

УДК 550.8.05

А.В. Кошурников¹, П.И. Котов², И.А. Агапкин³

ВЛИЯНИЕ ЗАСОЛЕННОСТИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, 119334, Москва, ул. Косыгина, д. 19

Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS 119334, Moscow, Kosygin st., 19

Приводятся результаты определения акустических и электрических свойств мерзлых засоленных грунтов (песка и суглинка) с массивной криогенной текстурой при разных значениях влажности (по три значения для каждого грунта), засоленности (7 значений для суглинка и 5 для песка) и температуры (–2, –4, –6 °С). Получены данные о высокой корреляции между удельным электрическим сопротивлением и концентрацией порового раствора, а также отношения концентрации солей в поровом растворе и температуры со скоростью продольных волн. Значения удельного электрического сопротивления могут уменьшаться в 2–22 раза при переходе от слабозасоленного состояния к сильнозасоленному, а для скорости продольных волн это отличие не превышает 2 раза. Поэтому именно электрические свойства наиболее подходят для ранжирования грунтов по степени засоленности.

Ключевые слова: мерзлые засоленные грунты, электрические свойства, акустические свойства, концентрация порового раствора, прогноз свойств.

The results of determining acoustic and electrical properties of frozen saline soils (sand and silt) of massive cryogenic texture at different water content (3 values for each type of soil), salinity (7 values for silt and 5 for sand) and temperatures (–2, –4, –6 °C) are given in the article. As a result, data on the high correlation between specific electrical resistivity and concentration of the pore solution and between ratio of a concentration of the pore solution to temperature and the velocity of longitudinal waves were obtained. Electrical resistivity can decrease by 2–22 times during the transition from a low-saline to a highly saline state and for longitudinal wave velocities only two times. Therefore, it is the electrical properties that are most suitable for the ranking of soils by the degree of salinity.

Key words: frozen saline soils, electrical properties, acoustic properties, concentration of pore solution, prediction of properties.

Введение. Мерзлые засоленные грунты широко распространены на арктическом побережье России, Канады, Гренландии [Брушков, 1998; Ingeman-Nielsen, 2008; Nivon, 1993]. Эти грунты имеют различное происхождение с преобладанием, однако, морских и прибрежно-морских условий образования, поэтому они характеризуются устойчивым по площади и в разрезе однотипным хлоридно-натриевым составом, обусловленным соленостью морских вод.

Наиболее сложны для анализа и изучения дисперсные грунты (песчаные и глинистые), которые часто служат грунтами оснований инженерных сооружений. Эти мерзлые грунты представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из твердых частиц (иногда с примесью органического и органоминерального вещества), незамерзшей воды, льда и газов в разных пропорциях, что в значительной степени влияет на их механические, физические, акустические, электрические свойства.

Теоретическое моделирование мерзлых грунтов затруднено, хотя предложены разнообразные модели распространения волн для искусственных мерзлых смесей, [Carcione, 1998], а также для засоленных грунтов [Dou, 2017]. Но изучение закономерностей формирования и изменения свойств базируется на данных полевых или лабораторных экспериментальных исследований, причем изучение в лабораторных условиях позволяет находить зависимости с наибольшей точностью за счет контроля всех параметров среды.

Для анализа используются парные зависимости, которые могут иметь функциональный (причинно-следственный) или стохастический (корреляционный) характер. Независимо от жесткости этих связей при практическом их применении требуется специальная проверка и корректировка для каждого конкретного случая [Рекомендации... , 1989].

Исследования мерзлых грунтов проводят различными методами (электроразведка постоянным

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии; вед. науч. с., заместитель заведующего кафедрой геокриологии, канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* koshurnikov@msu-geophysics.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии; ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* kotovpi@mail.ru

³ Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН; мл. науч. с.; *e-mail:* 15331533@mail.ru

и переменным током, несколько модификаций электромагнитных и сейсмоакустических методов). Наиболее информативные параметры — скорость распространения сейсмических волн и удельное электрическое сопротивление [Зыков, 2007; Kneisel, 2008; Wu, 2017].

Большая часть исследований электрических свойств грунтов посвящена незасоленным мерзлым грунтам, в результате установлены основные закономерности изменения электрических свойств в зависимости от влажности, плотности, льдистости, температуры, количества незамерзшей воды [Зыков, 1992; Fortier, 1994; Shan, 2015]. Изучение удельного электрического сопротивления засоленных мерзлых грунтов показало, что увеличение концентрации порового раствора приводит к снижению значения удельного сопротивления грунта и к уменьшению его изменения с температурой, что обусловлено спецификой кинетики промерзания засоленных грунтов и соотношением количества льда и незамерзшего раствора в поровом пространстве [Зыков, 1992; Фролов, 2005].

В незасоленных мерзлых грунтах наблюдается резкое увеличение скорости продольных волн при переходе от положительных к отрицательным значениям температуры [Зыков, 1989]. Для засоленных мерзлых грунтов наблюдается закономерное понижение температуры, соответствующей началу увеличения скорости распространения упругих волн, уменьшению скачка скоростей при переходе в мерзлое состояние и изменению кинетики промерзания [Воронков, 2009; Зыков, 1992; Фролов, 2005]. Наибольшие изменения температурной зависимости скорости за счет повышения концентрации порового раствора при хлоридном засолении характерны для мерзлых грубодисперсных грунтов, а наименьшие — для глин [Воронков, 2009]. На основе работ Ю.Д. Зыкова предложен метод количественной оценки типа криогенной текстуры по сопоставлению скорости распространения волн в горизонтальном и вертикальном направлениях и их отношения [Рекомендации ..., 1989].

Совместное использование значений скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления в разных направлениях позволяет определять основные параметры, характеризующие состав и строение мерзлых грунтов, по результатам измерений и значительно повысить достоверность получаемых результатов [Зыков, 1992; Наuck, 2011].

Таким образом, выявлены основные закономерности изменения электрических и акустических свойств грунтов при увеличении засоленности. Однако в большинстве случаев необходима калибровка корреляционных уравнений в зависимости от вида грунта, его влажности, льдистости, засоленности. При этом многие исследователи берут за основу только один метод определения геофизических параметров. Мы рассмотрим данные об универсальных многопараметрических зависимостях как электрических, так и акустических свойств мерзлых засоленных грунтов.

Материалы и методы исследований. Состав и физические свойства грунтов. Экспериментальные исследования проводились на модельных образцах нарушенного сложения, отобранных в районе месторождения Требса (Большеземельская Тундра). Исследовали два вида грунта — песок и суглинок.

Песок средне-позднеплейстоценового возраста ледово-морского генезиса (gmQII-III), темно-серого цвета, окатанный, хорошо сортированный, бидисперсный. Плотность твердого компонента составляет 2,66 г/см³.

Суглинок средне-позднеплейстоценового возраста ледово-морского генезиса (gmQII-III) серого цвета. Влажность нижнего предела пластичности составляет 0,195 д.е., верхнего предела пластичности — 0,296 д.е., плотность твердой компоненты 2,71 г/см³.

Гранулометрический состав определяли ареометрическим методом для суглинка и ситовым методом для песка (табл. 1)

Для двух грунтов нарушенного сложения задавали разные значения влажности и засоленности. Исходные образцы были незасоленные (суглинок $D_{sal}=0,17\%$) и слабозасоленные (песок $D_{sal}=0,07\%$). Засоленность (D_{sal}) — характеристика, определяемая количеством водорастворимых солей в грунте, равная отношению массы водорастворимых солей в грунте к массе абсолютно сухого грунта.

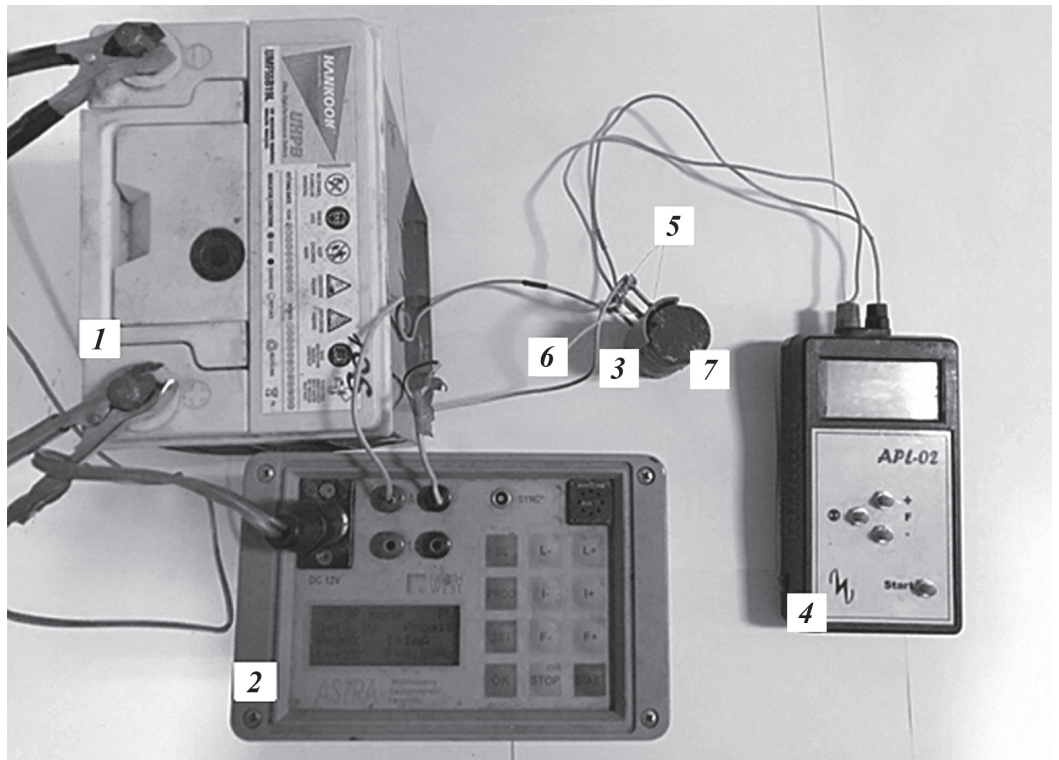
После высушивания и подготовки образцы подвергали искусственному засолению NaCl для создания необходимых значений засоленности. Задавали 5 значений засоленности (0,07; 0,15; 0,26; 0,6; 0,9%) для песка и 7 для суглинка (0,17; 0,3; 0,42; 0,6; 0,9; 1,2; 1,6%). Таким образом, модельные грунты имели три основные градации степени засоленности для мерзлых грунтов: слабозасоленный, средnezасоленный и сильнозасоленный. Для

Таблица 1

Гранулометрический состав исследуемых грунтов

Содержание частиц в каждой фракции, %								Название грунтов по ГОСТ 25100–2011
диаметр частиц, мм								
2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	<0,002	
1,1	0,5	13,7	44,1	40,6	0,0	0,0	0,0	Песок пылеватый
0,0	0,0	1,7	6,3	10,1	37,1	20,6	24,3	Суглинок легкий пылеватый

Рис. 1. Измерительная установка: 1 — аккумулятор «Hankook», 2 — генератор «Astra», 3 — форма для грунта, 4 — измерительное устройство APL-02, 5 — питающие электроды А и В, 6 — принимающие электроды М и N, 7 — образец мерзлого грунта



сильнозасоленных была сделана более дробная градация для оценки их свойств.

Для песчаных грунтов были заданы 3 значения влажности:

- 1) 10% — минимальная влажность по данным обобщения свойств мерзлых песчаных грунтов, отобранных в в районе месторождения Требса;
- 2) 15% — среднее между двумя другими (для проверки полученных закономерностей);
- 3) 19% — полная влагоемкость, когда грунт характеризуется полным заполнением пор.

Для глинистых грунтов были заданы следующие значения влажности:

- 1) 20% — нижний предел пластичности, характеризующий переход ближних коагуляционных

контактов к переходным (частично цементационным) [Грунтоведение, 2005];

- 2) 30% — верхний предел пластичности, который характеризует переход структурных связей в грунте от ближних коагуляционных контактов к преимущественно дальним [Грунтоведение, 2005];
- 3) 36% — полная влагоемкость.

После приготовления образцов их помещали в железное кольцо (диаметр 71 мм, высота 35 мм) и замораживали при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это значение температуры выбрано для создания массивной криогенной текстуры. После полного замерзания образцы помещали в холодильную камеру с температурой для испытаний $-2, -4$ и $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

После испытаний для каждого образца определяли влажность, плотность и засоленность (на основе анализа результатов химического состава водных вытяжек). Именно эти значения в дальнейшем использованы для обработки данных и анализа.

Общая схема исходных значений характеристик грунта приведена в табл. 2.

Приготовленные образцы выстаивали в холодильной камере не менее суток при указанных выше значениях температуры перед определением геофизических свойств.

Электрические свойства. Для определения удельного электрического сопротивления применяли метод Микро-ВЭЗ. Измерительная установка (рис. 1) состояла из генератора, прибора «Astra», позволяющего установить частоту и силу тока в цепи, прибора APL-02, измеряющего напряжение. Измерения проводили при частоте 4,88 Гц.

Удельное электрическое сопротивление рассчитывали по закону Ома:

Таблица 2

Исходные характеристики грунтов*

		Экспериментальные исследования (температура $-2, -4, -6\text{ }^{\circ}\text{C}$)												
		Песок						Суглинок						
Влажность, %		10	15	19				20	30	36				
Засоленность, %	I							0,17					0,17	
	II	0,07	0,14	0,14	0,07	0,14		0,35					0,35	
	III	0,26		0,26	0,26			0,48	0,78	0,5		0,48	0,78	
	IV	0,6	0,9	0,9	0,6	0,9		0,9	1,2	1,6	0,9	1,2	0,9	1,2

* Примечания: I — незасоленный, II — слабозасоленный, III — средnezасоленный, IV — сильнозасоленный (согласно классификации ГОСТ 25100-2011).

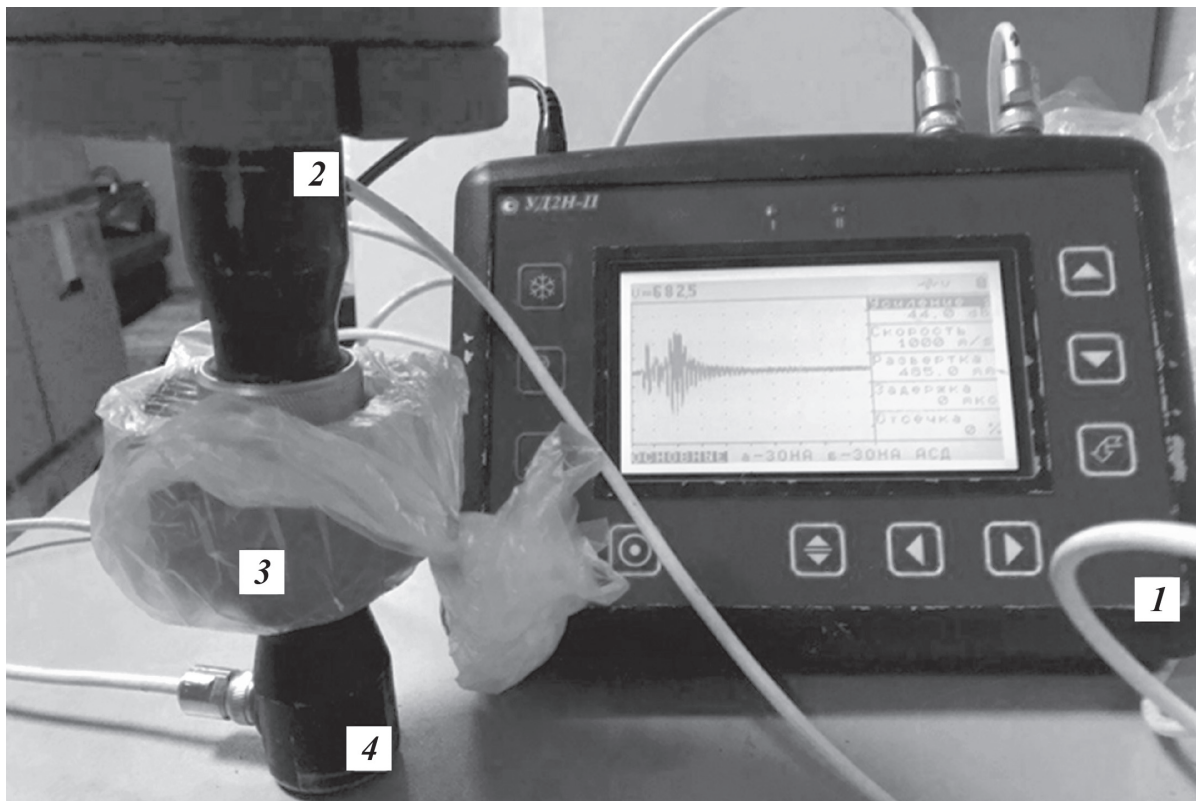


Рис. 2. Измерение акустических характеристик: 1 — ультразвуковой дефектоскоп УД2Н-П, 2, 3 — пьезодатчики, 4 — кольцо с грунтом

$$\rho = k(U/I), \quad (1)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление (Ом·м), U — напряжение (В), I — сила тока (А), k — коэффициент установки, зависящий от формы и размеров образца, расстояния между электродами (по результатам тарировки $k=0,07$).

Все измерения повторяли три раза, затем рассчитывали среднее значение и статистически обрабатывали данные.

Акустические свойства. Для определения скорости продольных волн использовали дефектоскоп УД2Н-П (рис. 2). Импульсные ультразвуковые измерения проводили с помощью пьезодатчиков поршневого типа. Исследования выполняли в ультразвуковом диапазоне частот. Выбор такого диапазона частот при лабораторных измерениях связан с тем, что очень важно получить четкие первые вступления упругой волны.

При измерениях использовали пьезодатчики 100 кГц. Скорость продольной волны рассчитывали по формуле:

$$V_p = L/t, \quad (2)$$

где V_p — скорость продольной волны (м/с), L — высота образца (м), t — время прихода волны (с).

При измерениях верхний датчик загружали фиксированным грузом массой 8 кг, чтобы давление при замере было каждый раз одинаково. Все измерения повторяли 3 раза, затем рассчитывали среднее значение и проводили статистическую обработку данных.

Результаты исследований и их обсуждение.

Результаты статистической обработки геофизических параметров испытанных грунтов показали, что значение коэффициента вариации удельного электрического сопротивления в среднем составляет 8% (максимальное значение 30%), а скорости продольных волн — 3% (максимальное значение 20%). Все это свидетельствует о достаточно точной оценке измеряемых параметров. Наибольший разброс данных зафиксирован при температуре -2°C у засоленных грунтов, характеризующихся близостью интервала интенсивных фазовых переходов.

На рис. 3, а представлен пример зависимости удельного электрического сопротивления и скорости продольных волн (рис. 3, б) мерзлых песка и суглинка от исходной засоленности. Удельное электрическое сопротивление при увеличении засоленности от 0,07 до 0,9% для песка уменьшается в 12 раз ($T=-4^\circ\text{C}$) и 10 раз ($T=-6^\circ\text{C}$), а скорость продольных волн — в 2,1 раза ($T=-4^\circ\text{C}$) и 1,6 раза ($T=-6^\circ\text{C}$). Для суглинков наблюдается та же зависимость. Удельное электрическое сопротивление при увеличении засоленности от 0,17 до 1,6% для суглинка уменьшается в 13 раз ($T=-4^\circ\text{C}$) и 9 раз ($T=-6^\circ\text{C}$), а скорость продольных волн — в 1,5 раза ($T=-4^\circ\text{C}$) и 1,3 раза ($T=-6^\circ\text{C}$). При уменьшении температуры разница уменьшается за счет сокращения количества незамерзшей воды и увеличения количества льдоцементационных связей. Сравнение геофизических характеристик при температуре -2°C не проводилось, так как

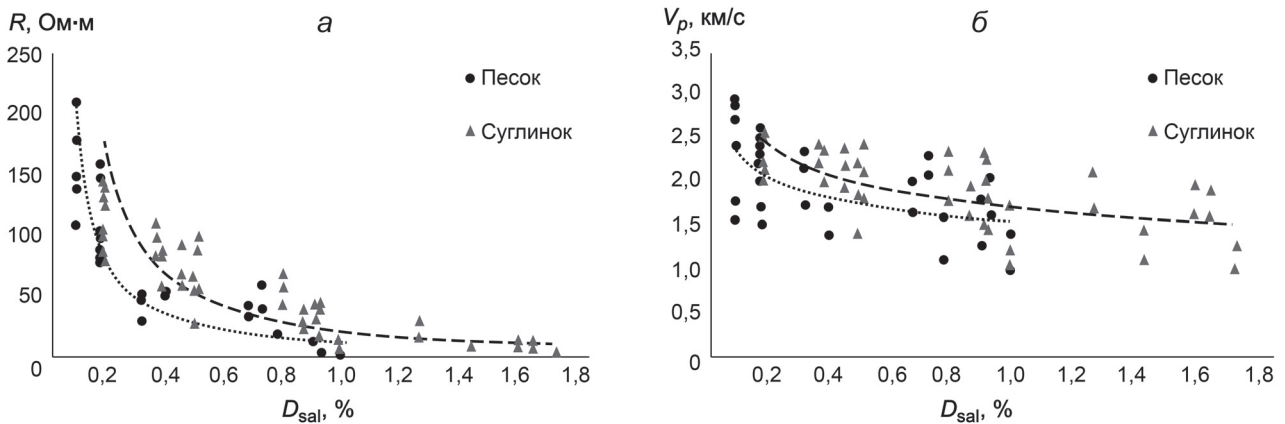


Рис. 3. Зависимость удельного электрического сопротивления (а) и скорости продольных волн (б) от засоленности в грунтах при различных влажности и температуре

средне- и сильнозасоленные грунты находились в талом состоянии.

Увеличение засоленности приводит к уменьшению вариации удельного электрического сопротивления, так как электрические свойства имеют ионную природу и в большей степени определяются концентрацией порового раствора. Так, для слабозасоленных песков уменьшение температуры от -2 до -6 °С приводит к снижению сопротивления примерно в 2 раза, а для сильнозасоленных песков не превышает 20%. Области возможных значений геофизических свойств скорости при повышении засоленности для исследуемых грунтов (суглинка и песка) частично перекрываются (особенно для скорости продольных волн).

Увеличение влажности мерзлого незасоленного суглинка приводит к увеличению геофизических свойств на 30%, а для сильнозасоленного суглинка увеличение влажности ведет к повышению удельного электрического сопротивления в 1,5–2 раза, а скорости продольных волн — на 30–40%.

Таким образом, наблюдается значительное отличие в закономерностях изменения удельного электрического сопротивления и скорости продольных волн для незасоленных (слабозасоленных) и сильнозасоленных грунтов. Для незасоленных грунтов наибольшее влияние оказывает тип грунта и температура, а для засоленных — влажность и температура.

Основные факторы, обуславливающие отличие незасоленного и сильнозасоленного грунта, — их состав и строение. В засоленных грунтах цементирующая роль льда резко уменьшается за счет большого количества незамерзшей воды. По мере увеличения засоленности криогенные текстуры стремятся к сетчатому типу, а в дальнейшем — к нитевидным кристаллам льда и отдельным изомеричным кристаллам [Hivon, 1995]. При значительных значениях концентрации порового раствора криогенное строение различных по составу пород сближается, это определяющий фактор, влияющий на геофизические свойства.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что засоленность — важнейший фактор, влияющий на значения геофизических свойств. Однако для прогноза изменения свойств грунтов необходимы универсальные показатели, которые позволили бы прогнозировать геофизические свойства грунта вне зависимости от типа грунта, влажности и т.д. Для решения этой задачи был проведен корреляционный анализ геофизических параметров и физических свойств (плотность, влажность, засоленность и т.д.), показателей состава (льдиность, количество незамерзшей воды, концентрация порового раствора), а также их различных сочетаний. Всего рассмотрено более 20 параметров.

В результате получено, что удельное электрическое сопротивление, как для песка, так и для суглинка, лучше всего коррелирует с концентрацией солей в поровом растворе (рис. 4). Коэффициент аппроксимации, который позволяет оценить качество построенной модели, имеет высокое значение 78% для удельного электрического сопротивления, причем наибольший разброс данных отмечен для незасоленных и слабозасоленных грунтов. Таким образом, именно концентрация порового раствора является определяющим фактором при прочих равных условиях. Концентрация порового раствора C_{ps} связана с засоленностью соотношением [СП 25.13330.2012]:

$$C_{ps} = D_{sal} / (D_{sal} + W_{tot}),$$

где W_{tot} — суммарная влажность грунта, а D_{sal} — засоленность.

Концентрация порового раствора — симплексный показатель, который учитывает изменение влажности и засоленности, кроме того, значения влажности глинистых грунтов могут значительно превышать таковые у песчаных, т.е. опосредовано вводится поправка и на тип грунта. Как показали экспериментальные исследования, температура незначительно влияет на электрические свойства сильнозасоленных мерзлых грунтов.

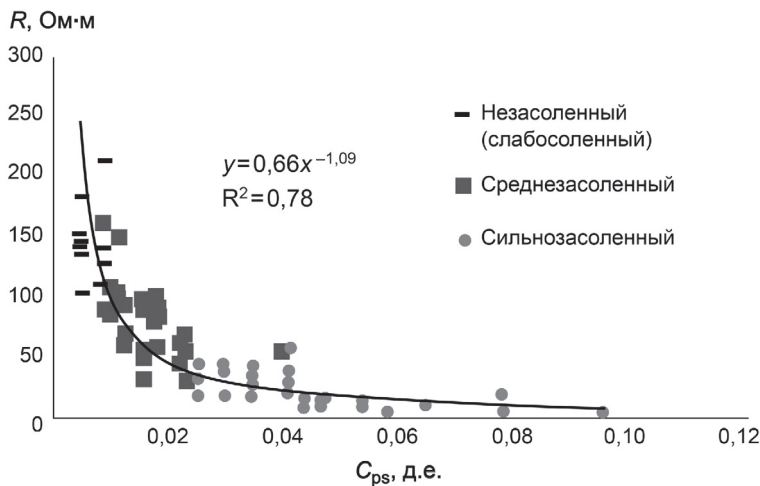


Рис. 4. Зависимость удельного электрического сопротивления от концентрации порового раствора

Минеральные частицы дисперсных грунтов, а также лед являются практически изоляторами. Преобладающее влияние на процессы электропроводности оказывают концентрация незамерзшего порового раствора и степень его распределения в объеме мерзлого грунта. Наиболее сильно на электропроводность мерзлых грунтов влияют легкорастворимые хлориды (сульфатно-карбонатное засоление грунтов слабее примерно в 15–20 раз) [Зыков, 2007].

Скорость продольных волн лучше всего коррелирует с симплексным параметром (отношение концентрации солей в поровом растворе к температуре испытаний) (рис. 5). Анализ полученных нами данных позволил заключить, что, несмотря на различия дисперсности песка и суглинка, прослеживается также зависимость скорости продольных волн от концентрации порового раствора. Однако на упругие свойства оказывает влияние также увеличение льдоцементационных связей, которые возникают при понижении температуры, поэтому в качестве обобщающего параметра и было выбрано отношение концентрации солей в поровом

растворе к температуре испытаний. Коэффициент аппроксимации имеет высокое значение — 81%.

В табл. 3 указаны диапазоны изменения геофизических параметров слабозасоленных и сильнозасоленных грунтов. На основании этих данных можно сделать вывод, что наибольшее отличие характерно для электрических свойств грунтов (значения удельного электрического сопротивления могут уменьшаться в 2–22 раза). Если сравнить полученные значения с обобщенными данными акустических и электрических свойств, опубликованных в работе [Фролова, 2005], то некоторые значения геофизических параметров сильнозасоленных мерзлых грунтов соответствуют талым. Поэтому идентификация мерзлого состояния грунтов по этим параметрам (особенно без знания литологического состава и засоленности) может оказаться неоднозначной.

Таким образом, для более надежной и достоверной идентификации мерзлых засоленных грунтов необходимо применять дополнительные критерии [Скворцов, 2014] или проводить калибровку моделей. Эти данные особенно важны для

геологической интерпретации геофизических данных при исследованиях деградации мерзлых грунтов на арктическом шельфе [Shakhova, 2017]. Так, В.И. Аксеновым [2008] была предложена зависимость температуры начала замерзания от концентрации порового раствора на основе обобщения данных разных авторов. Поэтому, зная концентрацию порового раствора, которая определяется по данным измерений удельного электрического сопротивления, и температуру грунтов, можно однозначно определить состояние грунта (мерзлое и талое).

Таким образом, значения скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления наиболее существенно зависят от кон-

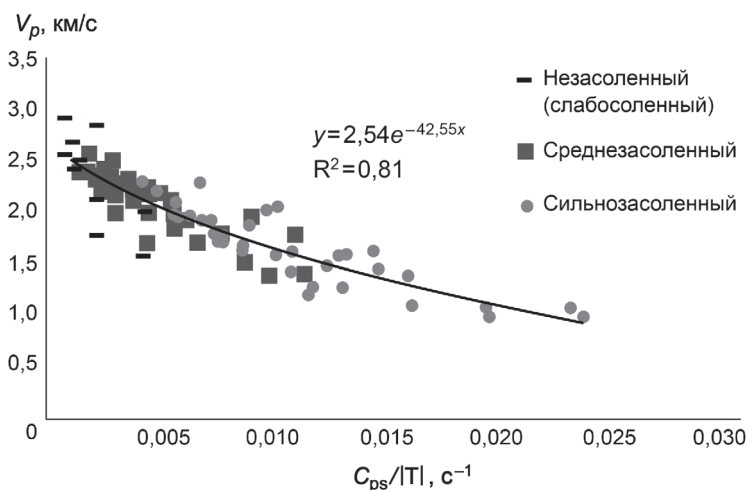


Рис. 5. Зависимость скорости продольных волн от симплексного показателя в исследуемых грунтах

Таблица 3
Геофизические параметры исследуемых грунтов

Тип грунта	Температура, °С	V_p , км/с	R, Ом·м
Суглинок слабозасоленный	-2...-6	2,41-1,92	140-60
Суглинок сильнозасоленный		1,77-1,08	45-5
Песок слабозасоленный		2,92-1,57	210-110
Песок сильнозасоленный		1,8-1,1	61-5

центрации порового раствора. Наиболее высокими значениями геофизических свойств характеризуются незасоленные и слабозасоленные грунты, наиболее низкими — сильнозасоленные; влияние гранулометрического состава, влажности и температуры грунтов, отмечаемое в незасоленных грунтах, также сохраняется, однако имеет подчиненный (по сравнению с влиянием засоленности) характер. При этом области возможных значений геофизических свойств частично перекрываются для средне и сильнозасоленных грунтов.

Закключение. В результате выполненных исследований получены данные о высокой корреляции удельного электрического сопротивления с концентрацией порового раствора и отношения концентрации солей в поровом растворе к температуре со скоростью продольных волн. При этом эти зависимости являются обобщающими для всех вариаций параметров (типа грунта, влажности,

засоленности) особенно для средне и сильнозасоленных грунтов.

Показано, что значения удельного электрического сопротивления могут уменьшаться в 2–22 раза при переходе от слабозасоленного состояния к сильнозасоленному, а для значений скорости продольных волн это отличие не превышает 2 раз. Для сильнозасоленных грунтов удельное электрическое сопротивление перестает зависеть от литологического состава и определяется только концентрацией порового раствора. Этот факт может служить основой для разработки экспресс-метода определения засоленности при известной влажности грунтов. Поэтому именно электрические свойства наиболее подходят для ранжирования грунтов по степени засоленности.

Однако отметим, что описанные закономерности были получены на грунтах нарушенного сложения, имеющих массивную криогенную текстуру, а химический состав был однородным и характеризовался только хлоридно-натриевым засолением. Кроме того, все грунты имели одинаковую плотность и влажность и отличались только различной концентрацией порового раствора и температурой, что и позволило установить закономерности изменения геофизических параметров в зависимости от различных факторов. Разработка методики использования полученных обобщающих параметров для геологической интерпретации требует дальнейших исследований на природных засоленных грунтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксенов В.И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. М.: Все в мире строительства, 2008. 361 с.

Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождения и свойства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 330 с.

Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне // Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. 401 с.

ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 42 с.

Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Наука, 2005. 1023 с.

Зыков Ю.Д., Червинская О.П. Акустические свойства льдистых грунтов и льда. М.: Наука, 1989. 129 с.

Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. 272 с.

Зыков Ю.Д. Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами. М.: Стройиздат, 1989. 36 с.

Зыков Ю.Д. Определение физико-механических свойств мерзлых песчано-глинистых грунтов комплексом геофизических методов: Автореф. докт. дисс. М., 1992.

Ошкин А.Н. Многоволновая сейсморазведка. Ультразвуковые исследования в лаборатории. М., 2008. 33 с.

Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами. М.: Стройиздат, 1989. 32 с.

Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. 2014. Т. 18, № 2. С. 83–90.

СП 25 13330. 2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: ФЦС, 2012. 52 с.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино, 2005. 607 с.

Carcione J.M., Seriani G. Seismic and ultrasonic velocities in permafrost // Geophys. Prosp. 1998. Vol. 46. P. 441–454.

Dou S., Nakagawa S., Dreger D., Ajo-Franklin J.B. An effective-medium model for P-wave velocities of saturated, unconsolidated saline permafrost // Geophysics. 2017. Vol. 82, N 3. P. EN33–EN50.

Fortier R., Allard M., Seguin M.K. Effect of physical properties of frozen ground on electrical resistivity logging // Cold Reg. Sci. Technol. 1994. Vol. 22, N 4. P. 361–384.

Hauck C., Böttcher M., Maurer H. A new model for estimating subsurface ice content based on combined electrical and seismic data sets // Cryosphere. 2011. Vol. 5. P. 453–468.

Hivon E.G., Sego D.C. Distribution of saline permafrost in the Northwest Territories, Canada // Canad. Geotechn. J. 1993. Vol. 30. P. 506–514.

Hivon E.G., Sego D.C. Strength of frozen saline soils // Canad. Geotechn. J. 1995. Vol. 32, N 2. P. 336–354.

Ingeman-Nielsen T., Foged N.N., Jørgensen A.S. Geophysical investigation of saline permafrost at Ilulissat, Green-

land // Proceed. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost, Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. P. 773–778.

Kneisel C., Hauck C., Fortier R., Moorman B. Advances in geophysical methods for permafrost investigations // Permafrost and Periglacial Processes. 2008. Vol. 19. P. 157–178.

Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nat. Commun. 2017. Vol. 8.

Shan W., Liu Y., Hu Z.G., Xiao J.T. A model for the electrical resistivity of frozen soils and an experimental verification of the model // Cold Reg. Sci. Technol. 2015. Vol. 119. P. 75–83.

Wu Y., Nakagawa S., Kneafsey T.J. et al. Electrical and seismic response of saline permafrost soil during freeze–thaw transition // Appl. Geophys. 2017. Vol. 146. P. 16–26.

Поступила в редакцию 02.04.2019

Поступила с доработки 25.04.2019

Принята к публикации 25.04.2019