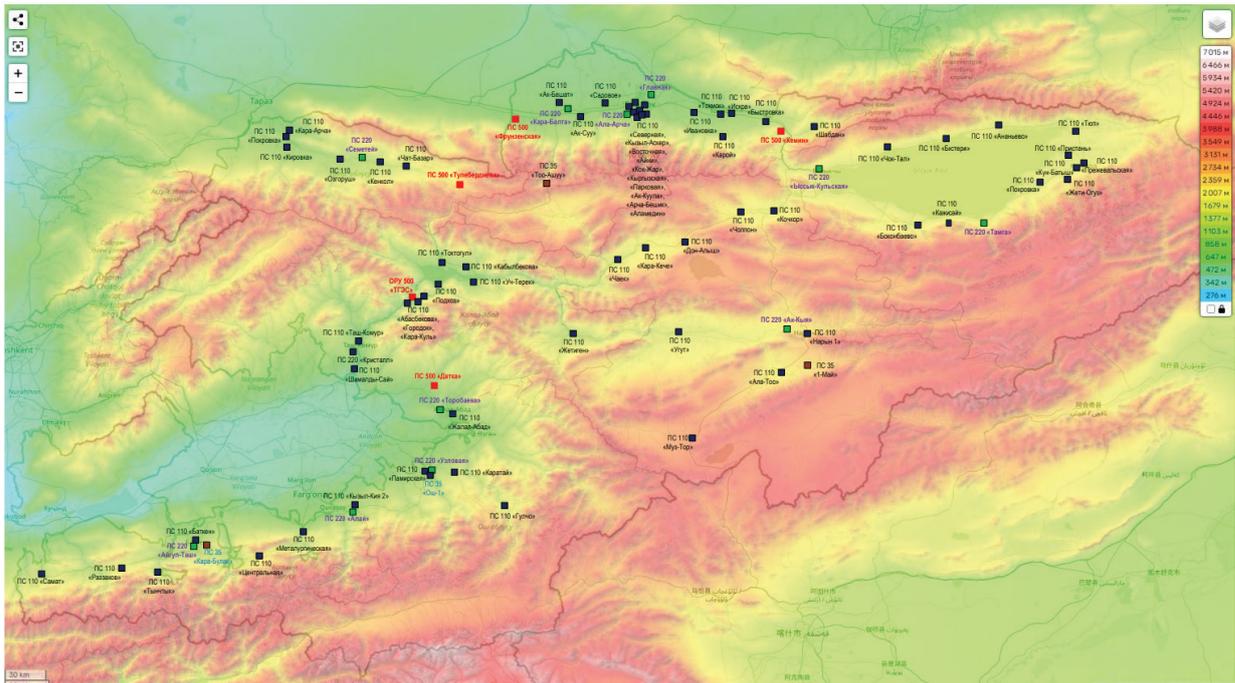


Рисунок 2 – Топографическое расположение исследованных энергообъектов Кыргызстана

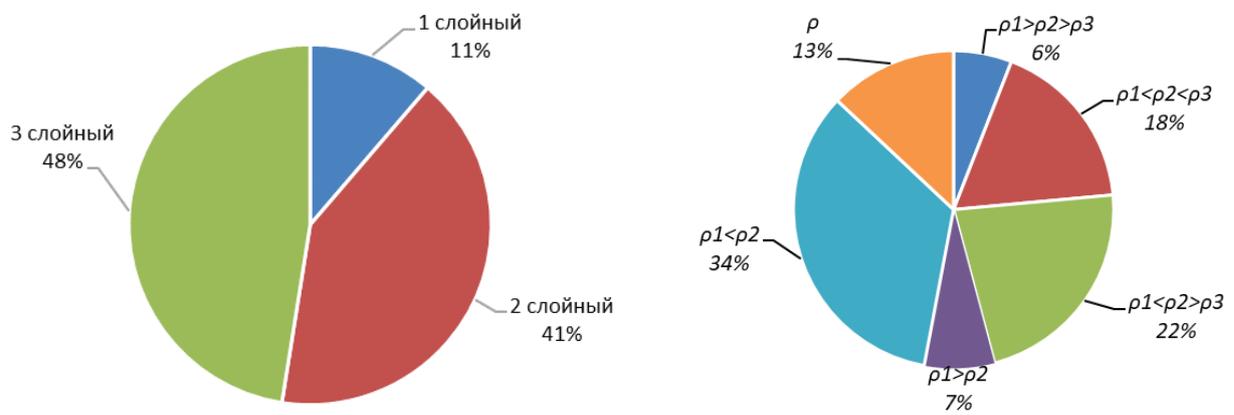


Рисунок 3 – Распределение на типовые кривые ВЭЭ

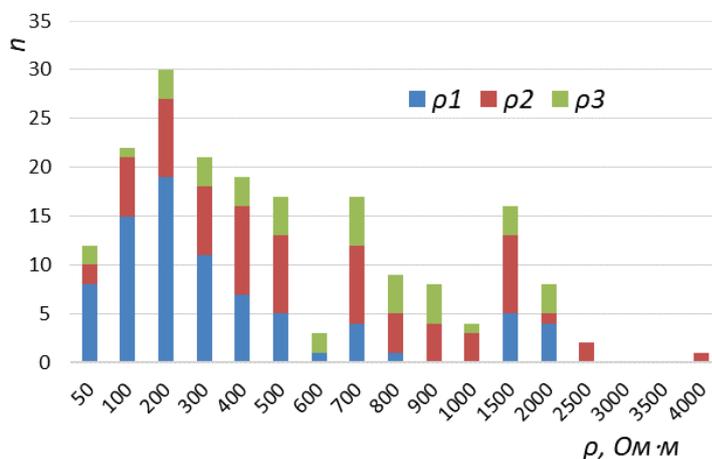


Рисунок 4 – Гистограмма распределения УЭС грунта

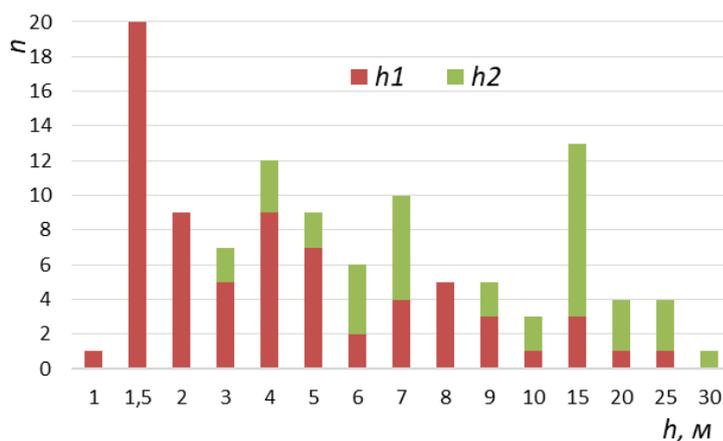


Рисунок 5 – Статистическое распределение мощности слоев УЭС

Таблица 1 – Статические характеристики УЭС

Кривые ВЭС	Среднестатистические характеристики ВЭС							
	ρ_1/ρ_2	ρ_2/ρ_3	ρ_1/ρ_3	$\rho_{1\text{мин}}/\rho_{1\text{мах}},$ Ом·м	$\rho_{2\text{мин}}/\rho_{2\text{мах}},$ Ом·м	$\rho_{3\text{мин}}/\rho_{3\text{мах}},$ Ом·м	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$
$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	2,02	2,47	4,97	187/1650	95/910	50/480	5,5	7,6
$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	0,43	0,60	0,26	15/675	53/1030	150/1800	2,4	7,7
$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	0,45	1,73	0,78	67/1520	115/3962	50/1940	2,8	13,7
$\rho_1 > \rho_2$	1,62	-	-	25/1350	30/1370	-	12,6	-
$\rho_1 < \rho_2$	0,49	-	-			-	5,6	-
ρ_1	-	-	-	36/548	-	-	-	-

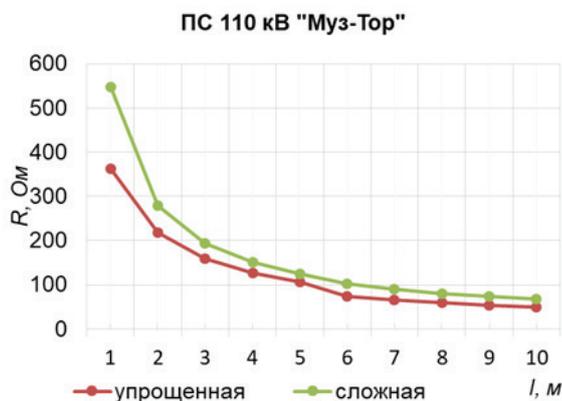


Рисунок 6 – Зависимость сопротивления вертикального электрода от ее длины с учетом климатических коэффициентов

увеличивает их сопротивление. В этом случае возможно использовать глубокий вертикальный заземлитель, который размещается в пробуренном в грунте отверстии. Чем длиннее вертикальный электрод, тем больше площадь соприкосновения с грунтом, что создает благоприятные условия для перехода токов в грунт.

При расчете по упрощенной и сложной методике было рассмотрено сопротивление одиночного заземлителя ($L_{\text{в}} = l \div 10$ м) [7]. Расчет производили для ПС 110 кВ «Муз-Тор», которая находится на высоте 3200 м над уровнем моря, где средняя многолетняя низшая температура января составляет -34 °С, а средняя многолетняя высшая температура июля – 16 °С. Такие значения средних температур характерны для первой климатической зоны, где глубина промерзания грунта составляет 2,2 м. Климатические коэффициенты для вертикальных электродов длиной 3–4 метра составляют $\psi = 1,65$, для электродов длиной 5 м – 1,35 [3, 8].

Анализ графика на рисунке 6 позволяет сделать вывод, что с увеличением длины вертикального электрода влияние сезонного коэффициента довольно мало, поскольку только верхний слой электрода подвержен климатическому влиянию. При коротких электродах погрешность в расчетах может достигать 80 %.

Выводы. Определены статистические характеристики УЭС грунтов в ряде регионов Кыргызстана. Наиболее распространенными геоэлектрическими структурами в местах расположения энергообъектов в рассматриваемых регионах являются двух- и трехслойные грунты. Проведенный анализ показал, что при расчете параметров вертикального электрода необходимо учитывать климатическое воздействие на верхний слой грунта. Применение упрощенных методик при расчете параметров вертикального электрода может привести к существенным отклонениям в расчетах до 80 %. В дальнейшем необходимо постоянно дополнять базу данных ЭФХ грунтов отдельных регионов Кыргызстана.

Исследования проведены при государственной поддержке в рамках гранта МОуН КР №0007818.

Поступила: 06.10.24; рецензирована: 21.11.24; принята: 22.12.24.

Литература

1. СТО 56947007-29.130.15.114-2012. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002.
3. Геологическая карта Киргизской Республики. 2008 г. URL: http://neotec.ginras.ru/neomaps/M005_Kyrgyzstan_1980_Geology.jpg (дата обращения: 12.11.2024).

4. *Борисов Р.К.* Заземляющие устройства электроустановок. Требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкции, сооружение / Р.К. Борисов и др. М.: Изд. дом МЭИ, 2013. 360 с.
5. Исследования электромагнитной обстановки объектов электроэнергетики и обеспечение электромагнитной совместимости устройств в электрических сетях // Отчет НИР за 2023 г. Бишкек: НИИ энергетики и связи при КГТУ им. И. Раззакова, 2023. 69 с.
6. *Асанов А.К.* Исследование электрофизических характеристик грунта энергообъектов Кыргызстана / А.К. Асанов, Н.К. Джусупбекова, Б.К. Батырбеков // Известия вузов Кыргызстана. 2022. № 6. С. 3–8.
7. *Асанов А.К.* Исследование влияния сопротивления грунта на сопротивление заземляющих устройств (на примере Нарынской области) / А.К. Асанов, Б.Ж. Джолдошбеков, Н.К. Джусупбекова, М.К. Аркарчиева // Проблемы автоматики и управления. Бишкек, 2022. № 2 (44). С. 70–76.
8. Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Изд. 16-е с изм. и доп. Часть III. Б.: МЧС КР, 2019. 765 с.