

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2022, №1, Том 14 / 2022, No 1, Vol 14 <https://esj.today/issue-1-2022.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/07NZVN122.pdf>

DOI: 10.15862/07NZVN122 (<https://doi.org/10.15862/07NZVN122>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нерадовский, Л. Г. Применение метода вертикального электрического зондирования для расчленения низких надпойменных террас р. Лены в окрестностях г. Якутска / Л. Г. Нерадовский // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/07NZVN122.pdf> DOI: 10.15862/07NZVN122

For citation:

Neradovsky L.G. Application of vertical electrical sounding method to differentiate low terraces of the Lena river near Yakutsk. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(1): 07NZVN122. Available at: <https://esj.today/PDF/07NZVN122.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.15862/07NZVN122

Подготовка и работа над статьёй оказались возможными, благодаря собранному методом ВЭЗ в прошлом веке фактическому материалу при долговременной всесторонней административной и моральной поддержке ныне покойных управляющих ЯкутГИСИЗ Анатолия Александровича Иванилова, Александра Николаевича Коркина и Петра Фёдоровича Фёдорова

УДК 551.4.01+550.370

Нерадовский Леонид Георгиевич

ФГБУН «Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова
Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия

Старший научный сотрудник

Доктор технических наук

E-mail: L031950N@ya.ru

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=394470

Применение метода вертикального электрического зондирования для расчленения низких надпойменных террас р. Лены в окрестностях г. Якутска

Аннотация. Автором предлагается рассматривать удельное электрическое сопротивление в качестве нового индикатора для решения одной из задач геоморфологии. Подтверждая или отвергая гипотезу о том, что геоморфологический облик долины р. Лены «Туймаады», где расположен г. Якутск, состоит не из одной, а из двух низких надпойменных террас. Для решения этой задачи были использованы данные метода вертикального электрического зондирования. При небольшой, но статистически значимой разнице выборочных оценок средних сопротивлений они закономерно растут при переходе с первой Якутской террасы на более высокую вторую Сергелляхскую террасу в пределах всей долины «Туймаады». Опираясь на данные инженерно-геологических изысканий, разница в средних оценках сопротивлений надпойменных террас объясняется изменчивостью строения мёрзлых песков. В этой изменчивости наряду с незначительным действием факторов и теплового, криогенного состояния доминирующим фактором выступает фактор вещественного состава, порождающий существенную изменчивость физико-механических свойств песков. По данным изысканий при переходе с Якутской на Сергелляхскую террасу пески мелкой зернистости сменяются более древними песками средней зернистости. С закономерным снижением средних показателей суммарной влажности, пористости и роста плотности минерального скелета. Статистический анализ данных метода электрического зондирования подтверждает выдвинутую гипотезу и вместе с ней представления предшественников геоморфологов. А именно, долина «Туймаада» состоит не из одной, а из двух низких разновысотных

надпойменных террас. Надежность вероятностно-статистических решений, на которые опирается вывод, достаточно высока и не опускается ниже 70 %.

Ключевые слова: долина «Туймаада»; геоморфология; Якутская и Сергелляхская терраса; аллювиальные пески; метод вертикального электрического зондирования; удельное электрическое сопротивление; вероятностные распределения; гистограммы; средние значения

Введение

В своей обзорной статье С.В. Харченко обращается к читателям журнала «Геоморфология» с призывом решать, накопившиеся в области геоморфологии проблемы и, в частности, проблему конвергенции форм рельефа, с привлечением иных или, точнее сказать, новых индикаторов [1]. Автор настоящей статьи решил откликнуться на этот призыв и опубликовать результат применения одного из таких индикаторов с целью уточнения числа низких надпойменных террас долины р. Лены в окрестностях г. Якутска. Речь идёт о применении базовой в области геоэлектрики электрофизической характеристики — удельного электрического сопротивления ($УЭС$), определяемой методом вертикального электрического зондирования ($ВЭЗ$) на постоянном токе. Почти вековой опыт применения $УЭС$ в разных областях наук о Земле свидетельствует, что среди других петрофизических характеристик, получаемых разными методами геофизики, она наиболее чувствительна к полному или частичному изменению геологических образований. Полное изменение происходит в тех редких случаях, когда нет постоянства ни в составе, ни в свойствах, ни в состоянии. Частичное изменение касается одного или нескольких свойств геологических образований при постоянстве их состава.

Первый положительный опыт применения $УЭС$ ¹ для решения задач геоморфологии в криолитозоне Центрально-Якутской низменности был получен В.Н. Ефремовым в 2003 г. с помощью метода радиоимпедансного зондирования [2]. Этим методом геофизики было уточнено плановое положение нечетко выраженных в рельефе Лено-Амгинского междуречья границ правобережных надпойменных террас долины р. Лены в среднем её течении в районе г. Якутска. Главный результат работы В.Н. Ефремова состоит в следующем.

Аллювиальные пески Бестяхской террасы² (преимущественно дьолкуминской свиты) представляют собой почти однородную толщу с относительно высокими значениями $УЭС$ (2000–3000 Ом·м). Несколько меньшие значения $УЭС$ (около 1000 Ом·м) имеют лёссово-ледовые отложения едомной свиты Тюнгулюнской террасы. Ещё более низкими и близкими значениями $УЭС$ (200–400 Ом·м) характеризуется основной горизонт песков Абалахской и Маганской террас. Близость значений $УЭС$ и иных параметров геоэлектрического строения В.Н. Ефремов посчитал достаточно весомым дополнительным аргументом со стороны геофизики, подтверждающим правильность решения известного исследователя геокриолитологического строения Лено-Алданской впадины М.С. Иванова, предложившего объединить Абалахскую и Маганскую террасы в единую Абалахскую равнину.

В отличие от работы В.Н. Ефремова в настоящей статье представлены результаты изучения $УЭС$ не методом импеданса на переменном токе высокой частоты, а методом $ВЭЗ$ на постоянном токе. Работы этим методом были выполнены в 70–90-х годах прошлого века в левобережной части долины р. Лены, где построен г. Якутск. Не лишне добавить, что в

¹ Вычисленной по значениям модуля и фазы импеданса.

² Некоторые исследователи считают, что пески этой террасы по некоторым петрографическим признакам имеют эоловое происхождение.

обозначенный период времени в г. Якутске и его окрестностях происходил интенсивный процесс массового строительства объектов промышленного, гражданского и сельскохозяйственного назначения. В этом процессе метод ВЭЗ до 1985 г. постоянно применялся для решения разных задач в составе инженерно-геологических изысканий. Сначала они выполнялись Южно-Якутским отделением Красноярского треста инженерно-строительных изысканий, а затем Якутским трестом инженерно-строительных изысканий (ЯкутТИСИЗ)³.

Благодаря благоприятным условиям применения метода ВЭЗ и других методов геофизики к началу XX века в исследуемой части долины р. Лены удалось собрать большой по объёму и разнообразный по содержанию фактический материал по петрофизическим характеристикам мёрзлых четвертичных отложений.

Выбор не всех петрофизических характеристик⁴, а только лишь одной характеристики УЭС для изучения мёрзлых четвертичных отложений низких надпойменных террас р. Лены в окрестностях г. Якутска объясняется тремя причинами. Во-первых, невозможностью изложить в полной мере результаты исследований по всем геофизическим характеристикам в рамках одной статьи. Во-вторых, высокой чувствительностью УЭС к совокупному изменению состава, свойств и состояния мёрзлых четвертичных отложений низких надпойменных террас долины р. Лены. В-третьих, и это проистекает из второй причины, основной по мощности слой песков среди других слоёв геоэлектрического разреза четвертичных отложений уверенно выделялся на кривых ВЭЗ. Тем самым, создавая благоприятные условия для более точного определения значений УЭС песков при количественной интерпретации кривых ВЭЗ.

Главная задача настоящей статьи состояла в изучении вероятностной изменчивости значений УЭС аллювиальных песков вдоль низких надпойменных террас долины р. Лены и между ними. Этот аспект исследований важен тем, что дает, хотя и частное (по одной характеристике УЭС), но, тем не менее, первостепенное по своей значимости петрофизическое основание, чтобы решить возникшую после призыва С.В. Харченко интересную дилемму. Речь идёт об ответе на вопрос, есть ли разница в средних значениях УЭС аллювиальных песков Якутской и Сергелляхской террас в пределах изученной долины р. Лены.

При статистически значимой разнице средних значений УЭС следует считать правильной с заданной доверительной вероятностью схему геоморфологического строения долины «Туймаады», разработанную С.С. Коржуевым [3], П.А. Соловьёвым [4], В.С. Гриненко и др. [5] вместе с их предшественниками и учениками. По этой традиционной схеме⁵ долина р. Лены в окрестностях г. Якутска состоит из 2-х вложенных друг в друга низких надпойменных террас. Первая терраса голоценового возраста называется Якутской. Вторая терраса голоценового или позднего неоплейстоценового возраста называется Сергелляхской. При отсутствии разницы в УЭС принимается альтернативный вариант ответа. В этом случае будет справедливым вывод В.В. Спектра и др. [6], сделанный в 2008 г. на основе детальных стратиграфических определений возраста четвертичных отложений. В соответствии с этим выводом в долине р. Лены в окрестностях г. Якутска существует только одна разновысотная надпойменная безымянная терраса дриас-голоценового возраста.

³ В прошлом веке, начиная с 80-х годов, трест ЯкутТИСИЗ был базовой организацией НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР, проводящей изыскательские работы на всей территории ЯАССР (Якутской автономной советской социалистической республики). Ныне Республика Саха (Якутия).

⁴ Методом преломленных волн была изучена скорость распространения упругих продольных волн низкой частоты, а методом георадиолокации — скорость распространения и удельное затухание электромагнитных волн высокой частоты.

⁵ Она до сих пор применяется при решении инженерно-геологических задач.

Район исследований

Район исследований, где методом ВЭЗ определены значения УЭС аллювиальных песков, расположен в хорошо изученной в инженерно-геологическом отношении древней долине якутского народа «Туймаада». Она находится в расширенной левобережной части р. Лены в среднем её течении между Табагинским мысом на юге и Кангаласским мысом на севере. В центральной части долины расположен г. Якутск, а в остальной части находятся сёла, рабочие поселки, дачи и объекты промышленно-складской инфраструктуры. Протяженность долины составляет около 70 км, а ширина в максимальном измерении достигает 11–15 км. Пойма долины «Туймаады» до настоящего времени не застроена. Исключение — участок высокой поймы, расположенный в полосе расположения г. Якутска, называемый местным населением «Зелёный Луг». Здесь, на искусственно возведенной толще промерзающих песков, намытых гидромеханическим способом из русла речных протоков, построены жилые дома новых микрорайонов 202 и 203.

По данным гидрогеологических исследований, выполненных Якутской поисково-съёмочной экспедицией (ЯПСЭ) на топооснове масштаба 1:10000 и 1:25000 абсолютные отметки высоты поверхности высокой поймы равны 90–93 м [7]. Ниже отметки 90 м расположена низкая пойма и русло р. Лены.

Якутская терраса с абсолютными отметками поверхности 93–97 м (высота 10–12 м над уровнем уреза воды в р. Лена) имеет очень сложное строение микрорельефа и гидрографической сети. Среди множества водоемов на террасе расположены два крупных озера. В северной части террасы в районе аэропорта г. Якутска расположено озеро «Белое», а в центральной части террасы в районе университетского городка и Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН расположено озеро «Сайсарское». Ширина террасы около 2 км. В г. Якутске бровка террасы с передовым уступом высотой 2–4 м четко выражена на границе с поймой по ул. Чернышевского [7].

Сергелляхская терраса высотой 15–20 м над урезом воды р. Лена имеет слабоволнистую поверхность, осложненную многочисленными сухими или заполненными водой понижениями разных форм и размеров (озёра, старицы, протоки). Наиболее крупным водоемом на террасе, является озеро «Сергелляхское» разных форм и размеров. Абсолютные отметки поверхности террасы варьируют от 98 до 103 м. На сравнительно небольших по размерам и локализованных по местонахождению возвышенных сухих участках грибовидной формы, заросших сосновым лесом, высотные отметки террасы в ряде случаев достигают 107–110 м. Ширина террасы около 4 км. По тыловому шву террасы на границе с левым берегом долины «Туймаады» развита система линейно ориентированных озёр и стариц [7].

Мощность четвертичных отложений в целом, закономерно возрастает от русла р. Лены к её левому берегу. Здесь на дневную поверхность выходят осадочные породы юрского возраста (песчаники, алевролиты и алевроиты). Этот выход коренного основания р. Лены наблюдается в виде уступа эрозионной поверхности Приленского плато высотой 100–120 м над долиной «Туймаада» [7]. В пойме и на надпойменных террасах коренные породы преимущественно залегают на глубине 12,4–14,5 и 16,2–22,7 м.

По данным ЯкутГИСИЗ, ЯПСЭ [7], А.В. Степанова и др. [8], обобщенный инженерно-геологический разрез мёрзлой толщи четвертичных отложений долины «Туймаады» имеет следующее строение:

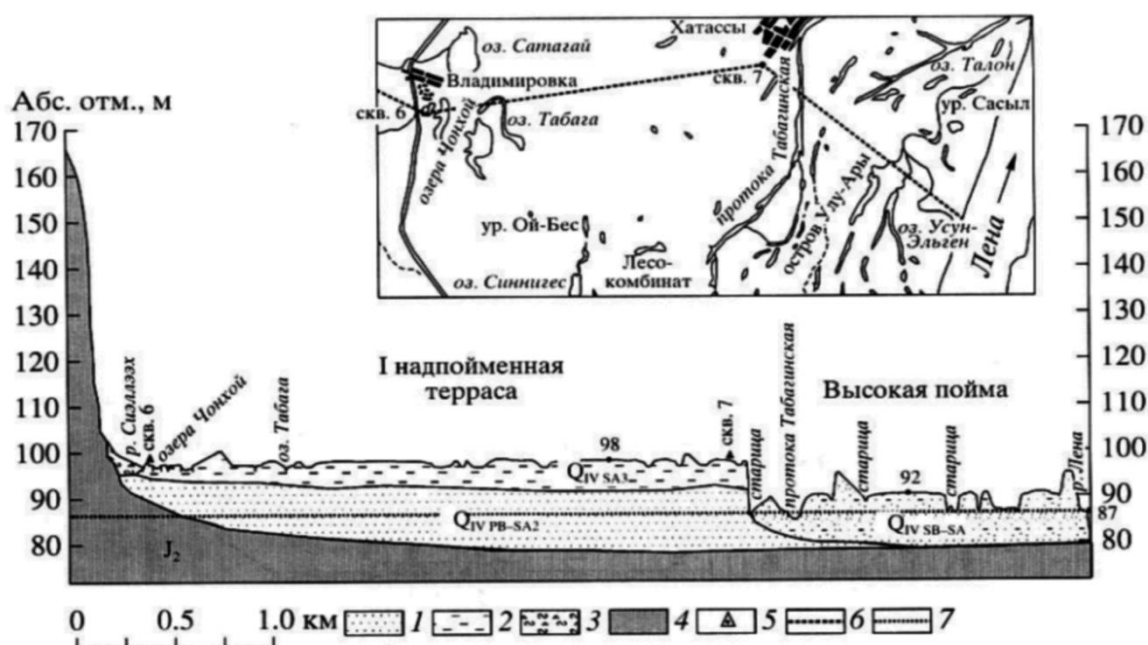
1 слой. Засоленные суглинки и супеси. Глубина залегания границ слоя 1,6–7,8 м при среднем значении мощности 2,6 м;

2 слой. Нельдистые и преимущественно незасоленные пески пылеватые и мелко-среднезернистые. Крупнозернистые пески встречаются редко. Глубина залегания границ слоя 10,3–24,0 м. Мощность слоя 8,7–16,2 м при среднем значении 14,7 м.;

3 слой. Гравийно-галечниковые отложения с примесью песков. Глубина залегания границ слоя 11,0–28,2 м. Мощность слоя 0,7–4,2 м при среднем значении 2,7 м.;

4 слой. Коренные породы осадочного генезиса (преимущественно песчаники верхней и средней юры). Глубина залегания слоя от 7,4 м в пойменной части долины “Туймады” до 28,2 м на надпойменных террасах при среднем значении 21,6 м.

Таким образом, начиная с глубины в среднем равной около 3 м, мерзлая толща четвертичных отложений, слагающая низкие надпойменные террасы долины “Туймады”, почти на 70 % сложена нельдистыми незасоленными мелко-среднезернистыми песками.



1 — пески; 2 — алевриты; 3 — склоновые отложения; 4 — юрские песчаники и алевриты; 5 — скважины; 6 — линия разреза на схеме-врезке; 7 — меженный уровень р. Лены. Индексы: QIV SA3 — голоцен, поздняя субатлантика; QIV PB-SA2 — голоцен, предбореал-средняя субатлантика; Q IV PB-SA — голоцен, суббореал-субатлантика; J2 — юрские отложения

Рисунок 1. Геолого-геоморфологический разрез долины р. Лены «Туймаада» (составлен В.В. Спектром и др. [6])

Средняя температура мёрзлых песков по результатам обобщения материалов термометрии за 1976–2011 гг. в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине установки свайных фундаментов 10–15 м равна $-(2,3 \div 3,0)^{\circ}\text{C}$ [9]. По данным ЯПСЭ относительно низкие температуры с разницей в несколько градусов на подошве слоя годовых теплооборотов преимущественно наблюдаются в песках Сергелляхской террасы на её возвышенных участках [7]. По данным И.Н. Вотякова⁶ вероятностное значение суммарной влажности дисперсных грунтов закономерно уменьшается, а объёмного веса (плотности) увеличивается в направлении роста грансостава, т. е. от песков пылеватых к пескам мелко-среднезернистым [10]. В отличие от этой региональной петрофизической закономерности есть другие закономерности частного порядка. Они установлены Ф.Е. Попенко

⁶ По результатам обобщения более тысяч определений значений физико-механических свойств мёрзлых четвертичных отложений Центрально-Якутской низменности.

по результатам обобщения свойств мёрзлых грунтов верхней части долины “Туймаады”, залегающих до глубины 10 м [8]. В этих результатах ключевым положением для настоящей статьи, является следующий факт. При переходе с Якутской на Сергелляхскую террасу пески мелкой крупности в целом сменяются более древними песками средней крупности с закономерным снижением средних показателей суммарной влажности, пористости и роста плотности минерального скелета. Эта тенденция по показателю длительного эквивалентного сцепления находит свое количественное выражение в большей прочности среднезернистых песков Сергелляхской террасы.

Геолого-геоморфологический разрез долины “Туймаады” в её южной части в направлении от села Хатассы к селу Владимировка показан на рисунке 1.

На рисунке 1 показана одна надпойменная терраса и названа она первой, тогда, как в представлении авторов рисунка в долине «Туймаада» существует только одна надпойменная терраса. При рассмотрении космического снимка этого участка долины «Туймаады» с помощью сервиса Google «Планета Земля» картина субширотной изменчивости высоты рельефа террасы становится более выразительной и понятной. По линии разреза она представляет собой чередование сухих возвышенностей с высотными отметками более 100 м на более низком высотном фоне сухих впадин и водоёмов с отметками около 97–98 м.

Метод исследований

Метод ВЭЗ выполнялся на площадках и трассах линейных инженерных сооружений, где были пробурены изыскательские скважины. Следует заметить, что на период проведения работ методом ВЭЗ почвогрунтовая поверхность застраиваемой территории г. Якутска за редким исключением была пригодна для гальванического заземления электродов питающей и приёмной линии. К 1990 г. большая часть поверхности почвогрунтов была заасфальтирована или забетонирована и стала непригодной для работ методом ВЭЗ.

Порядок работ методом ВЭЗ изложен в строительных нормах Госстроя РСФСР⁷. На начальных стадиях работ методом ВЭЗ применялся прибор ЭСК-1. В дальнейшем применялись приборы АЭ-72, АНЧ-1 и ИКС-50⁸. Работы методом ВЭЗ выполнялись симметричной 4-х электродной установкой Шлюмберже с длиной питающей линии от 0,6 до 300–680 м. Во избежание искажений со стороны рельефа установка ВЭЗ всегда ориентировалась вдоль простираения долины “Туймаады”.

Определение параметров геоэлектрического разреза мёрзлой толщи четвертичных отложений (значений УЭС, мощности и глубины залегания верхней и нижней границ слоёв) была выполнена ручным путем. С обычным на тот период времени применением способа 3-х слойных и вспомогательных палеток А.М. Пылаева [11]. Геологическая интерпретация слоёв геоэлектрического разреза выполнялась с привязкой к данным бурения скважин. В ходе интерпретации главное внимание уделялось выделению границ слоя песков. На кривых ВЭЗ этот слой, будучи самым мощным среди остальных слоев геоэлектрического разреза, отчетливо выделялся элементом “А” по промежуточному значению УЭС между глинистыми (суглинки, супеси) и крупнообломочными (гравий, галька) отложениями. Зная по данным бурения глубину

⁷ Инструкция по применению электроразведки при инженерных изысканиях в строительстве. Постоянный ток и естественное поле. Республиканские строительные нормы. РСН 43-74. М.: Изд-во Госстроя РСФСР, 1975. 120 с.

⁸ В прошлом веке эта, по современным меркам, примитивная техника измерений характеристик электрического поля на постоянном токе была чуть ли не единственной при проведении работ методом ВЭЗ в трестах инженерно-строительных изысканий НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР.

залегания границ песчаного слоя нетрудно было определить его значение УЭС в каждой точке пробуренной скважины. Погрешность определения УЭС была приемлемой для статистического анализа и варьировала от 3,2 до 16,5 % при среднем значении 7,7 %.

К большому сожалению, из-за отсутствия в распоряжении автора настоящей статьи топографо-геодезических данных⁹ нет возможности показать на картографической основе точки ВЭС и скважины, расположенные в долине «Туймаада». По этой же причине в настоящей статье нет планов, иллюстрирующих фоновые закономерности и локальные особенности изменения значений УЭС.

Обсуждение результатов исследований УЭС

Изучение вероятностной структуры УЭС выполнялось с помощью программы «Стадия» [12]. Описательные статистики УЭС слоя мёрзлых аллювиальных песков Якутской и Сергелляхской террас, полученные по трём секторам долины «Туймаады», представлены в таблице. Южная часть долины «Туймаады» между пос. Табага и г. Якутском, ради краткости, названа Табагинским сектором. Центральная часть долины в пределах г. Якутска названа Якутским сектором. Северная часть долины между г. Якутском и пос. Кангалассы названа Кангаласским сектором.

Гистограммы общего вероятностного распределения, построенные по всей совокупности фактического материала, состоящей из 784 значений УЭС, показаны на рисунке 2. Эти распределения, очевидно, не подчиняются теоретическому закону нормального распределения. Они носят мультимодальный характер, указывающий на пространственную неоднородность сформированной совокупности значений УЭС в долине «Туймаада». Три хорошо разрешенные между собой моды с максимумами гистограмм представляют обособленные группы распределений с разными особенностями изменчивости УЭС аллювиальных песков Якутской и Сергелляхской террас.

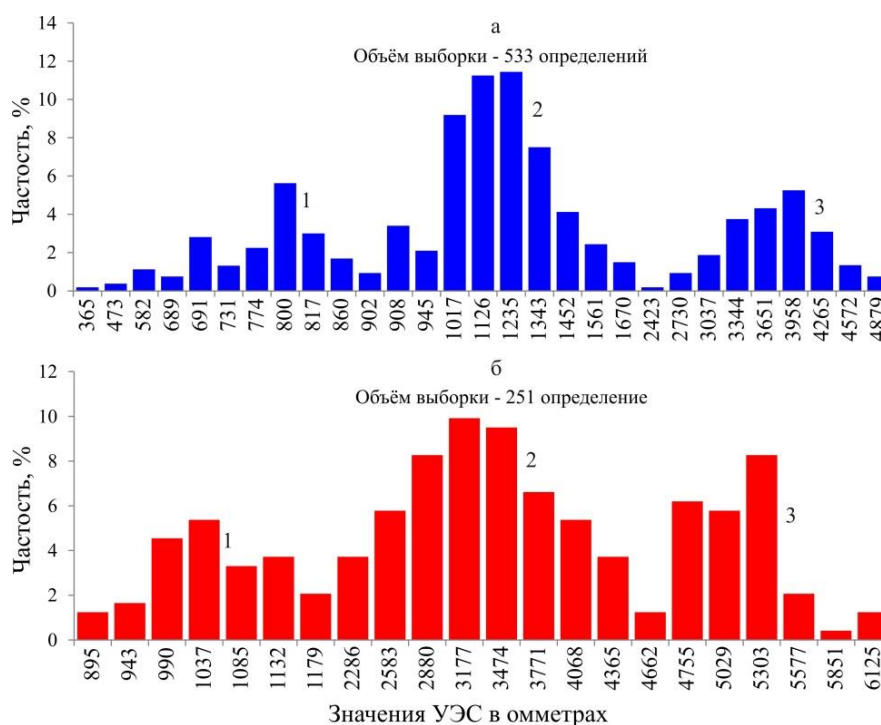
Таблица

**Статистики значений УЭС мёрзлых
аллювиальных песков низких надпойменных террас долины «Туймаады»**

Статистики	Значения УЭС, омметры					
	Якутская терраса			Сергелляхская терраса		
	1	2	3	1	2	3
Среднее арифметическое (САР)	1110	812	3792	3336	1046	5048
Медианное среднее	1115	817	3817	3281	1047	5018
Модальное среднее	1216	-	3921	3212	1014	5200
Стандартное отклонение	247.5	69.5	521.5	604.7	78.3	446.2
Коэффициент вариации, %	22.3	8.6	13.7	18.1	7.5	8.8
Минимальное значение	310	667	2269	2137	872	4070
Максимальное значение	1724	966	5033	4811	1203	6262
Количество определений	353	57	123	131	53	67
Уровень доверия САР (95,0 %)	25.9	18.4	93.1	101.5	21.6	108.8

*Примечание: 1 — Якутский сектор; 2 — Табагинский сектор; 3 — Кангаласский сектор.
Составлено автором*

⁹ После банкротства в 2014 г. архив ЯкутГИСИЗ стал недоступен.



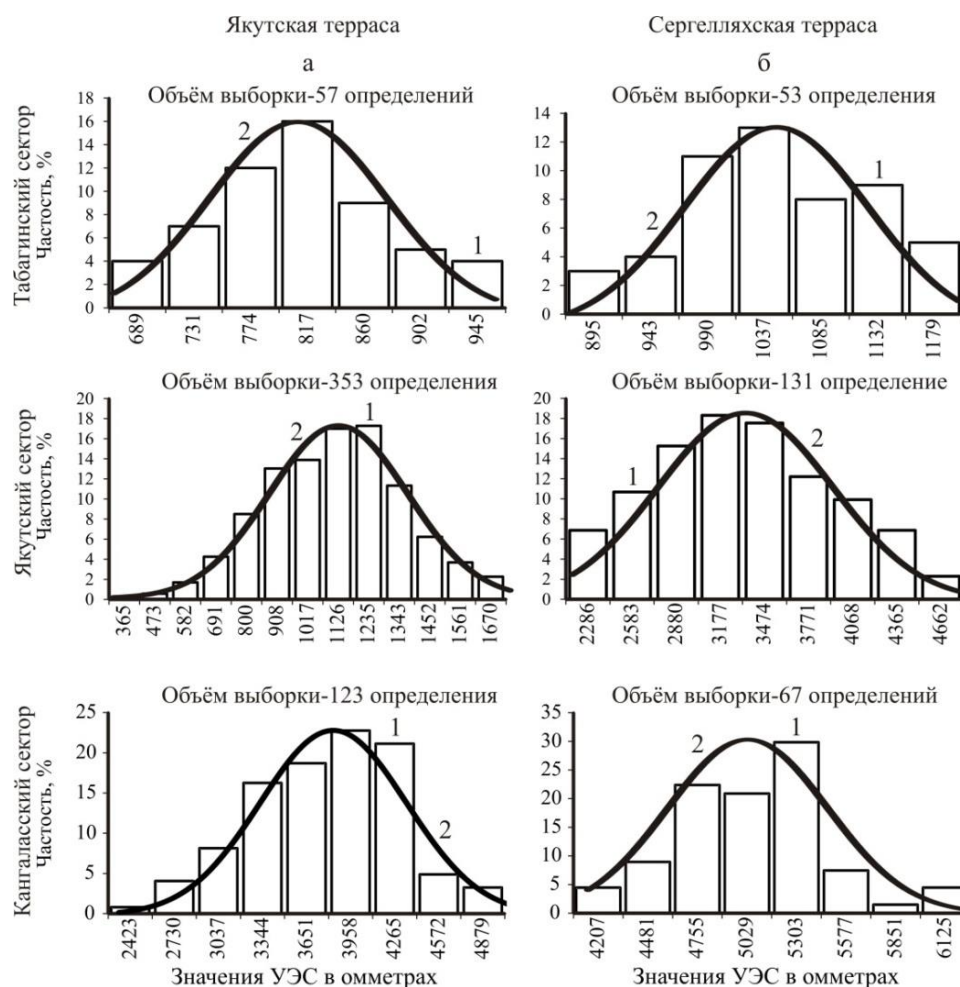
Средние вероятностные модальные значения УЭС песков: 1 — Табагинский сектор; 2 — Якутский сектор; 3 — Кангаласский сектор

Рисунок 2. Сводные гистограммы УЭС мёрзлых аллювиальных песков Якутской (а) и Сергелляхской (б) низких надпойменных террас долины “Туймаады” (составил автор)

Кластерный анализ, выполненный с учетом кодировки номеров точек ВЭЗ по принадлежности к Якутской или Сергелляхской террасе, а также значениям УЭС и мощности слоя песков по данным скважин, показал следующее. На Якутской террасе 1–3 третья мода с вероятностным средним значением УЭС, равным 800, 1126–1235 и 3958 омметра, охватывает группу точек ВЭЗ в Табагинском Якутском и Кангаласском секторе. Аналогичным образом распределены 1–3 моды средних значений УЭС по секторам Сергелляхской террасы: 1037, 3177–3474 и 5303 омметра.

Строгая тестовая проверка, сделанная с помощью программы «Стадия» по трём независимым друг от друга критериям (Колмогорова, омега-квадрат и хи-квадрат), показала, что во всех секторах значения УЭС распределены по нормальному вероятностному закону. Гистограммы и вариограммы этих распределений показаны на рисунке 3.

Казалось бы, этот факт нормальности распределений УЭС нарушает известное в области геоэлектрики положение, по которому распределение значений этой характеристики всегда должно подчиняться логнормальному вероятностному закону. Однако, как известно, общих правил без исключений не бывает. Такими исключениями в рассматриваемом случае, являются геоморфологические особенности распределений значений УЭС в секторах долины “Туймаады”. То есть особенности формирования в сравнительно небольших по размеру групповых выборках фактического материала однородной и сбалансированной возле средних значений вероятностной структуры с узким размахом изменчивости единичных значений УЭС. По коэффициенту вариации интегральный размах изменчивости УЭС на Якутской и Сергелляхской террасе соответственно составляет 8,5–22,3 и 7,5–18,1 % (таблица). Стоит добавить, что небольшая изменчивость значений УЭС, косвенным образом указывает на такую же меру совокупной изменчивости состава, состояния и свойств песков по субширотному простиранию террас.



1 — фактические гистограммы; 2 — теоретические гистограммы нормального вероятностного закона

Рисунок 3. Вероятностные распределения значений УЭС
мёрзлых аллювиальных песков Якутской (а) и Сергелляхской (б) террасы
в разных секторах долины «Туймаады» (составил автор)

Принадлежность распределений значений УЭС к нормальному закону дает возможность количественно оценить ошибки определения выборочных оценок средних арифметических значений УЭС по отношению к теоретическим оценкам генеральных средних УЭС. В математической статистике такие оценки рассматриваются, как математические ожидания средних УЭС при бесконечно большом числе определений.

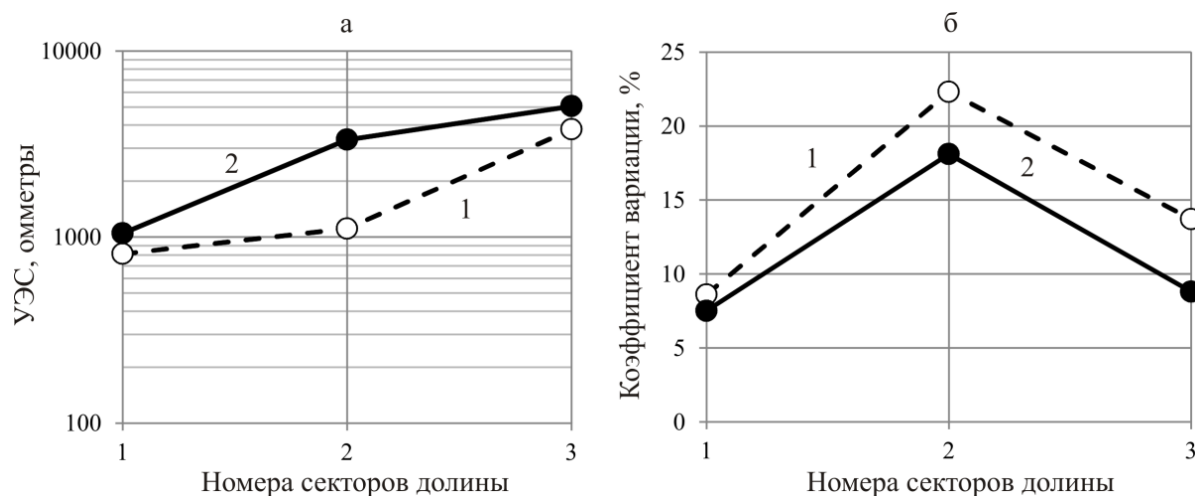
При доверительной вероятности 95 % среднеарифметические значения УЭС песков Якутской и Сергелляхской террасы в Якутском секторе с округлением равны 1110 ± 26 и 3340 ± 102 омметра (табл.). В Табагинском секторе средние значения УЭС равны 812 ± 18 и 1046 ± 22 омметра, а в Кангаласском секторе — 3792 ± 93 и 5048 ± 109 омметра.

Из этих значений следует, что в Якутском секторе относительные ошибки выборочных вероятностных оценок средних УЭС по отношению к теоретическим оценкам генеральных средних равны $26/1110 = 2,3 \%$ и $102/3336 = 3,1 \%$. Аналогичным образом определены ошибки для Табагинского и Кангаласского сектора. В них ошибки не превышают 3,0 %.

В целом, мёрзлые пески с массивной криогенной текстурой, слагающие основную часть Якутской и Сергелляхской террасы, имеют высокие средние значения УЭС. Объясняется это тем, что пески по своему однородному мелко-среднезернистому составу и умеренно низкой температуре около минус 2–3°C находятся в плотном твердомёрзлом состоянии. И при этом не

содержат или содержат в незначительных количествах легкорастворимые соли и незамёрзшую воду вместе с рассеянными примесями глинистых частиц, торфа и растительных остатков.

При общем для всей долины «Туймаады» при среднем значении УЭС песков 2524 омметра, частные средние значения УЭС в секторах долины изменяются от 812 до 5048 омметра. Графики этой изменчивости (рис. 4а) вместе с графиком коэффициента вариации (рис. 4б) построены в направлении от Табагинского сектора к Кангаласскому сектору.



Номера секторов долины «Туймаады»: 1 — Табагинский сектор; 2 — Якутский сектор; 3 — Кангаласский сектор

Рисунок 4. Латеральная динамика обобщённых по секторам средних значений УЭС (а) и коэффициента вариации (б) мёрзлых песков Якутской (1) и Сергелляхской (2) низких надпойменных террас долины р. Лены «Туймаады» (составил автор)

В представленных графиках наблюдается две закономерности и две локальных особенности. Во-первых, среднее секторальное значение УЭС песков Якутской и Сергелляхской террасы растёт в направлении с юга на север от Табагинского мыса к Кангаласскому мысу. Во-вторых, среднее секторальное значение УЭС растёт и при переходе с Якутской террасы Сергелляхскую террасу. Что касается локальных особенностей, то они приурочены к Якутскому и Кангаласскому сектору. В Якутском секторе локальная особенность проявляет себя максимальной разницей в широтном росте средних УЭС, достигающей 100 %. В Кангаласском секторе локальная особенность состоит в более высокой разнице коэффициента вариации, равной 43,6 %.

В целом, относительная разница широтного роста средних значений и вариативности УЭС в секторах долины «Туймаады» почти одинакова и составляет 28,4 и 20,8 %. Опираясь в работе [8] на данные Ф.Е. Попенко эта фоновая закономерность находит объяснение в разном возрасте, составе и плотности аллювиальных песков. Вполне возможно, что совокупное действие этих факторов порождает фоновый рост УЭС песков и в меридиональном направлении, т. е. от Табагинского мыса к Кангаласскому мысу.

Что касается Сергелляхской террасы, то она сложена в основном более древними и плотными среднезернистыми песками. На Якутской террасе, являющейся переходной частью рельефа между поймой и Сергелляхской террасой, доминируют мелкозернистые пески с подчинённым развитием пылеватых песков. В этих фациальных разностях в разном количестве присутствуют примеси и включения глинистых частиц, органических веществ и растительных остатков. Они, как известно, содержат в себе легкорастворимые соли и незамёрзшую воду. Поэтому присутствие в пылеватых песках этих парагенетических компонентов, хорошо проводящих электрический ток, приводит к уменьшению значений УЭС общей массы мелкозернистых песков, слагающих Якутскую террасу.

Более высокий рост средних значений УЭС в секторе Якутска при неизменной в долине «Туймаада» литогенной основе¹⁰ вероятнее всего, объясняется большей изменчивостью, нежели в других секторах, температуры и физико-механических свойств (весовой влажности, объемного веса, засоленности). Возможно, свой вклад вносят в эту изменчивость и петрографические характеристики песков (минеральный состав, размер и формы песчаных частиц, полиморфности и др.).

Таким образом, установленное по результатам статистического анализа различие средних значений и других характеристик вероятностных распределений УЭС (табл.) вместе с различием физико-механических характеристик, полученных по данным инженерно-геологических изысканий, даёт весомое основание говорить о петрофизическом различии аллювиальных песков Якутской и Сергелляхской террас.

Графики вариограмм убедительно демонстрируют надёжность различий нормальных вероятностных распределений характеристики УЭС и её средних значений для аллювиальных песков Якутской и Сергелляхской террас в каждом из изученных секторов долины «Туймаады» (рис. 5).

Стопроцентная степень надёжности статистического решения¹¹ в части распознавания различия по УЭС песков низких надпойменных террас установлена в Якутском секторе. Об этом удостоверяют непересекающиеся между собой ветви графиков вариограмм (рис. 5а). Здесь более всего пески террас различаются по составу и свойствам. В Табагинском и Кангаласском секторе контраст различия меньше (рис. 5б, в). Тем не менее, и здесь надёжность статистических решений в распознавании различия песков Якутской и Сергелляхской террасы по УЭС всё ещё высока (70,6 и 74,5 %).

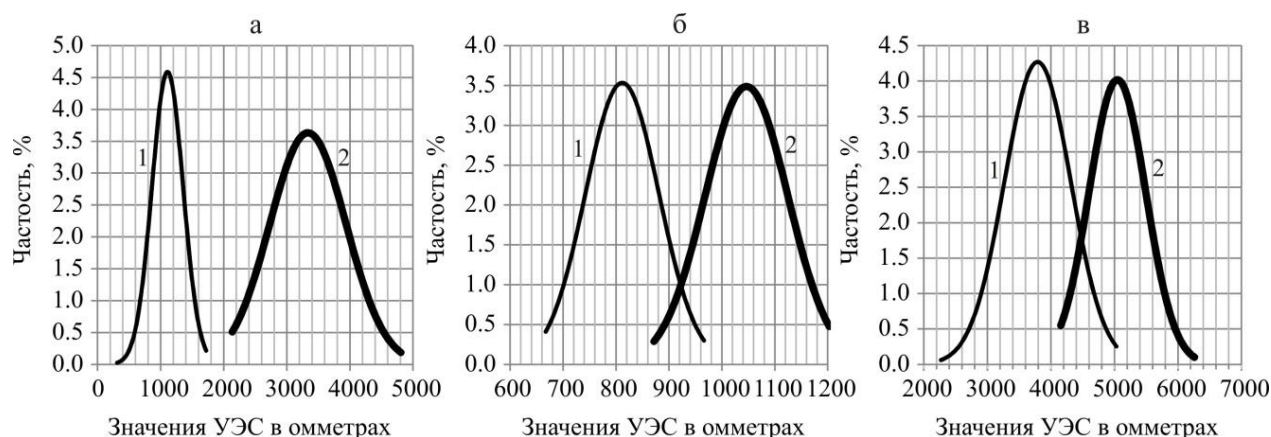


Рисунок 5. Теоретические вариограммы нормальных вероятностных распределений значений УЭС в Якутском секторе (а), Табагинском секторе (б) и Кангаласском секторе (в) долины р. Лены «Туймаады» мерзлых аллювиальных песков Якутской (1) и Сергелляхской (2) террасы

Заключение

Вероятностно-статистический анализ данных метода ВЭЗ установил разницу в средних значениях базовой электрофизической характеристики УЭС основного горизонта в мёрзлых четвертичных отложениях аллювиальных песков, слагающих низкие надпойменные террасы в

¹⁰ Основного по мощности, распространению и гранулометрическому составу слоя аллювиальных мелко-среднезернистых песков.

¹¹ Надёжность решения определяется, как разность суммарной вероятности ошибок 1-го и 2-го рода [13].

левобережной части долины р. Лены «Туймаада». На Якутской террасе с абсолютными отметками поверхности 93–97 м средние значения УЭС равны 812–3792 омметра. На Сергелляхской террасе с абсолютными отметками поверхности 98–103 м средние значения УЭС выше и равны 1046–5048 омметра. На этой террасе выше и пространственная вариативность характеристики УЭС.

Разница в средних оценках УЭС статистически значима и в целом, в долине «Туймаада» составляет 28,4 %, незначительно изменяясь в южной, центральной и северной части долины. По результатам вариограммного анализа надежность статистических решений в распознавании различия средних значений УЭС аллювиальных песков в разных частях долины «Туймаады» достаточно высока и не опускается ниже 70 %.

Разница в средних значениях УЭС вместе с разницей состава и свойств аллювиальных песков, рассматривается, как петрофизическое основание, подтверждающее правильность представлений предшественников геоморфологов в том, что долина «Туймаада» в окрестностях г. Якутска состоит не из одной, а из 2-х низких надпойменных террас: Якутской и Сергелляхской. С этой точки зрения результаты исследований В.В. Спектра, Н.Т. Бакулиной и В.Б. Спектра важны тем, что дают надёжную и детальную стратиграфическую оценку единых по дриас-голоценовому возрасту, но разных по петрофизике, высоте и другим геоморфологическим особенностям низких надпойменных террас долины «Туймаады».

В грамотном сочетании и заинтересованном применении морфологических и петрофизических характеристик геологических образований и, в частности четвертичных отложений в долине р. Лены видится в недалёком будущем общее плодотворное развитие наук о Земле на стыке геоморфологии, инженерной геологии, грунтоведения и геофизики. Только в этом сочетании в современный период времени открывается возможность изучения с разных сторон итога сложнейшей и длительной поочерёдной или совместной деятельности геологических, гидрогеологических, криогенных и климатических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко С.В. Новые задачи морфометрии рельефа и автоматизированные морфологические классификации в геоморфологии // Геоморфология. 2021. № 1. С. 3–21.
2. Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов / Отв. ред. А.Д. Андросов. Якутск: Изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН, 2013. 204 с.
3. Коржуев С.С. Геоморфология долины средней Лены и прилегающих районов. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. 151 с.
4. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 144 с.
5. Гриненко В.С., Камалетдинов В.А., Сластенов Ю.Л., Щербаков О.И. Геологическое строение Большого Якутска // Региональная геология Якутии. Якутск: Изд-во Якутского гос. ун-та, 1995. С. 3–20.
6. Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на «Якутском разбое» // Геоморфология. 2008. № 1. С. 87–94.

7. Петров С.Б., Безрук Л.Н. Отчет по изучению, детальному картированию и прогнозированию развития экзогенных геологических процессов на территории Большого Якутска в 1983–1985 гг. Том I (текст отчета). ПГО “Якутскгеология”. Инв. № 6848. 223 с.
8. Степанов А.В., Попенко Ф.Е., Рожин И.И. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2014. — 448 с.
9. Нерадовский Л.Г. Изменение фоновой температуры мерзлых грунтов в Якутске в период потепления климата в Сибири (1976–2011) // Криосфера Земли. 2020. Том XXIV. № 4. С. 46–57.
10. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии / Отв. ред. Р.М. Каменский. Новосибирск: Изд-во “Наука”, 1975. 175 с.
11. Пылаев А.М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. Издание второе, исправленное. М.: Недра, 1968. 148 с.
12. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных, 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во “ФОРУМ”: ИНФРА-М, 2006. 512 с.
13. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. М.: Недра, 1979. 280 с.

Neradovsky Leonid Georgievich

Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

E-mail: L031950N@ya.ru

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=394470

Application of vertical electrical sounding method to differentiate low terraces of the Lena river near Yakutsk

Abstract. The author proposes to consider the of electrical resistivity as a new indicator for solving one of the problems of geomorphology confirming or rejecting the hypothesis that the geomorphological appearance of the valley of the Lena River "Tuimaada", where Yakutsk is located, consists of not one, but two low floodplain terraces. To solve this problem, the data of the vertical electrical sounding method were used. With a small but statistically significant difference in the sample estimates of the average resistances, they naturally grow when moving from the first Yakut terrace to the higher second Sergelyakh terrace within the entire Tuymaada valley. Based on the data of engineering and geological surveys, the difference in the average estimates of the resistances of above-floodplain terraces is explained by the variability of the structure of frozen sands. In this variability the dominant factor is the factor of material composition, which generates a significant variability in the physical and mechanical properties of the sands along with the insignificant effect of factors and thermal, cryogenic state. According to the survey data, during the transition from the Yakut to the Sergelyakh terrace, fine-grained sands are replaced by older medium-grained sands with a natural decrease in the average indicators of total humidity, porosity and density growth of the mineral skeleton. Statistical analysis of the data of the electric sensing method confirms both the hypothesis put forward and the ideas of the predecessors of geomorphologists. Exactly, the Tuimaada valley consists not of one, but of two low terraces of different heights above the floodplain. The reliability of probabilistic and statistical solutions on which the conclusion is based is quite high and does not fall below 70 %.

Keywords: Tuymaada Valley; geomorphology; Yakutskaya and Sergellakhskaya terrace; alluvial sands; vertical electrical sounding method; electrical resistivity; probability distributions; histograms; average values