

Мерзлотоведение, инженерная геология

УДК 550.85

Статистические исследования засоленности и удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов сезонноталого слоя линейных сооружений в Центральной Якутии

Л.Г. Нерадовский

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия
leoner@mpi.ysn.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований архивных материалов метода вертикального электрического зондирования на постоянном токе по магистральным газопроводам Центральной Якутии. Получены ранее неизвестные нормативные значения засоленности и удельного электросопротивления дисперсных грунтов сезонноталого слоя. Показано, что существующая между этими характеристиками корреляционная связь существенно усиливается и делается устойчивой в метрике средних медианных значений. Благодаря этому появляется возможность строить с разным уровнем обобщения прямые и обратные петрофизические модели, как для чисто научного изучения закономерных отношений исследуемых характеристик, так и для практического вычисления средних значений засоленности по значениям удельного электросопротивления. Абсолютная точность вычислений засоленности в 70 % случаев не превышает 0,1 % при вводе в уравнения степенных функций средних значений удельных электросопротивлений, полученных по 11 точкам зондирования. Вопрос выбора оптимального числа точек зондирования остаётся открытым и в каждом конкретном случае требует специального изучения. Представляется правильным решать эту задачу на ключевых участках местности. Достигнутая точность вычисления засоленности по уравнениям регрессии достаточна для быстрого, экономичного и экологически чистого решения задач мерзлотной съёмки и инженерно-геологического районирования осваиваемой территории Центрально-Якутской низменности по категории степени засоленности грунтов сезонноталого слоя. Решение таких задач с опережением бурения скважин на начальных стадиях изыскательских работ всегда актуально для строительства, а также для сельского хозяйства в части контроля и прогноза динамики засоленности грунтов плодородного слоя.

Ключевые слова: сезонноталый слой, почвогрунты, засоленность, удельное электрическое сопротивление, микроВЭЗ, погрешность.

A statistical study of salinity and electrical resistivity of the active-layer soils along linear projects in Central Yakutia

L.G. Neradovskii

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya St., 36, Yakutsk 677010, Russia
leoner@mpi.ysn.ru

Abstract. This study examined historical data sets from DC vertical electrical soundings performed for trunk gas pipeline projects in Central Yakutia and obtained characteristic values for salinity and resistivity of the active-layer soils. The results suggest that the correlation between these two parameters increases significantly and becomes stable in the metric of average median values. This makes it possible to derive, with different levels of generalization, direct and reverse petrophysical models both for theoretical

understanding of the relationship between the two parameters and for practical calculation of average salinities from resistivity values. The absolute accuracy of salinity calculations is less than 0.1 % in 70 % of the cases, when resistivities averaged over 11 sounding points are introduced into the power function equations. The question of an optimal number of data points is left open and requires a special study for each case. It seems right to solve this problem at key sites of the terrain. The accuracy of salinity prediction with the regression equations is sufficient for rapid, cost-effective and environmentally safe solution to the problems of regional characterization and classification of permafrost terrain by active-layer salinity in the Central Yakutian lowland. Solving such problems before reconnaissance drilling is always important for engineering site investigations, as well as for soil salinity control and prediction in the agriculture.

Key words: active layer, soil, salinity, electrical resistivity, microVES, error.

Введение

Настоящий период интенсивного развития экономики России, связанный, главным образом, с освоением природных богатств Северо-Востока и Арктики, диктует академическому сообществу поиск и разработку простых в технике измерений, и обязательно недорогих информативных технологий, прежде всего, для целей изучения мёрзлых грунтов, составляющих основания инженерных сооружений. При этом интерес учёных и инженеров сосредоточен не только на процессе взаимодействия инженерных сооружений с мёрзлыми грунтами в пределах слоя годовых теплооборотов, но и на деятельном слое. В сливающейся толще мерзлоты, положение нижней границы этого слоя контролируется изменчивостью глубины залегания нижней границы сезонноталого слоя (СТС). Несмотря на небольшую мощность этого слоя, редко достигающую 4-5 м⁵, на нём пересекаются и объединяются интересы многих ведомств и министерств. Представителей стройиндустрии, энергетики, транспорта и коммунального хозяйства беспокоят вопросы обеспечения в условиях коррозионной активности засоленных почвогрунтов СТС надёжной эксплуатации инженерных коммуникаций неглубокого залегания (кабелей электропитания, связи, Интернета, трубопроводов), а также трасс автодорог и взлётно-посадочных полос. У работников сельского хозяйства иная забота – изначально правильно выбрать участки местности с благоприятными природными условиями высокой урожайности зерновых и других культур и в последующем времени по возможности не допустить снижения урожайности по причине аномально-го засоления почвогрунтов.

Решение обозначенных проблем вряд ли возможно без последовательного и своевременного выполнения в оптимальном сочетании геологических, агрохимических, геофизических и иных видов научно-производственных работ. Сначала

диагностики засоленности почвогрунтов СТС на стадиях инженерно-геологических изысканий, затем, контроля динамики засоленности на стадиях мониторинга, и наконец, прогноза развития процесса засоленности в зависимости от климатических и антропогенно-техногенных факторов. В такой технологии особая роль принадлежит наземным методам геоэлектрики, в силу того, что они потенциально способны решать задачи районирования застраиваемых территорий по категории засоленности при сравнительно небольших затратах времени, труда и материально-финансовых средств. Физическая предпосылка такой ценной способности – высокая чувствительность электропроводности к изменению засоленности почвогрунтов, в особенности, когда они находятся в той или иной мере в увлажнённом состоянии.

Цель настоящей работы ознакомить читателей с результатами статистических исследований общих и частных вероятностных распределений на территории Центрально-Якутской низменности значений удельного электрического сопротивления (УЭС) и показателя засоленности (D_{sal}) почвогрунтов СТС, а также корреляционной связи этих характеристик и построения в разной мере обобщённых моделей этой связи, попутно выясняя методический вопрос меры снижения погрешности вычисления D_{sal} в зависимости от интервала усреднения единичных значений УЭС, полученных методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) на постоянном токе в варианте микрозондирования (микроВЭЗ).

Материал и методика исследований

Исследования были выполнены по архивным материалам Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЯкутГИСИЗ), полученных в 1982-1983 гг. при коррозионном обследовании газопроводов, в котором автор настоящей статьи принимал личное участие. Фактический материал (значения УЭС и D_{sal}) собран по магистральному газопроводу “Мастах-Бэргэ” – “Таас-Тумус-Якутск” длиной 466 км и газопроводам-отводам “Якутск-Покровск”

⁵ При мощности СТС более 5 м, он классифицируется в мерзлотоведении, как надмерзлотный талик.

и “Якутск-Табага” длиной 200 и 70 км. Искомая зависимость УЭС от D_{sal} изучена на макро и мезо ключевых участках Центрально-Якутской низменности. Число и границы ключевых участков были заданы геологами ЯкутГИСИЗ по предварительно составленной карте инженерно-геологического районирования условий строительства и эксплуатации газопроводов в поlose, пересекаемой ими местности.

Естественное литогенное основание газопроводов сложено в СТС дисперсными грунтами песчано-глинистого состава (песками разной зернистости, супесями, суглинками). Мощность СТС на время обследования газопроводов (в августе-сентябре) изменялась от 0,5 до 3,0 м при среднем модальном (наиболее часто встречаемом) значении 1,4 м. Минимальная мощность наблюдалась на водоразделах с густым листовым лесом и в понижениях рельефа с моховым покровом (марях), а максимальная – на сосновых взгорках с хорошо прогреваемой песчаной поверхностью. Влажность в сухих песках составляла (3÷5) %, а во влажных песчано-глинистых грунтах увеличивалась до (30÷70) %.

В местах отбора проб грунтов на лабораторный анализ состава и количества легкорастворимых солей мощность СТС устанавливалась в шурфах, пройденных до кровли мерзлоты. В иных местах – протыканием до этой криогенной границы талых грунтов металлическим шупом длиной 3,5 м.

Метод ВЭЗ

Значения УЭС грунтов СТС определялись методом ВЭЗ с кустарной, но высокопроизводительной 2-х полюсной установкой микроВЭЗ. Установка располагалась вблизи трубы газопровода, уложенной в грунт или находящейся на поверхности Земли в обваловке из насыпного грунта. Конструкция установки заимствована у геофизиков Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова АН СССР. В отличие от установки, которую применял в прошлом веке В.К. Хмелевской в Саратовском Поволжье для решения задач мелиорации⁶, эта установка была компактной, удобной и представляла деревянный пенал длиной 1,4 м с вмонтированными в него проводами и латунными электродами питающей и приёмной линий. Расстояние (разнос) между первым приёмным электродом и рядом питающих электродов в пенале было равным: 0,15-0,2-0,3-0,5-0,7-0,9-1,2 м. За пределами пенала разнос увеличивался в следующей последовательности: 1,6-3-5-9 м. Вторые приёмный и

питающий электроды относились от установки в перпендикулярном направлении на расстояние 50-100 м.

Значения силы тока в питающей линии и напряжения в приёмной линии измерялись прибором “АЭ-72”. Значения кажущихся электрических сопротивлений (КС) вычислялись по известным формулам, применяемым для метода ВЭЗ. Графики зависимости КС от разнеса установки “микроВЭЗ” строились в билогарифмическом масштабе с модулем 6,2 см. Значения УЭС определялись по методике А.М. Пылаева [5] с использованием 2-х слойных палеток при известных значениях мощности СТС, полученных по данным опробования металлическим шупом или проходки шурфов.

Стоит сказать, что классический метод ВЭЗ в варианте микроВЭЗ, широко применявшийся в прошлом в инженерно-строительных изысканиях, мелиорации, мерзлотоведении, в настоящее время незаслуженно забыт и нигде не применяется. Однако, по простоте и низкой стоимости полевых измерений, а также незамысловатой их математической обработки с точным определением УЭС слоя почвогрунтов, метод микроВЭЗ превосходит все методы геоэлектрики, в частности, широко рекламируемый в отечественных публикациях со ссылкой на зарубежные источники [6], метод электромагнитной индукции.

Этот метод реализуется в разных аппаратных разработках, среди которых наиболее известны кондуктометры “ЕМ-38” и “DUALEM-421S”, изготавливаемые кампанией Geonics (Онтарио, Канада). С их помощью измеряется мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости и по ней вычисляются значения кажущихся или удельных электрических сопротивлений, по которым устанавливают границы засоления почвогрунтов и контролируют их изменчивость по площади, глубине и во времени. Прибор “ЕМ-38” специально разработан для нужд сельского хозяйства с целью изучения корневой зоны до глубины 0,75-1,50 м. Прибор “DUALEM-421S” работает глубже и способен на шести частотах килогерцового диапазона изучать почвогрунты до глубины 0,5-6,0 м [8].

В отечественном приборостроении заслуживает внимания электромагнитный сканер малоглубинного индуктивного зондирования “Немфис”, разработанный в Институте геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Новосибирск) и обладающий рядом технико-эксплуатационных характеристик, превосходящих характеристики лучших образцов аналогичной зарубежной техники [1]. К сожалению, сканер не предоставляет результат зондирования в виде УЭС почвогрунтов. Впрочем, этим

⁶ Из письменного сообщения д.ф.-м.н., профессора МГУ В.А. Шевнина.

недостатком страдают и зарубежные образцы техники.

В любом случае, точное определение значений D_{sal} по УЭС в принципе невозможно, так как эта базовая электрофизическая характеристика по природе интегральна, неся в себе итоговый результат влияния всего того, из чего состоит геологическая среды и в чём находит своё выражение, а именно, в строении, составе, состоянии и свойствах. Что касается почвогрунтов СТС, то их УЭС помимо засоленности в разной степени зависит от влажности, плотности и других свойств. Более того, в условиях криолитозоны они крайне неоднородны⁷ и изменчивы не только по латерали, но и во времени, повторяя суточно-недельную, месячно-сезонную и межгодовую динамику приземного давления, температуры воздуха и осадков на поверхности Земли.

В случаях сопряжённого лабораторного определения влажности и засоленности почвогрунтов удаётся учесть вклады этих факторов на результат определения УЭС. Такой подход положен в основу методического руководства работ по солевой съёмке в США [9].

Ещё одно ограничение методов геоэлектрики на постоянном или переменном токе в достижении точной оценки D_{sal} – потеря чувствительности УЭС к изменению засоленности сухих или близких к таковым почвогрунтам. Обычно низкая влажность почвогрунтов наблюдается в богарных условиях земледелия. В природных условиях, примером этому, могут служить тукуланы, широко развитые в аридной зоне ландшафта аласной провинции Лено-Вилуйского междуречья Центрально-Якутской низменности.

Лабораторные работы

Отбор проб грунтов на лабораторное определение D_{sal} производился в СТС до глубины укладки в грунт труб газопроводов (1,5-2,0 м). Анализ состава и количества легкорастворимых солей производился способом водной вытяжки по ГОСТ 26424-85, ГОСТ 26426-85, ГОСТ 26427-85, ГОСТ 26428-85.

Число парных определений значений УЭС и D_{sal} для разных типов грунтов приведено в табл. 1. Из неё следует, что пески чаще встречаются

⁷ Случаи, когда пахотные земли или СТС криолитозоны сложены одинаковой почвой или грунтами (по составу и влажностному режиму) редки. Они наблюдаются преимущественно на микроключевых участках или в усреднённом представлении на мезо и макроключевых участках местности.

Т а б л и ц а 1
Изученность трасс газопроводов по типам грунтов

Трассы газопроводов	Число определений УЭС и D_{sal}		
	пески	супеси	суглинки
Мастах-Бэргэ – Таас-Тумус-Якутск	46	23	11
Якутск-Табага	6	3	8
Якутск-Покровск	11	29	35
Все трассы	63	55	54

по трассе газопровода “Мастах-Бэргэ” – “Таас-Тумус-Якутск” (вероятность 52 %), а глинистые (супеси и суглинки) – по остальным трассам газопроводов (вероятность 47 %). В общей совокупности из 172 значений УЭС и D_{sal} , литотипы грунтов СТС изучены почти в равной мере, т.е. собранный фактический материал репрезентативен по грунтовому фактору и, тем самым, удовлетворяет условию проведения корректного статанализа. Кроме этого, фактический материал репрезентативен и по общей широте изменчивости D_{sal} и УЭС в диапазоне (0,01÷0,80) г/см³ и (3÷3000) Ом·м.

Обсуждение результатов

Обсуждение результатов статистических исследований архивных материалов ЯкутГИСИЗ проведены по двум направлениям: 1) вероятностное распределение в СТС исследуемых геолого-геофизических характеристик; 2) корреляционно-регрессионная связь характеристик.

Первое направление

Описательная статистика общего вероятностного распределения по всем трассам газопроводов 172 значений геологической характеристики D_{sal} и геофизической характеристики УЭС представлена в табл. 2. Из неё следует, что обе

Т а б л и ц а 2
Общая описательная статистика фактического материала

Статистика по всем трассам	D_{sal} , %	УЭС, Ом·м
Среднее арифметическое (AP)	0,09	160
Стандартная ошибка AP	0,01	24
Медианное среднее (ME)	0,03	92
Модальное среднее (MO)	0,02	140
Стандартное отклонение	0,15	318
Минимум	0,01	3
Максимум	0,8	3000
Коэффициент вариации, %	163	199
Количество определений	172	172
Уровень доверия AP 95 %	0,02	47,8

Примечание: AP и ME – среднее арифметическое и медианное значение.

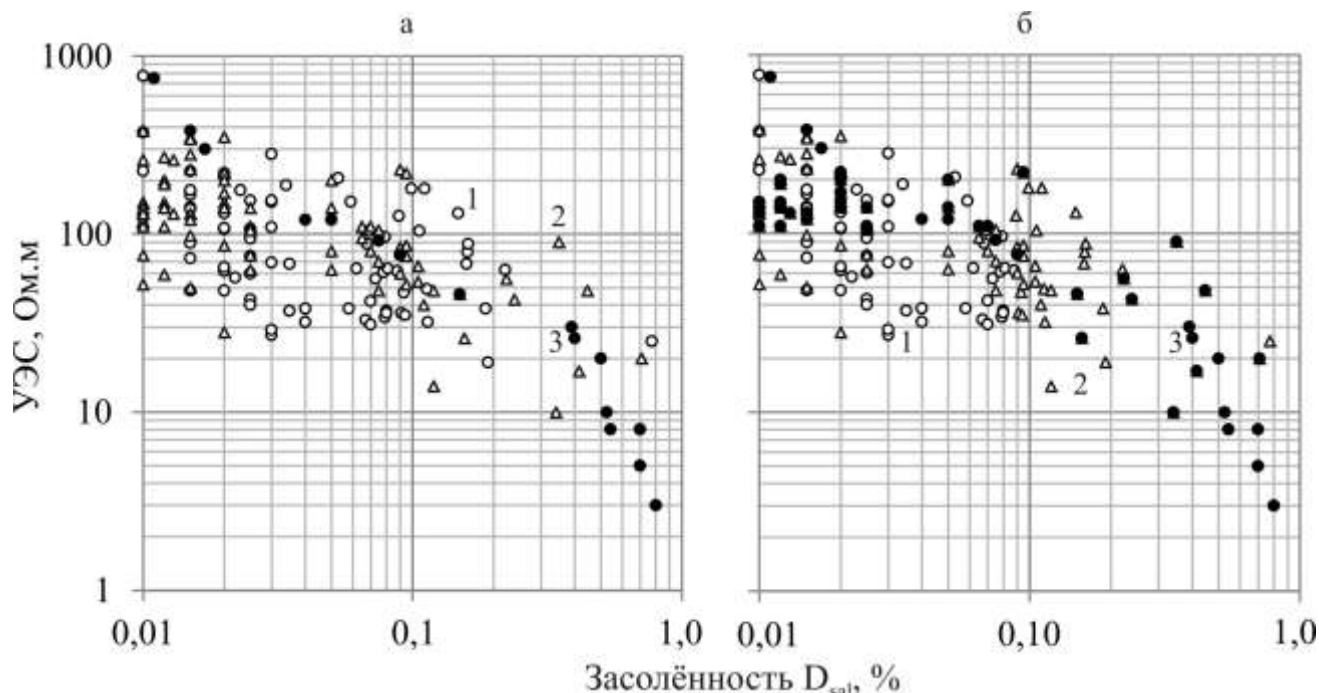


Рис. 1. Эмпирические зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) от показателя засоленности D_{sal} почвогрунтов СТС в полосе трасс газопроводов (а) и по литотипам почвогрунтов СТС Центрально-Якутской низменности (б). Трассы газопроводов: 1 – Таас-Тумус-Якутск; 2 – Якутск-Покровск; 3 – Якутск-Табага. Литотипы грунтов: 1 – песок; 2 – суглинок; 3 – супесь.

характеристики отличаются высокой динамикой вдоль трасс газопроводов (коэффициент вариации 163 и 199 %). Причём, наибольший вклад в картину динамики, усиливая её закономерную составляющую, вносит группа значений D_{sal} и УЭС газопровода “Якутск-Табага” (рис. 1, а).

Проверка по трём статистическим критериям (Колмогорова, омега-квадрат, хи-квадрат) с использованием диагностических решений программы “STADIA” [4] удостоверяет в том, что фактическое распределение значений УЭС соответствует теоретическому закону не нормального, а логнормального вероятностного распределения. Что касается распределения значений D_{sal} , то оно не подчиняется ни одному теоретическому закону непрерывных вероятностных распределений. Поэтому для обобщения фактического материала в виде нормативных значений D_{sal} и УЭС уже нельзя применять средние арифметические значения, принятые в грунтоведении за стандартные оценки. В таких случаях рекомендуется идти по самому простому и не менее надёжному пути использования результатов гистограммного анализа с дополнением к ним средних значений по медиане⁸.

В 72 и 92 % случаев разброс единичных значений D_{sal} и УЭС в полосе трасс газопроводов не превысил 0,085 % и 303 Ом·м при средних медианных значениях 0,03 % и 92 Ом·м.

Эти обобщённые оценки не с чем сравнить, так как подобные результаты исследований не найдены в опубликованных работах по Центральной Якутии. Поэтому их можно рассматривать в первом приближении, как фоновые показатели природной засоленности континентального типа и электропроводности почвогрунтов СТС для всей территории Центрально-Якутской низменности. Тем более что они получены в изначально интегрированном виде по классической академической методике ключевых участков [3]. Этих участков и сделанных на них определений D_{sal} и УЭС не так много, но они в равной степени покрыли и независимо изучили низменность в разных направлениях и на большие расстояния порядка десятков и сотен километров. В таком обосновании, если не вся, то большая часть низменности сложена слабозасолёнными грунтами с УЭС=92 Ом·м. Причём, эти значения выше значений УЭС⁹, принятых по USDA Agriculture Handbook

⁸ Эта непараметрическая статистика обладает уникальным свойством устойчивости в указании среднего положения вариационного ряда в условиях аномальных искажений со стороны минимальных и

максимальных значений особенно сильных в небольших по числу определений выборках фактических данных.

⁹ Более 25÷50 Ом·м.

Частная описательная статистика фактического материала по литотипам грунтов

Статистика по грунтам	Пески		Супеси		Суглинки	
	D _{sal}	УЭС	D _{sal}	УЭС	D _{sal}	УЭС
Среднее арифметическое (AP)	0,03	222	0,16	122	0,09	126
Медианное среднее (ME)	0,03	94	0,04	120	0,09	76
Модальное среднее (МО)	0,02	109	0,01	140	0,02	63
Стандартное отклонение	0,02	494	0,22	115	0,11	138
Минимум	0,01	27	0,01	3	0,01	14
Максимум	0,09	3000	0,80	750	0,77	840
Коэффициент вариации, %	69	222	137	94	125	109
Количество определений	63	63	55	55	54	54
Уровень доверия AP 95 %	0,006	124	0,06	31	0,03	38

Примечание: AP и ME – среднее арифметическое и медианное значение; D_{sal} – показатель засоленности грунтов в %; УЭС – удельное электрическое сопротивление в омметрах.

(США) для картирования границ незасолённых¹⁰ почвогрунтов [10].

Достоверность выше сделанного обоснования усиливается в контрасте сравнения средних медианных значений УЭС почвогрунтов СТС равных 92 Ом·м на обследованной части территории Центрально-Якутской низменности и 15 Ом·м на территории г. Якутска [7, с. 4]. Если взять нелинейную пропорцию с учётом разницы коэффициентов вариации D_{sal} и УЭС, то получается, что в г. Якутске средний уровень засоленности равен 0,5 %, т.е. почти в шесть раз выше предполагаемого природного фона засоления низменности.

Поле частного распределения значений D_{sal} и УЭС по группам литотипов почвогрунтов показано на рис. 1, б. Оно, как и общее распределение по трассам газопроводов, имеет нелинейный характер с разным темпом спада УЭС при росте D_{sal} (см. рис. 1, а). Описательная статистика этих характеристик приведена в табл. 3. Судя по близости средних арифметических, медианных и модальных статистик частные значения D_{sal} у песков распределены по теоретическому закону нормального вероятностного распределения, тогда как распределение УЭС этому закону не подчиняется. У супесей и суглинков в ещё большей степени проявляются черты не равномерностного распределения частных значений в окрестности среднего показателя.

Таким образом, и по группам частных выборок ничего не остаётся, как ориентироваться в

локальной оценке обобщения фактического материала на частоту появления частных значений D_{sal} и УЭС в окрестности средних медианных значений.

Посмотрим, что из этого получается.

В направлении снижения гранулометрического состава, т.е. при переходе от песков к супесям и далее, к суглинкам, медианные средние значения D_{sal} монотонно растут в следующей последовательности: 0,03; 0,04 и 0,09 %.

И эти значения, по выше сделанному обоснованию, следует рассматривать, как локальный фон природной засоленности главных литотипов дисперсных грунтов всей Центрально-Якутской низменности.

Динамика отклика УЭС на этот рост осложняется у супесей локальным максимумом в 120 Ом·м. Причина его образования неизвестна и, возможно, кроется в особенностях распределения влажности и плотности супесей. Значения этих показателей физических свойств почвогрунтов были определены, но проанализировать их невозможно, так как по разным причинам они были утеряны в архивных материалах.

Проверка по критериям Стьюдента и Фишера показала, что из всевозможных сочетаний литотипов грунтов только пески и супеси СТС неотличимы друг от друга по средним значениям D_{sal}, хотя по её дисперсии имеют значимую разницу. По УЭС же пески и супеси различимы, как по среднему значению, так и по дисперсии.

По лабораторным данным доля незасолённых песков, супесей и суглинков СТС на территории Центрально-Якутской низменности явно преобладает и составляет 79,8 % (табл. 4). Сильнозасолённых грунтов на этой территории нет, а суммарная доля слабозасолённых и средnezасолённых грунтов равна 20,2 %.

¹⁰ В понимании, что при таком УЭС солей они не токсичны по отношению к ряду плодовых, овощных и декоративных и иных продуктов земледелия [10].

Таблица 4

Линейная доля грунтов СТС по категории засоления в полосе трасс газопроводов Центрально-Якутской низменности

Название грунта	Категории засоления, %			
	Незасолены	Слабозасолены	Среднезасолены	Сильнозасолены
Пески	26,6	9,4	нет	нет
Супеси	23,3	4,4	3,5	нет
Суглинки	30,0	1,2	1,7	нет

Второе направление

Как уже, отмечалось выше, в поле рассеяния фактического материала петрофизических исследований (рис. 1) отчётливо прослеживается корреляционный след снижения УЭС при росте D_{sal} . Эта закономерность наблюдается по всем газопроводам и литотипам грунтов, т.е. носит общий характер, а значит, её можно выгодно использовать для решения задач средне-мелкомасштабного инженерно-геологического районирования территории Центрально-Якутской низменности по категории засоленности дисперсных грунтов СТС.

Из класса нелинейных математических функций эмпирическая зависимость УЭС от D_{sal} адекватно описывается гиперболической и степенной функцией. Однако в частных значениях закономерный компонент зависимости проявляет себя слабо¹¹ из-за совокупного влияния таких грунтовых факторов, как влажность, плотность и других (рис. 2, а). Их влияние нетрудно ослабить при переходе в более устойчивое метрическое пространство обобщённых средних значений. Делается эта математическая операция поразному, но всегда на основе группирования

исходных данных, предварительно отсортированных в порядке возрастания значений D_{sal} всей выборочной совокупности или отдельных литотипов почвогрунтов. Классическое дискретное статистическое группирование осуществляется по признаку различия групп по темпу роста значений D_{sal} или по признаку равных и близких в группах значений D_{sal} .

Первый признак более мощный в подавлении мешающих факторов. Его использование делит всю выборочную совокупность фактического материала на четыре группы: 1) 0,01-0,03; 2) 0,03-0,07; 3) 0,07-0,12; 4) более 0,12 % (рис. 2, б). Вычисленные в группах средние медианные значения D_{sal} и УЭС есть координаты реперных точек обобщённой модели их вероятностной связи на изученной территории Центрально-Якутской низменности. На графике модели (рис. 2, в) кружками показаны номера реперных точек. Точность теоретической аппроксимации эмпирической зависимости УЭС от D_{sal} степенной функцией близка к функциональной и по множественному коэффициенту детерминации R^2 равна 0,9895. При таком уровне детерминации вклад влияния на УЭС фактора засоленности достигает 99 %, оставляя на долю влияния остальных грунтовых факторов 1 %. Однако за это приходится платить существенным сужением диапазона исследуемых геолого-геофизических характеристик СТС. Посмотрим, насколько это ограничивает рамки использования фактического материала и снижает точность вычисления D_{sal} по УЭС.

Воспользуемся для этого уравнением степенной функции:

$$D_{sal} = 235,5 \cdot УЭС^{-1,928} \quad (1)$$

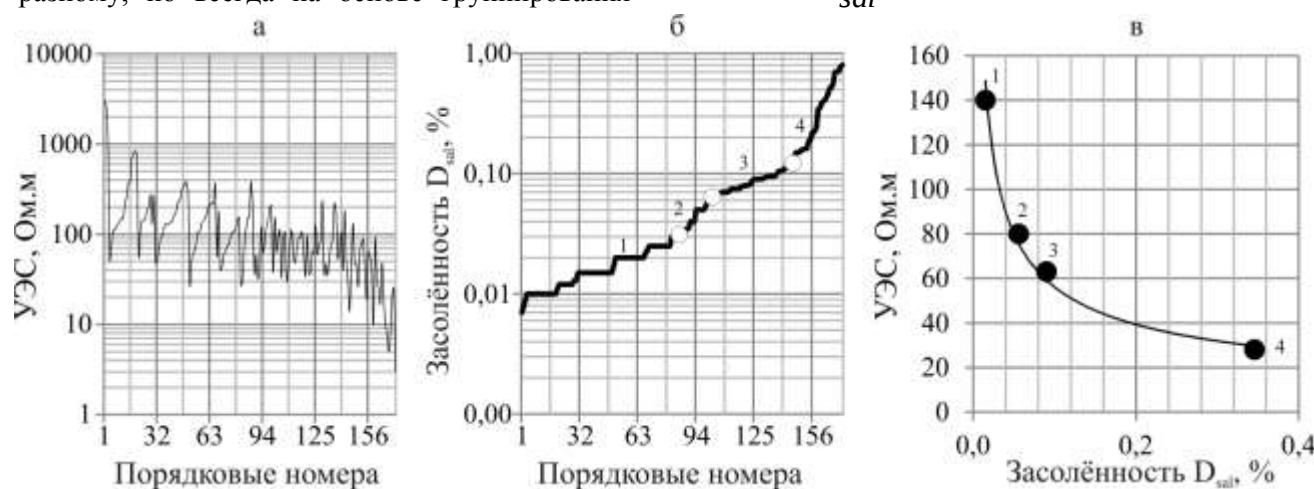


Рис. 2. Отсортированные ряды исходных данных в порядке роста значений УЭС (а), D_{sal} (б) с их переводом в освобождённое от влияния грунтовых факторов метрическое пространство средних значений обобщённой модели (в) зависимости электропроводности от засоленности почвогрунтов СТС Центрально-Якутской равнины:

1, 2, 3 – номера реперных участков и точек модели с одинаковым темпом изменения отсортированных значений D_{sal} .

Проверка уравнения (1) на фактическом материале показала его полную непригодность для вычисления значений засолённости по единичным значениям УЭС. По отношению к лабораторным данным абсолютная ошибка вычисления D_{sal} в 70 %¹² случаев составила 2,27 %, т.е. очень велика и недопустима для решения научно-практических задач. Выходит, обобщение по признаку темпа роста оказалось слишком обширным, нивелирующим ценные локальные особенности закономерной изменчивости D_{sal} и УЭС.

Проверим погрешность работы другого уравнения, полученного по 11 группам с близкими или равными значениями D_{sal} с несколько меньшим, но всё же, высоким значением $R^2=0,9396$:

$$D_{sal} = 56,52 \cdot УЭС^{-1,590} \quad (2)$$

Проверка уравнения (2), опять же, по единичным значениям УЭС, показала, что погрешность вычисления в 70 % случаев снизилась до 0,77 %, т.е. в три раза, но всё ещё остаётся очень высокой.

Попробуем использовать для расчёта D_{sal} значения УЭС, усреднённые не в дискретных группах, как это было сделано выше, а в непрерывно смещающихся группах в ряду значений, соответствующих ряду значений D_{sal} , отсортированных в порядке роста. Сделаем это с помощью программы "STADIA" [4] в автоматическом режиме экспоненциального осреднения с показателем подавления локальных аномалий УЭС равным минус 0,015. Для этого варианта вычислений использовано уравнение с $R^2=0,9637$:

$$D_{sal} = 0,013096 + 2,058 \cdot \exp(-0,038561 \cdot УЭС) \quad (3)$$

На этот раз результат усреднения в скользящем ряду исходных данных дал ожидаемый результат. В сравнении с ошибками уравнения (1) применение уравнения (3) при уровне доверительной вероятности 70 % снизило в 81 раз абсолютную погрешность вычисления D_{sal} , т.е. сделало её равной $\pm 0,028$ % и приблизило до возможности практического использования уравнения (3).

Этот уровень точности, при равновероятном завышении-занижении единичных ошибок по отношению к лабораторным значениям D_{sal} , позволяет в летне-осенний период года надёжно картировать методом ВЭЗ, опережая буровые и

лабораторные работы, границы распространения на территории Центрально-Якутской низменности почвогрунтов СТС по категориям засолённости [2, с. 28].

Как видим, обычное сглаживание, применяемое в геофизике, оказывается эффективным. Однако вопрос оптимального выбора количества точек ВЭЗ для правильного усреднения значений УЭС и построения обобщённых статистических моделей, по которым с приемлемой погрешностью можно делать расчёт средних значений D_{sal} , остаётся открытым и требует дальнейшего изучения. Одно ясно, что при проведении мерзлотной съёмки и инженерно-геологического районирования территорий по условиям строительства и эксплуатации инженерных сооружений работы методом микроВЭЗ, как и положено, нужно выполнять на ключевых участках местности. В пределах их границ и нужно проводить усреднение УЭС. И чем больше будет планомерно покрыта площадь ключевых участков точками микроВЭЗ, тем точнее будет результат оценки средних значений D_{sal} почвогрунтов СТС по уравнению (3).

Заключение

Статистические исследования архивных материалов треста ЯкутГИСИЗ позволили изучить вероятностные распределения и найти по ним ранее неизвестные средние значения УЭС и D_{sal} , рассматриваемые, как природный фон электропроводности и континентального типа засолённости почвогрунтов СТС всей территории Центрально-Якутской низменности. Эмпирическая причинно-следственная связь между этими базовыми геолого-геофизическими характеристиками адекватно аппроксимируется степенной функцией. Максимальная степень аппроксимации и точность вычисления D_{sal} по УЭС достигаются при группировании фактического материала работ методом ВЭЗ и методом солевой вытяжки. По отношению к лабораторным данным абсолютная погрешность средней оценки D_{sal} при скользящем экспоненциальном сглаживании значений УЭС в 70 % случаев не превышает $\pm 0,03$ %. Такой высокий уровень точности приемлем для надёжного решения средне-мелкомасштабных задач мерзлотной съёмки и инженерно-геологического районирования осваиваемой территории Центрально-Якутской низменности по категории засолённости почвогрунтов СТС. Эффективность решения таких задач достигает своей максимальной при опережении методом ВЭЗ буровых и лабораторных работ на начальных стадиях проектно-изыскательских работ.

¹² Этот достаточно высокий уровень доверия давно принят в геологоразведке для оценки достоверности результатов решения всегда неоднозначных некорректных задач геофизики.

Литература

1. Балков Е.В. Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям / Д.И. Фадеев, Ю.Г. Карин, А.К. Манштейн, Ю.А. Манштейн, Г.Л. Панин // Геология и геофизика. 2017. т. 58. № 5. С. 783—791.
2. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. М.: Госстандарт СССР (Изд-во стандартов). 1995. 31 с.
3. Кудрявцев В.А. Методика мерзлотной съемки / В.А. Кудрявцев, Л.С. Гарагуля, К.А. Кондратьева, Н.Н. Романовский, А.Н. Максимова, А.Б. Чижев. М.: Изд-во МГУ. 1979. 358 с.
4. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М., ФОРУМ: ИНФРА-М. 2006. 512 с.
5. Пылаев А.М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. М.: Изд-во Недра. 1968. 147 с.
6. Руководство по управлению засоленными почвами / Под ред. Воргаса Р., Панковой Е.И., Балука С.А., Красильникова П.В., Хасанхановой Г.М. Рим: Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций. 2017. 138 с.
7. Якупов В.С. Управление сезонными вариациями сопротивления заземления / В.Н. Грачёв, Ю.Г. Шасткевич. Якутск: Книжное изд-во. 1983. 68 с.
8. Huang J., Koganti T., Monteiro Santos F.A., Triantafilis J. Mapping soil salinity and a fresh-water intrusion in three-dimensions using a quasi-3d joint-inversion of DUALEM-421S and EM34 data. Article in Science of The Total Environment. November 2016. Vol. 577. pp. 395-404. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.224.
9. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 57. FAO. Rome. 1999. 150 p.
10. Richard J. Foote, Karl A. Fox. Analytical tools for measuring demand. United states department of agriculture agricultural marketing service. Agriculture Handbook No. 64. Washington, D. C. January 1954. 86 p.

Reference

1. Balkov E.V. Novyj podhod k maloglubinnym elektromagnitnym zondirovaniyam / D.I. Fadeev, Y.G. Karin, A.K. Manshtejn, YU.A. Manshtejn, G.L. Panin // Geologiya i geofizika, 2017, vol. 58, № 5, pp. 783-791.
2. ГОСТ 25100-95. Grunty. Klassifikaciya. Moscow: Gosstandart SSSR (Izd-vo standartov) 1995, p. 31.
3. Kudryavcev V.A. Metodika merzlotnoj sjemki / V.A. Kudryavcev, L.S. Garagulya, K.A. Kondrat'eva, N.N. Romanovskij, A.N. Maksimova, A.B. Chizhov. Moscow: Izd. MGU, 1979, p. 358.
4. Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannyh. Moscow, FORUM: INFRA-M, 2006, p. 512.
5. Pylaev A.M. Rukovodstvo po interpretacii vertikal'nyh elektricheskikh zondirovanij. Moscow: Izd. Nedra, 1968, p. 147.
6. Rukovodstvo po upravleniyu zasolyonnymi pochvami / Pod red. Vargasa R., Pankovoj E.I., Balyuka S.A., Krasil'nikova P.V., Hasanhanovoj G.M. Rim: Prodovol'stvennaya i sel'skohozyajstvennaya organizaciya objedinennyh nacij. 2017, p. 138.
7. Yakupov V.S. Upravlenie sezonnymi variaciyami soprotivleniya zazemleniya / V.N. Grachyov, Y.G. Shastkevich. Yakutsk: Knizhnoe izd., 1983, p. 68.
8. Huang J., Koganti T., Monteiro Santos F.A., Triantafilis J. Mapping soil salinity and a fresh-water intrusion in three-dimensions using a quasi-3d joint-inversion of DUALEM-421S and EM34 data. Article in Science of the Total Environment. November 2016, vol. 577, pp. 395-404. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.224.
9. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper № 57. FAO. Rome, 1999, p. 150.
10. Richard J. Foote, Karl A. Fox. Analytical tools for measuring demand. United states department of agriculture agricultural marketing service. Agriculture Handbook No. 64. Washington, D. C. January 1954, p. 86.

Поступила в редакцию 29.03.2018