

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 624.131.4:551

ОСОБЕННОСТИ ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА

О. П. Червинская, Ю. Д. Зыков*, А. Д. Фролов**

Производственный и научно-исследовательский институт инженерных изысканий в строительстве, 105058, Москва, Окружной пр., 18, Россия

** *Московский государственный университет, 119899, Москва, Воробьевы горы, МГУ, Россия*

*** *Объединенный научный Совет по криологии Земли РАН, 117312, Москва, ул. Ферсмана 13, Россия*

В статье рассматриваются и обсуждаются результаты экспериментов по изучению электрических и упругих свойств песчано-глинистых мерзлых грунтов, насыщенных растворами различного состава и концентрации. Показаны и объяснены значительные отличия этих свойств в засоленных и пресных грунтах. Полученные данные позволили впервые оценить критическую концентрацию поровых растворов, разделяющую мерзлые грунты на засоленные и пресные для ряда песок—глина.

Электрические и упругие свойства, засоленные мерзлые грунты, концентрация, поровый раствор

PECULIARITIES OF FROZEN SOLINE GROUNDS AND THEIR ELECTRIC AND ELASTIC PROPERTIES

O. P. Chervinskaya, Yu. D. Zykov*, A. D. Frolov**

Research Institute of Engineering Prospecting for Construction, Okružnoi passage, 18, 105058, Moscow, Russia

* *Geology faculty, Moscow State University, Vorobiovy Gory MGU, 119899, Moscow, Russia*

** *United Scientific Council on Earth Cryology, Russian Academy of Sciences, Fersman st. 13, 117312, Moscow, Russia*

Electric and elastic properties of frozen sandy clay soils saturated with solutions of various composition and concentration have been determined. Significant differences between these properties in saline and nonsaline soils are interpreted. First estimates are given of the critical concentration of pore solutions, which makes it possible to separate objectively the frozen soils from saline and nonsaline for the sand—clay series.

Electrical and elastic properties, saline frozen soils, concentration, pore solution

ВВЕДЕНИЕ

Засоленные песчано-глинистые мерзлые грунты достаточно часто встречаются в криолитозоне, а в прибрежных районах арктических морей почти повсеместно характерен хлоридный состав поровых растворов с преобладанием ионов Na^+ и Mg^{2+} [Дубиков и др., 1990]. Этот тип засоления называют морским. Выделяют также континентальный тип засоления с преобладанием в поровых растворах сульфатов и карбонатов магния и кальция. Кровля засоленных мерзлых отложений может залегать на глубинах от 0 до 50—60 м, а их мощность иногда достигает 200—300 м. Существенное влияние этих грунтов на хозяйственную деятельность несомненно. Кроме природного засоления на территориях и вблизи крупных северных городов (Якутск, Воркута, Норильск и др.) наблюдается интенсивное техногенное засоление верхней части мерзлой толщи.

В связи с запросами практики строительства в первую очередь были начаты в 1959—60 гг. исследования деформационных и прочностных свойств засоленных мерзлых грунтов как оснований сооружений [Дубиков и др., 1990]. Значительно позже начались специальные исследования тепловых, электрических, упругих и других физических и физико-механических свойств этих грунтов. Знание специфики физических свойств засоленных мерзлых грунтов имеет большое научное и практическое значение для проектирования и интерпретации геофизических исследований, при решении разнообразных задач и, в особенности, для создания системы эколого-геофизического мониторинга в связи с локальными и глобальными нарушениями термодинамического режима мерзлых толщ. Эти знания также необходимы для разработки физических и

физико-химических методов неразрушающего контроля кинетики изменения фазового состава и состояния засоленных грунтов при их промерзании, либо оттаивании.

Известно, что наиболее чувствительными к изменениям состояния и состава мерзлой среды являются ее электрические и упругие свойства [Зыков и др., 1989; Фролов, 1976]. Именно они являлись предметом целенаправленных лабораторных исследований, проводившихся в течении ряда лет. Основной их целью являлось установление основных закономерностей изменения электрических и упругих свойств песчано-глинистых мерзлых грунтов в широком диапазоне концентраций насыщающих поровых растворов и различном их ионном составе. В настоящей статье приведены основные данные и рассмотрены установленные характерные для засоленных грунтов закономерности.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Хорошо известно, что любой мерзлый грунт характеризуется одновременным содержанием льда и незамерзшей жидкой фазы. Не менее важным является формирование новой пространственной кристаллизационно-коагуляционной криогенной структуры (ПККС), отличающей мерзлый грунт от талого [Фролов, 1976; Frolov et al., 1993]. Все основные элементы ПККС: минеральная матрица (скелет грунта), ледяная матрица и матрица межзерновых зон, содержащая жидкую фазу и примеси, претерпевают изменения при переходе от пресных к засоленным грунтам.

Важнейшим компонентом мерзлого грунта, обуславливающим его физические свойства, является жидкая фаза (практически всегда раствор), которая существует в разнообразных энергетических состояниях в виде полудискретных и дискретных скоплений (доменов), в основном в межзерновых граничных зонах, а также в зернах и агрегатах льда. По существу, в грунте имеются разные виды поровой жидкости с измененной структурой, которые замерзают при различных температурах, либо вообще не кристаллизуются — „нетермоактивная“ жидкая фаза. Результатом этого является расширенный температурный интервал фазовых изменений в мерзлых грунтах. Количество незамерзшей жидкой фазы обусловлено адсорбционной активностью, микронеровностью рельефа и неоднородностью поверхностей зерен твердых матриц грунта.

Возрастание концентрации и понижение температуры поровых растворов приводит к увеличению поверхностного натяжения, нарушению смачиваемости и распаду толстых пленок жидкой фазы на „капли“-домены [Фролов и др., 1993; Frolov et al., 1993], т.е. повышается степень дискретизации незамерзшей жидкой фазы.

Начальная концентрация и состав насыщающих грунт растворов сильно влияет и на формирование порового, либо сегрегационного льда, что обуславливает значительные отличия ледяной матрицы ПККС мерзлого засоленного грунта от пресного.

Возможны два основных случая формирования ПККС, а следовательно, и свойств мерзлого грунта:

— при возникновении и эволюции ПККС преобладает влияние минеральной матрицы — пресные мерзлые грунты и хорошо известные криогенные процессы;

— преобладающее влияние оказывает концентрация и ионный состав порового раствора на формирование и особенности ПККС — засоленные грунты.

Очевидно, должно быть граничное состояние грунта, определяемое некоторой критической исходной концентрацией порового раствора — $C_{кр}$, позволяющей отличить засоленные грунты от пресных. Тем не менее до сих пор нет единого критерия определения $C_{кр}$. Более того, в научной литературе и в ряде нормативных документов применяется понятие засоленность грунта — D_{sal} (отношение веса солей к весу сухого грунта в единице объема). Ясно, что при фиксированном D_{sal} и разных влажностях данного грунта исходная концентрация его порового раствора может отличаться на порядок и более, что обусловит значительные различия в кинетике его промерзания, формировании ПККС, содержании жидкой фазы и др., а, следовательно, и в физико-механических свойствах. Поэтому применение D_{sal} для характеристики засоленности грунтов вряд ли оправдано. Более подходящим для этих целей является исходная (в талом состоянии, при заданной влажности) концентрация насыщающего грунт порового раствора C_1 .

Установлено, что с возрастанием исходной концентрации поровых растворов содержание жидкой фазы при заданной температуре мерзлого засоленного грунта возрастает почти линейно [Основы геокриологии, 1996], что близко к ситуации для свободных растворов. Эксперименты [Основы геокриологии, 1996] также показывают, что количество жидкой фазы в мерзлом засоленном грунте зависит от состава порового раствора и уменьшается (при прочих равных условиях), например для растворов солей натрия в ряду: $NaCl—NaNO_3—Na_2SO_4—Na_2CO_3$. Однако это изменение неравномерно. Если для последнего звена указанного ряда оно отличается на 10—15%, то преобладание $NaCl$ в поровом растворе приводит к увеличению содержания жидкой фазы в засоленном мерзлом грунте в два раза и более по сравнению с карбонатным и сульфатным составом.

Для засоленных мерзлых грунтов наблюдается заметное смещение температуры начала за-

мерзания ниже 0°C , пропорциональное исходной концентрации, что особенно заметно при $C_1 > C_{кр}$. Ширина температурного интервала и интенсивность фазовых преобразований также претерпевают изменения, особенно сильные в песчаных грунтах.

Одновременно происходят заметные изменения твердых матриц ПККС. Ледяная матрица грунта представляет собой соленый лед с гораздо более мелкими и примесными кристаллами, чем в пресных грунтах. Причем средний размер кристаллов льда уменьшается еще и с повышением валентности основного катиона растворенной соли. Значительная часть солей (30—60%) из порового раствора переходит в соленый лед, содержащий ячейки рассола. Минеральная матрица ПККС засоленного грунта также может заметно измениться за счет процессов коагуляции глинистых частиц и диспергирования песчаных [Основы геокриологии, 1989].

В целом засоленный мерзлый песчано-глинистый грунт представляет собой композиционный материал с ПККС, содержащей больше ослабляющих элементов, чем незасоленный (границные межзерновые зоны с большим содержанием жидкой фазы, примесный поровый лед и др.), что приводит к повышению его пластичности. При понижении температуры такого грунта, сопровождающейся вымерзанием рассола и выпадением кристаллогидратов солей, появляются и начинают преобладать упрочняющие межзерновые зоны, и среда становится более жесткой и хрупкой. Как следствие отмеченных особенностей должны возникать значительные отличия в электрических и упругих свойствах в разной степени засоленных мерзлых грунтов даже при одинаковом их литологическом составе.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ввиду сложности и многофакторности изменений физических свойств мерзлых пород, их изучение в полевых условиях с целью установления конкретных базовых закономерностей практически невозможно. Поэтому исследования электрических и упругих свойств мы выполняли в лаборатории на образцах различного литологического состава. Основные сведения о грунтах, из которых изготавливались образцы, приводятся в табл. 1. Материал грунта подвергался неоднократному отмыванию в дистиллированной воде с последующим высушиванием при $t = 105^{\circ}\text{C}$. Сухой грунт смешивался с соответствующим количеством раствора солей заданной концентрации и состава. Затем грунттовую пасту набивали в цилиндрические формы (одометры), утрамбовывая до нужного объема. С целью получения массивной криотекстуры образцы, помещенные под небольшую нагрузку ($\sim 0,5 \text{ кг/см}^2$) замораживались при $t = -30^{\circ}\text{C}$. Исходная весо-

Таблица 1. Свойства грунтов, используемых в лабораторных экспериментах

Грунты	Гранулометрический состав, % Диаметр, мм			Число пластич. J_p , %	Удельная плотность, г/см^3
	>0,05	0,05—0,005	<0,005		
Кварцевый песок	99,9	0,1	—	—	2,66
Песок	94,7	4,5	0,8	—	2,71
Супесь	75,9	14,4	9,7	3,2	2,71
Суглинок1	51,0	28,4	20,6	7,9	2,72
Суглинок2	12,0	74,9	13,1	11,2	2,69
Глина	15,4	41,8	42,8	17,8	2,70
Каолин	1,0	26,0	73,0	21,0	2,65

вая влажность образцов задавалась в интервале от 10—15% до 30—50%, что включало диапазон от неполного заполнения пор до полного и несколько большего. Основной объем экспериментов выполнялся на образцах с полным влагонасыщением. Примеры, рассматриваемые в настоящей статье относятся к влагонасыщенным (или близким к этому состоянию) грунтам. Однако установленные закономерности могут быть распространены и на другие, не слишком сильно отличающиеся суммарной влажностью, грунты с соответствующей корректировкой значений изучавшихся параметров.

В основном моделировались мерзлые грунты морского типа засоления, что осуществлялось насыщением образцов растворами NaCl. Для оценки отклонения свойств грунтов континентального и смешанного типов засоления от морского были проведены эксперименты с образцами, насыщенными растворами отдельных солей, а также их смесями в различных пропорциях. Определение свойств (диэлектрической проницаемости $\epsilon_{эф}$, удельного электрического сопротивления ρ и скоростей распространения ультразвука V_p , V_s и V_R) проводились по известным методикам [Зыков и др., 1989] при фиксированных температурах (обычно в режиме ее повышения) от $-(20—25)^{\circ}$ до -1°C . Модули упругости рассчитывались по формулам теории упругости сплошной среды через величины измеренных скоростей и плотность грунта. При каждой температуре изменения образцы выдерживались в течение многих десятков часов до достижения квазиравновесного состояния. Последнее считалось достигнутым, когда измеряемые электрические и акустические параметры переставали изменяться во времени. Квазиравновесное состояние образцов является необходимым условием такого рода экспериментов. Оно позволяет обеспечить воспроизводимость и представительность результатов для определенного термодинамического состояния грунта, а также возможность их

распространения на мерзлые грунты соответствующего состава, состояния и криотекстуры в естественном залегании.

После окончания серии измерений для каждого образца контролировались основные параметры его состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Критическая концентрация порового раствора. Мы полагаем, что объективным критерием определения $C_{кр}$ может быть отличие в физических свойствах, обусловленное спецификой формирования строения и состава ПККС засоленного мерзлого грунта. Однако для реализации этого подхода и достаточно точного определения $C_{кр}$ необходим очень большой объем экспериментальных исследований конкретных физических свойств на образцах основных видов песчано-глинистых грунтов при насыщении их растворами различными по составу и в широком интервале их концентрации, например от 10^{-5} — 10^{-4} до 1—5 моль/л с равномерным шагом изменения. Таких экспериментов выполнено пока недостаточно, но имеющиеся к настоящему времени данные позволяют сделать некоторые полезные обобщения.

Результаты наших экспериментов по изучению диэлектрических свойств [Фролов и др., 1983; 1993] дали возможность впервые объективно установить, что для мерзлого кварцевого песка, насыщенного растворами хлоридов Na и K в широком интервале концентраций, величина $C_{кр} \approx 5 \cdot 10^{-3}$ моль/л $\approx 0,3$ г/л (рис 1, а), что практически совпадает с $C_{кр}$, разделяющей пресные и соленые льды. Как видно из рисунка, при исходной концентрации $C_i < C_{кр}$ мерзлый песок и лед имеют свойства близкие к пресным, а при $C_i > C_{кр}$, в соответствии с изменениями ПККС и возрастанием содержания жидкой фазы, возникают существенные отличия

в диэлектрических свойствах соленых криогенных образований по сравнению с пресными. Подобные эксперименты с глинистыми грунтами пока не выполнялись. Однако обобщение результатов других косвенных экспериментов по изучению прочностных свойств и формирования криотекстур [Панченко и др., 1990; Хименков и др., 1990] позволяет установить, что величина $C_{кр}$ (при хлоридном составе поровых растворов) возрастает, в первом приближении, линейно с увеличением глинистости грунта (рис. 1, б) и достигает для тяжелых глин $\sim 0,5$ моль/л. Указанные на рисунке значения $C_{кр}$ определены с разной степенью достоверности, но общий тренд несомненен.

Наименьшие $C_{кр} = 5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, справедливые для кварцевых песков и льдов, связаны с изменениями свойств растворов (структуры, вязкости и др.) за счет взаимодействия ионов. Большие значения $C_{кр}$ для глинистых грунтов обусловлены ионнообменными свойствами минеральной матрицы. В этих грунтах значительная часть ионов порового раствора находится во взаимодействии с активными поверхностями минерального скелета, и концентрация раствора слабо влияет на кинетику замерзания и формирования ПККС.

Таким образом, приведенные данные о $C_{кр}$ позволяют впервые, с объективных позиций составить представление о её величинах и изменении в ряду песок — глины.

2. Упругие и электрические свойства.

Засоление морского типа. Изучение скоростей распространения упругих волн и динамических модулей упругости в целом подтверждает выше отмеченные общие особенности засоленных мерзлых грунтов и позволяет их охарактеризовать количественно.

Наибольшие изменения скоростей V_p и V_s (а следовательно и ПККС) при разных исходных

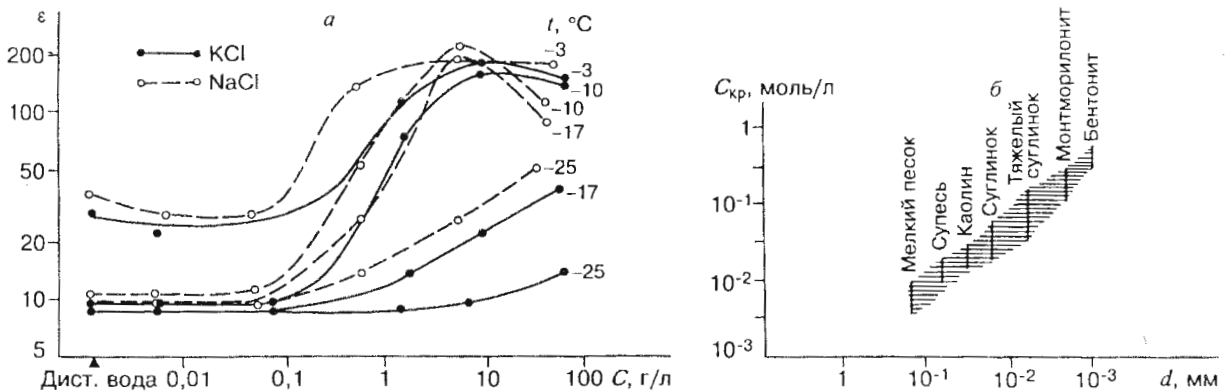


Рис.1. Критическая начальная концентрация порового раствора для: а — кварцевого песка (по результатам диэлектрических измерений); б — для различных песчано-глинистых грунтов (по результатам обобщения).

концентрациях поровых растворов $C_i > C_{кр}$ имеют место для соленых песков. Так, например, при $t = -5^\circ\text{C}$ в мерзлом NaCl засоленном песке при увеличении C_i в 40 раз (от 0,7 до 29 г/л) V_p уменьшается примерно в три раза (3900—1400 м/с), в то время как в глине лишь в два раза.

Еще более четкая картина получена для динамических модулей упругости. Особенно характерным оказалось изменение коэффициента Пуассона (ν) (рис.2). Как следует из рисунка, в песчаных и глинистых грунтах изменение $\nu = f(C_i)$ хорошо соответствует приведенным выше величинам $C_{кр}$. Для мерзлого песка при $C_i > C_{кр}$ ($\sim 0,5$ г/л) имеет место достаточно резкое возрастание ν в 1,75 раза от 0,2 до 0,33—0,35, а затем медленное увеличение значений 0,37—0,39 (при $C_i = 1$ моль/л) почти одинаковых с талым грунтом. Для мерзлой глины подобное возрастание ν начинается при $C \sim 10$ г/л, что соответствует $C_{кр}$ глинистых грунтов (см. рис. 1,б). Однако коэффициент Пуассона изменяется не столь резко, как у песка, в более широком интервале C_i , и возрастает примерно в 1,3 раза, а при больших $C_i \sim 1$ моль/л выходит тоже к значениям, близким для талого состо-

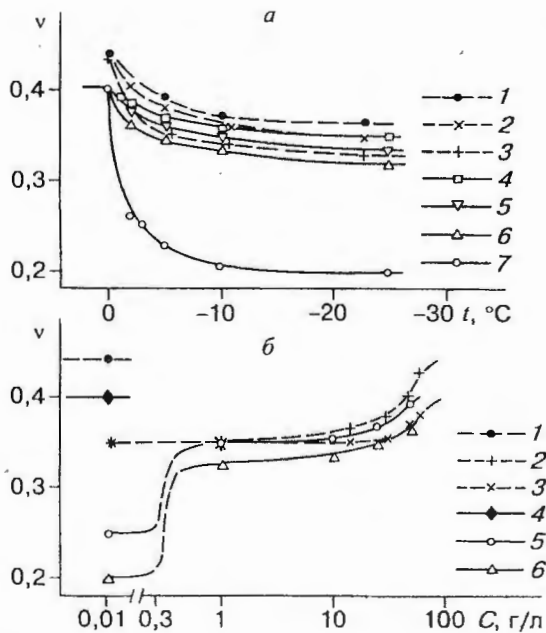


Рис.2. Зависимость коэффициента Пуассона (ν) от температуры (а).

1—3: глина с начальной концентрацией порового раствора $C_i = 45, 30, 0-10$; 4—7: песок — $C_i = 30, 10, 2, 0$ г/л.

Зависимость ν от начальной концентрации порового раствора (б).

1—3: глина при температуре $t > 0; -5^\circ\text{C}; -10^\circ\text{C}$; 4—6: песок при той же температуре, соответственно.

яния — 0,44—0,45. В интервале значений C_i от 0 до 10 г/л для изучавшейся глины $\nu = 0,34 - 0,35$ и не зависит от концентрации, т.е. при этих C_i мерзлую глину можно считать пресной. Подобная картина имеет место и для других динамических модулей упругости.

На диаграмме (рис. 3.) приведены полученные зависимости для модулей Юнга (E) и сдвига (G) от температуры и C_i . Наибольшие изменения в значениях E и G происходят в мерзлом засоленном песке при $C_i = C_{кр}$: модуль E резко уменьшается примерно в 3—4 раза, а модуль G — примерно в 2 раза в зависимости от температуры мерзлого грунта. При дальнейшем возрастании C_i величины модулей E и G продолжают уменьшаться, но с меньшим градиентом, и выходят к некоторым асимптотическим значениям при $C_i \sim 50$ г/л равным, например при $t = -5^\circ\text{C}$ соответственно $\sim 0,8$ и $< 0,1$ ГПа, что примерно в 20 раз меньше, чем для пресных мерзлых песков при тех же температурах. Для глинистых грунтов в интервале C_i от 0 до 10—15 г/л имеет место плавное небольшое уменьшение модулей E и G , примерно в 1,5 раза. Это, по-видимому, связано с формированием примесного порового льда, снижающего жесткость среды. Затем при возрастании $C_i > C_{кр}$ имеет место тенденция к более резкому уменьшению модулей, которое можно объяснить повышением содержания жидкой фазы в засоленном глинистом грунте.

Электрические свойства определяются в основном повышенными содержанием и электропроводностью жидкой фазы в мерзлых грунтах, а также степенью ее неоднородности и дискрет-

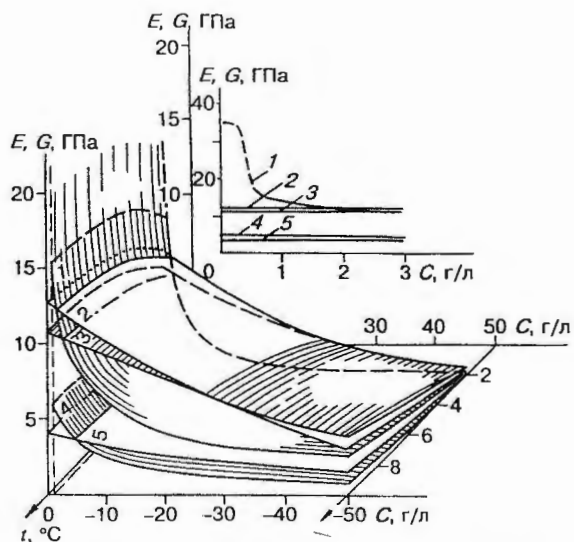


Рис. 3. Зависимость модуля Юнга E (1, 2, 3) и модуля сдвига G (4, 5) от температуры и концентрации порового раствора

1, 4 — песок; 2 — суглинок; 3, 5 — глина.

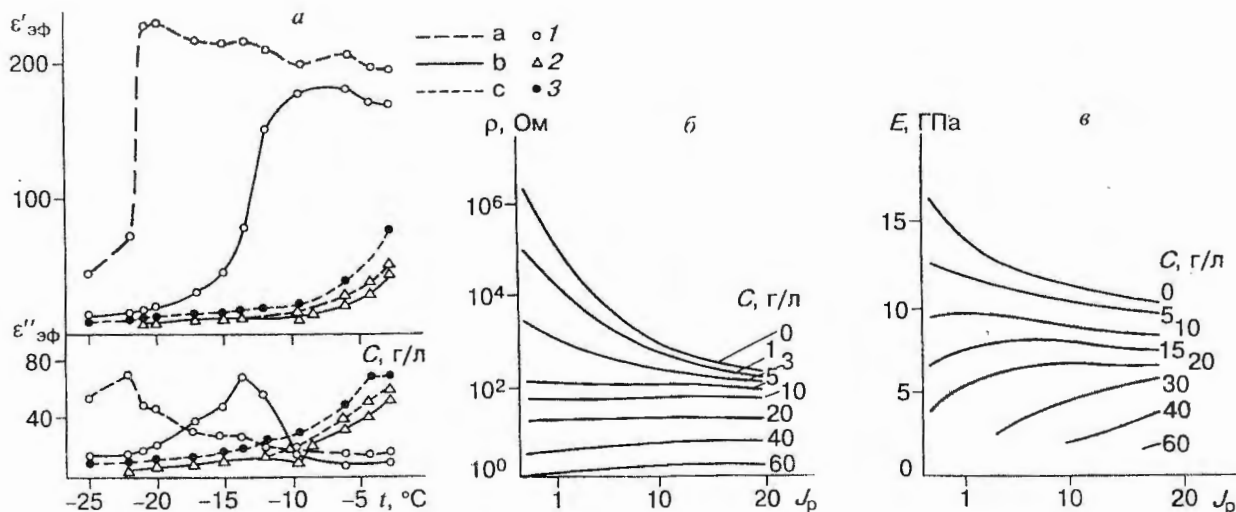


Рис. 4. Влияние начальной концентрации порового раствора на $\epsilon'_{эф}$ (а), ρ (б) и E (с).

а — зависимость $\epsilon'_{эф}$ от температуры для мерзлого песка, насыщенного дистиллированной водой и растворами NaCl и KCl; частота 10 кГц; параметры кривых: а — NaCl, б — KCl, с — дистиллированная вода; 1, 2, 3 — $C_i = 10^{-1}$, 10^{-3} и 0 моль/л, соответственно. б, в, — зависимость ρ и E от литологического состава (числа пластичности J_p) при $t = -5$ °C; кривые — величина начальной концентрации порового раствора (г/л).

ности объемного распределения в грунте. Последнее особенно сильно влияет на величину эффективной диэлектрической проницаемости, измеряемой на частотах ниже 50 кГц, за счет эффекта макродипольной поляризации [Фролов, 1976; Фролов и др., 1983]. Поэтому температурная зависимость $\epsilon'_{эф}$ кварцевого мерзлого песка, насыщенного растворами хлоридов Na и K (рис. 4,а) приобретает характер, сходный с мерзлыми пресными глинистыми грунтами [Фролов, 1976], т.е. резко отлична от подобной зависимости для незасоленного мерзлого песка. Так, в достаточно сильно засоленных кварцевых песках ($C_i = (1-5) \cdot 10^{-1}$ моль/л), согласно температурным спектрам $\epsilon'_{эф}$, наиболее интенсивные изменения ПККС происходят в два этапа: вблизи температур начала замерзания и появления порового льда в грунте вблизи эвтектической температуры ($t_{эвт}$) для данного состава порового раствора. Это связано с резким изменением степени дискретизации незамерзшей жидкой фазы при формировании порового льда и при интенсивном выпадении кристаллогидратов соли на втором этапе. Таким состояниям соответствуют максимумы $\epsilon'_{эф}$, особенно четко проявляющиеся при измерениях на низких частотах (см. рис. 4, а). Между этими состояниями сохраняются аномально высокие значения $\epsilon'_{эф}$, обусловленные эффектом макродипольной поляризации дискретных доменов незамерзшего порового раствора, которые сохраняются вплоть до $t_{эвт}$.

В случае относительно малого засоления ($C = \sim 10^{-2}$ моль/л) имеет место лишь первый

максимум. Однако, несмотря на отсутствие резких изменений вблизи $t_{эвт}$, температурные спектры засоленного мерзлого песка имеют существенные отличия от пресного. При больших концентрациях порового раствора $C_i > 1$ моль/л интенсивность фазовых изменений плавно нарастает от температуры начала замерзания (которая значительно ниже 0 °C) до эвтектической, т.е. практически отсутствует первый максимум. Характерно, что при температурах, ниже эвтектической, уменьшение $\epsilon'_{эф}$ сильно засоленного песка ($C_i > 10^{-1}$ моль/л) происходит в некотором интервале температур и сходно с тем, которое имеет место для пресного при понижении температуры после начала его замерзания (см. рис. 4, а). Эта аналогия позволяет предполагать, что уменьшение количества жидкой фазы и размеров ее дискретных скоплений происходит примерно в двух рассматриваемых состояниях мерзлого песка. Поскольку температура полного замерзания жидкой фазы в пресном песке была оценена [Фролов, 1976; Frolov et al., 1993] $\sim (25-30)$ °C, то можно ожидать, что в засоленном песке подобное состояние будет достигнуто при температурах на 25—30 °C ниже эвтектической для насыщающего порового раствора. Такая ситуация подтверждается зависимостью $\epsilon'_{эф}(t)$ для мерзлого песка насыщенного раствором KCl с $t_{эвт} = \sim 11$ °C (см. рис. 4,а): левая часть кривой 2 при температурах ниже -12 °C аналогична зависимости $\epsilon'_{эф}$ для пресного песка при $t < -2$ °C. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования и уточнение этого факта, указыва-

ющего на существенное отклонение процесса замерзания раствора в пористой среде от теории свободных растворов.

Удельное электрическое сопротивление (ρ) засоленных песчано-глинистых грунтов, так же как в пресных, возрастает при замерзании и последующем понижении температуры. Однако это возрастание начинается при температурах ниже 0°C в соответствии с исходной концентрацией порового раствора, и интенсивность его при переходе в мерзлое состояние резко снижается при увеличении засоленности ($C_i > C_{кр}$). Так, если при замерзании пресного водонасыщенного песка ρ возрастает в 10^4 — 10^5 раз, то при $C_i = 10^{-1}$ моль/л это возрастание составляет лишь 10 — 10^2 раз; а при $C_i = 1$ моль/л — всего ~ 2 раза.

Таким образом, при увеличении $C_i > C_{кр}$ мерзлый песчаный грунт по величине ρ приближается к мерзлому глинистому. Отсюда следует, что при некотором значении C_i практически исчезает зависимость ρ от литологического состава засоленного песчано-глинистого мерзлого грунта. Для изучавшихся нами образцов пылеватого песка, супеси, суглинка и каолина, насыщенных растворами NaCl, такое состояние наступает при $C_i = \sim (0,6-0,7) \cdot 10^{-1}$ моль/л (см. рис. 4, б). При исходных концентрациях насыщающих растворов больших $C_i = 3-4$ г/л величина ρ всех указанных грунтов одинаково уменьшается при фиксированной температуре мерзлого состояния. Из этого следует, что формирование ПККС, обуславливающей сечение и извилистость токовых путей, осуществляется сходно в этих грунтах, так как величина их ρ определяется лишь удельным сопротивлением их порового раствора, зависящим от концентрации. В определенной степени это подтверждается и приведенными зависимостями модулей упругости (см. рис. 4, в). При указанной исходной концентрации порового раствора C_i' модули упругости как E , так и G принимают близкие значения для грунтов разного литологического состава. Однако при $C_i > C_i'$ модули упругости засоленного мерзлого песка оказываются меньше. Возможно это обусловлено меньшей жесткостью ПККС засоленного мерзлого песка ввиду содержания в межзерновых зонах более крупных поликристаллических образований порового соленого льда, чем в глинистых грунтах.

Континентальный и смешанный тип засоления. Для оценки отличий упругих и электрических свойств мерзлых грунтов континентального и смешанного типов засоления были выполнены ограниченные по объему эксперименты с образцами суглинка при насыщении их растворами солей группы хлоридов и группы карбонатов и сульфатов в разных пропорциях. Измерялось два параметра: ρ и V_p в интервале

температур от положительных до -20°C . Соотношение в долях количества солей двух групп (сульфаты/хлориды) в насыщающем образцы растворе задавалось дискретно: $0/1$; $0,25/0,75$; $0,5/0,5$; $0,75/0,25$ и $1/0$. Рассмотрим вначале крайние случаи.

На рисунке 5, а, б приведено сопоставление температурной зависимости ρ и V_p для грунта, насыщавшегося растворами различных отдельных солей. Как следует из рисунка, общий характер изменения ρ и V_p при переходе в мерзлое состояние и при дальнейшем понижении температуры остается достаточно универсальным для мерзлого грунта с любым составом порового раствора. Однако состав насыщающего раствора сильно влияет на температуру начала замерзания и интенсивность изменения величины изучавшихся параметров. Последнее определяет разделение полученных зависимостей на две группы: 1) хлоридное засоление (морской тип); 2) сульфатно-карбонатное засоление (континентальный тип), — для которых имеются как общие черты, так и некоторые отличия.

Во-первых, вторая группа отличается от первой существенно более высокими значениями

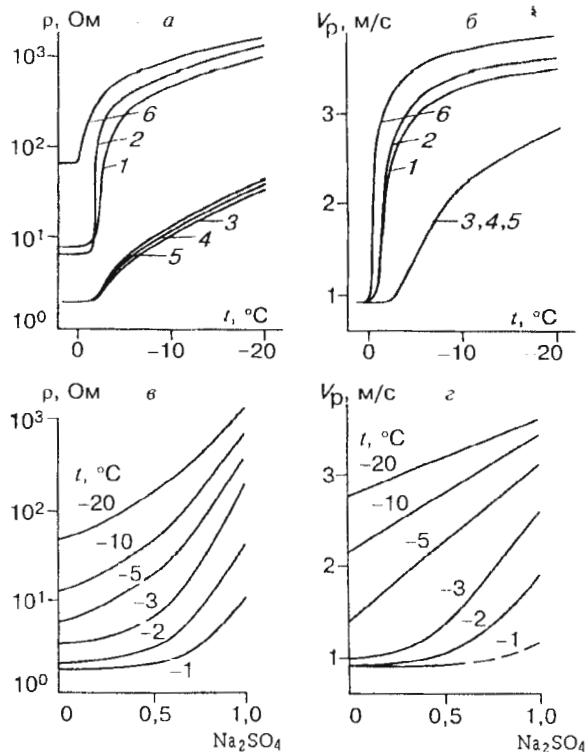


Рис. 5. Влияние состава порового раствора на ρ и V_p для мерзлых суглинков.

а, б — температурная зависимость: 1 — NaHCO_3 ; 2 — Na_2SO_4 ; 3 — MgCl_2 ; 4 — NaCl; 5 — морская вода; 6 — пресная вода; в, г — зависимость от содержания Na_2SO_4 (в относительных единицах) в растворе смеси солей ($\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$) насыщающей жидкости; $C_i = 30$ г/л.

ρ и V_p и большим температурным градиентом их изменения (интенсивностью фазовых преобразований) в интервале до -5°C . Этот интервал можно выделить как первый этап промерзания соленого грунта, когда происходит формирование ледяной матрицы ПККС грунта, уменьшение содержания и возрастание степени дискретизации незамерзшего порового раствора, концентрация которого увеличивается. Поскольку при сульфатном и гидрокарбонатном засолении $t_{\text{звт}}$ равны соответственно $-1,2^\circ\text{C}$ и $-2,1^\circ\text{C}$, то на первом этапе промерзания практически заканчиваются процессы выпадения кристаллогидратов солей, поровый раствор опресняется и значения ρ и V_p оказываются очень близкими к таковым для незасоленного грунта. На втором этапе промерзания при температурах -5 — -20°C значения ρ и V_p для образцов с карбонатно-сульфатным засолением практически аналогичны соответствующим для пресных песков.

Во-вторых, в талом состоянии скорость распространения упругих волн оказывается практически одинаковой для пресного и засоленного грунта при любом составе насыщающего раствора, а удельные сопротивления несколько отличаются. Это связано с тем, что упругость (а также и прочность) мерзлого грунта определяется в основном количеством жидкой фазы в межзерновых зонах. Для удельных сопротивлений полученные отличия в талом состоянии связаны с ионным составом порового раствора. Для растворов хлоридов электропроводность больше.

В-третьих, сопоставление значений исходных задаваемых концентраций растворов с концентрацией водных вытяжек в конце измерений показало, что при сульфатно-карбонатном засолении происходит значительное их уменьшение. По-видимому, в последнем случае часть солей из растворов, взаимодействуя с минеральными частицами, образует плохо растворимые комплексы. Это указывает на сложности физико-химических процессов в засоленных грунтах при их замерзании и оттаивании, которые требуют учета.

При хлоридном составе насыщающих растворов подобного уменьшения концентрации не обнаружено, а характер температурной зависимости ρ и V_p (см. рис. 5, а, б кривые 3—5) практически не зависит от катиона растворенных солей. В области температур выше $t_{\text{звт}}$ формирование и эволюция ПККС мерзлого засоленного грунта и изменение его свойств происходит сходно с рассмотренным выше для NaCl-засоления. В реализованном температурном интервале измерений приведенные на рисунке зависимости для $C_i = \sim 0,5$ моль/л $> C_{\text{кр}}$ отражают существенное ослабление интенсивности фазовых преобразований на первом (до -5°C) этапе замерзания и сохранение значительного содержания незамерзшего порового раствора, которое медленно

уменьшается на втором этапе вплоть до -20°C . Даже для образцов, насыщавшихся раствором морской соли, т.е. содержащим приблизительно 20% сульфатов и карбонатов, полученные значения V_p одинаковы с чисто хлоридным засолением, а отличия в величинах ρ весьма малы.

Поэтому при планировании эксперимента с насыщающими растворами смесей солей были выбраны соли Na с разными анионами: Cl, SO_4 и HCO_3 . Причем замена HCO_3 на SO_4 в растворе не вносит заметной разницы в получаемые зависимости ρ и V_p .

Теперь рассмотрим экспериментальные данные на примере насыщения образцов суглинка смесями растворов солей NaCl и Na_2SO_4 в различных пропорциях (см. рис. 5, в, г). Как ясно следует из рисунка, увеличение содержания сульфата натрия в насыщающем растворе приводит к закономерному возрастанию как ρ , так и V_p . Это возрастание становится достаточно явным при содержании сульфата более $\sim 20\%$. Естественно, что с понижением температуры интенсивность возрастания уменьшается, что соответствует кинетике промерзания соленого грунта при двух типах засоления.

Таким образом, по величинам параметров электрических и упругих свойств к морскому типу засоления могут быть отнесены грунты с преобладающим хлоридным составом поровых растворов при содержании в них до 20—30% сульфатов и карбонатов. Континентальный же тип засоления характеризуется возможным содержанием хлоридов в поровом карбонатно-сульфатном растворе до 10—15% (левая часть графика на рисунке 5 в, г). Содержание хлоридов в смешанном поровом растворе примерно от 60 до 20% характеризует смешанный тип засоленности, при котором засоленный мерзлый грунт имеет промежуточные физико-механические свойства.

Конечно, результаты наших экспериментов и сделанные обобщения дают лишь первые основные объективные вехи построения единой концепции для понимания специфики формирования и эволюции ПККС мерзлых грунтов различного типа засоления и их физико-механических свойств. Необходимы дальнейшие широкие и системные экспериментальные исследования, которые охватывали бы всю необходимую гамму минеральных матриц грунтов, состава и концентрации насыщающих их растворов. Методы изучения электрических и упругих свойств засоленных грунтов представляются весьма перспективными в комплексе этих исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные результаты позволяют сделать ряд выводов:

1. Засоленные мерзлые песчано-глинистые грунты могут быть выделены по значениям кри-

тической исходной концентрации поровых растворов — $C_{кр}$, при которой возникают отличия их физико-механических свойств от пресных. Величина $C_{кр}$ при хлоридном засолении для кварцевых песков составляет $\sim 0,5 \cdot 10^{-2}$ моль/л и возрастает с увеличением глинистости грунта в первом приближении линейно, достигая у тяжелых глин значений $\sim 0,5$ моль/л.

2. При $C_i < C_{кр}$ ПККС мерзлого грунта и его физические свойства аналогичны известным для пресных мерзлых грунтов. При $C_i > C_{кр}$ закономерности кинетики замерзания и формирования ПККС засоленных песчано-глинистых грунтов, а следовательно и их физические свойства (в первую очередь электрические и упругие) сильно зависят от концентрации и ионного состава поровых растворов.

3. Скорости распространения упругих волн (V_p , V_s и V_R) и динамические модули упругости (E, G, K) существенно (до 3—4 раз) меньше даже в относительно слабо засоленных грунтах по сравнению с пресными и ещё более уменьшаются с возрастанием $C_i > C_{кр}$, причем более интенсивно для мерзлых песков.

4. Коэффициент Пуассона, наоборот, возрастает при переходе от пресных к засоленным грунтам и достигает для мерзлых сильно засоленных песков значений 0,38—0,4; а для глин 0,44 — 0,45, что близко к величинам, характерным для этих грунтов в талом состоянии.

5. Удельное электрическое сопротивление ρ засоленных мерзлых грунтов на несколько порядков меньше, чем пресных, в зависимости от исходной концентрации и состава поровых растворов. При исходной концентрации порового раствора $NaCl$ $C_i = \sim (0,6 - 0,7) \cdot 10^{-1}$ моль/л исчезает зависимость ρ от литологического состава песчано-глинистых засоленных грунтов (кроме тяжелых глин) и его величина определяется только исходной концентрацией порового раствора и температурой мерзлого грунта.

6. Эффективная низкочастотная диэлектрическая проницаемость $\epsilon'_{эф}$ сильно засоленных мерзлых песков ($C_i > 10^{-1}$ моль/л) сохраняет аномально большие значения вплоть до эвтектической температуры порового раствора. Время электрической релаксации значительно меньше, чем для пресных мерзлых песков.

7. Согласно температурным зависимостям $\epsilon'_{эф}$ завершение фазовых переходов в засоленном мерзлом песке происходит при температурах на 20—25 °С ниже эвтектической для насыщающего грунт порового раствора. Зависимость $\epsilon'_{эф}(t)$ в этом интервале температур аналогична зависимости для пресного песка после его замерзания.

8. Изменение типа засоления грунтов от морского к континентальному сильно изменяет электрические и упругие свойства засоленных

грунтов в сторону приближения их к пресным. Водонасыщенный засоленный мерзлый грунт характеризуется возрастанием на 1—1,5 порядка величин ρ и в 1,2—1,5 раза скорости V_p при переходе от морского типа засоления к континентальному.

9. Электрические и упругие свойства являются наиболее чувствительными к изменениям ПККС и фазового состава мерзлого засоленного грунта. Поэтому наиболее рациональным для изучения особенностей и контроля изменения состояния засоленных мерзлых грунтов является комплексное применение электрометрических и сейсмоакустических геофизических методов.

Результаты выполненных экспериментальных исследований также показывают возможность моделирования формирования ПККС и физических свойств практически любых мерзлых песчано-глинистых грунтов с помощью мерзлых песков, насыщенных растворами различной концентрации и ионного состава.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 97-05-64961).

Литература

- Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР. М., 1990.
- Зыков Ю.Д., Червинская О.П. Акустические свойства льдистых грунтов и льда. М., Наука, 1989.
- Зыков Ю.Д., Красовский А.Г., Мозганова Е.Я., Червинская О.П. Электрические и акустические свойства засоленных мерзлых грунтов // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, с. 128—135.
- Ершов Э.Д. Лабораторные методы изучения мерзлых грунтов. М., Изд. МГУ, 1985.
- Основы геокриологии, ч.1. Физико-химические основы / Ред. Э. Д. Ершов. М., Изд. МГУ, 1989.
- Основы геокриологии, ч. 2. Литогенетическая геокриология. Изд. МГУ, 1996.
- Панченко В.И., Аксенов В.И. Физико-химический подход к классификации мерзлых грунтов по засоленности // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, с. 70—73.
- Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. М., Недра, 1976.
- Фролов А.Д., Федюкин И.В. О поляризации мерзлых грунтов в переменном электромагнитном поле // Изв. вузов. Геол. и разведка, № 6, 1983, с. 90—95.
- Фролов А.Д. и др. Специфика фазовых превращений в криогенных засоленных песках // Материалы объединенного русско-американского семинара по криологии и глобальным изменениям. Пушино, 1993, с. 262—271.
- Хименков А.И., Минаев А.Н. Влияние степени засоления на формирование криогенного строения мерзлых грунтов // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, с. 55—62.
- Frolov A.D., Seguin M.K. Caracteristiques de la cinétique de Congelation des Sols Salins//Permafrost and Pereglaical Processes. vol. 4, 1993, p. 311—325.

Поступила в редакцию
21 января 1997 г.