

СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

УДК 624.131.4:551

ЗАСОЛЕНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
И ИХ КОРРОЗИОННАЯ АГРЕССИВНОСТЬ

Г.И. Дубиков, Н.В. Иванова, Ю.Д. Зыков*, О.П. Червинская, А.Г. Красовский

Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве, 105058, Москва, Окружной пр., 18, Россия

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

Рассмотрены региональные закономерности распределения солей в мерзлых и охлажденных грунтах побережья Карского моря. Оценена роль фациальных условий осадконакопления в прибрежной зоне, истории развития шельфа в голоцене и криогенного фактора в перераспределении солей в породах. Приведены данные по коррозионной агрессивности мерзлых засоленных грунтов, оценено влияние их состава, температуры и засоленности на эту характеристику.

Засоленные мерзлые грунты, коррозионная агрессивность, концентрация поровых растворов

SALINE COASTAL DEPOSITS AND THEIR CORROSIVENESS

G.I. Dubikov, N.V. Ivanova, Yu.D. Zykov*, O.P. Chervinskaya, A.G. Krasovsky

Production and Research Institute for Engineering of Construction, Okruznoi pr., 18, 105058, Moscow, Russia

** Moscow State University, 119899, Moscow, Vorobiovoy Gory, Russia*

Conformity to natural laws of the distribution of salts in permafrost of the Kara sea coast has been examined. The role of facial sedimental on conditions in the inshore zone, the Holocene history of off-shore development and cryogenic factor in the redistribution of salts in the grounds are evaluated. The data of corrosiveness of saline frozen grounds are obtained.

Saline frozen grounds, corrosiana aggressivity, pore solutions concentration

ВВЕДЕНИЕ

Мерзлые и охлажденные породы прибрежных участков Карского моря и прилегающих районов Ямала характеризуются засоленностью. Их засоление относится к морскому типу и связано с длительным существованием здесь морского бассейна, которое сопровождалось накоплением осадков с солеными водами хлоридно-натриевого состава и их инфильтрацией в слаболитифицированные породы. В результате дисперсные породы засолены до 300 м и глубже. На суше верхняя часть засоленной толщи мощностью до 170—200 м находится в мерзлом состоянии, а нижняя мощностью 100—250 м — в охлажденном состоянии [Дубиков и др., 1986]. На шельфе Карского моря засоленная криогенная толща имеет сложное строение; она представлена современными и реликтовыми мерзлыми породами мощностью до 20-30 м, залега-

ющими среди охлажденных грунтов на разных глубинах от дна.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛЕЙ

Пространственная изменчивость засоления четвертичных пород определяется тремя факторами: 1) фациальными условиями накопления осадков в прибрежной зоне моря и концентрацией солей в придонном слое воды; 2) историей развития шельфа в связи с погружением под воду мерзлых толщ в результате голоценовой трансгрессии моря; 3) дифференциацией солей при промерзании морских осадков, которое сопровождалось изменением концентрации порового раствора и перераспределением солей по разрезу.

В донных грунтах Карского моря засоленность изменяется по площади и разрезу от 0,3 до

Таблица 1. Засоленность (D_{sal} , %) и концентрация поровых растворов (C_p , г/л) донных грунтов

Тип грунтов	Состояние грунтов	D_{sal} , % (min-max)	D_{sal} , % среднее	C_p , г/л (min-max)
<i>Мелководье (до изобаты 3 м)</i>				
Глины и суглинки	Охлажденные	0,6—2,5	1,21 (48)	22—61
	Мерзлые	0,2—0,7	0,45 (49)	15—35
Супеси	Охлажденные	0,6—1,9	0,93 (20)	34—69
	Мерзлые	0,2—0,6	0,35 (10)	12—35
Пески	Охлажденные	0,4—1,3	0,92 (25)	33—73
	Мерзлые	0,2—0,5	0,35 (18)	10—25
<i>Глубоководные участки (глубже 3 м)</i>				
Глины и суглинки	Охлажденные	0,5—1,5	0,78 (108)	20—48
	Мерзлые	0,3—0,6	0,45 (33)	12—18
Супеси	Охлажденные	0,5—0,7	0,61 (15)	18—35
	Мерзлые	0,3—0,6	0,41 (7)	13—17
Пески	Охлажденные	0,4—0,8	0,54 (21)	15—33

Примечание. В скобках — количество определений.

2,5 % (табл.1). Максимальная изменчивость этой характеристики отмечается на мелководье.

В донных грунтах засоленность определяется в первую очередь их состоянием. Так, для основной части акватории глубже 3-метровой изобаты в охлажденных грунтах она составляет 0,5—1,5%, тогда как в мерзлых — не превышает 0,3—0,6%. Наблюдаемое явление связано с разбавлением поровых растворов в промерзающем горизонте за счет мигрирующей влаги. В меньшей степени различия в содержании солей связаны с литологическим составом грунтов.

По глубине количество солей в донных охлажденных грунтах на акватории существенно не изменяется. На Русановской структуре грунты опробованы на глубину 50 м, в Байдарацкой губе — на 80—100 м. Анализ этих материалов показал, что закономерного изменения в засоленности грунтов по разрезу не наблюдается. Для глинистых разрезов отмечается незначительное снижение с глубиной, что коррелируется с уменьшением влажности грунтов. Для концентрации поровых растворов подобная закономерность не обнаруживается — она имеет близкие значения по всему разрезу.

На мелководье отмечается увеличение засоленности грунтов в верхнем 15-метровом горизонте (см. табл. 1). Особенно это характерно для зоны смерзания грунтов с припайным льдом. Здесь установлено повышение минерализации поровых растворов в донных грунтах в 1,5—2 раза по направлению к берегу по мере сокращения толщины слоя воды подо льдом. Это — следствие концентрирования солей при формировании припайных льдов и промерзания грунтов.

Повышение засоленности грунтов в мелководной зоне отмечается в верхней части криогенной толщи до глубин 10—12 м. Глубже засолен-

ность остается неизменной на глубину до 25—30 м, т.е. здесь уже установилось химическое равновесие.

На береговых участках Ямала изменчивость и пестрота в распределении солей в грунтах достигают максимума, особенно в переходной от моря к суше зоне. Наибольшим засолением характеризуются грунты лавы и устьевых частей рек, заливаемых в нагоны и приливы морской водой. Здесь под сезоннотальным слоем или захватывая его, залегают сильнозасоленные мерзлые и охлажденные грунты с содержанием солей до 4% (табл.2). Высокая засоленность грунтов связана с их продолжающимся засолением в результате периодического затопления этих участков морем и концентрирования солей при промерзании пород.

Первая и вторая морские террасы характеризуются наиболее разнообразным составом отложений, что свидетельствует о различных условиях их формирования и промерзания. Это нашло отражение и в колебаниях величины засоления в грунтах от 0,1 до 2,2% (см. табл.2). Отложения третьей морской террасы отличаются более однородным составом. Засоленность в глинистых грунтах составляет в среднем 0,5—0,7%. В песках, венчающих разрезы морских террас, засоление не превышает 0,1% и в ионном составе повышается роль сульфатов, что связано с выносом подвижного иона хлора из песчаных горизонтов при выходе осадков из-под уровня моря и их последующем промерзании.

Распределение солей в мерзлых грунтах морских террас имеет еще одну общую закономерность — горизонты слабозасоленных грунтов совпадают с участками развития сильнольдистых грунтов и пластовых льдов. Это явление аналогично отмеченному выше снижению засоленности в сильнольдистых грунтах на акватории.

ЗАСОЛЕНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Таблица 2. Засоленность (D_{sal} , %) и концентрация поровых растворов (C_p , г/л) грунтов западного побережья Ямала

Тип грунтов	Состояние грунтов	D_{sal} , % (min-max)	D_{sal} , % среднее	C_p , г/л
<i>III морская терраса</i>				
Глинистые	Мерзлые	0,15—0,86	0,61 (18)	6—33
Песчаные	Мерзлые	0,06—0,19	0,12 (7)	2—10
<i>II морская терраса</i>				
Глинистые	Мерзлые	0,11—1,98	0,60 (124)	3—76
Песчаные	Мерзлые	0,03—0,33	0,10 (23)	2—18
<i>I морская терраса</i>				
Глинистые	Мерзлые	0,13—2,23	0,58 (65)	3—98
Песчаные	Мерзлые	0,03—0,29	0,14 (18)	1—18
<i>Морская лайда</i>				
Глинистые	Мерзлые и охлажденные	0,80—3,45	2,13 (70)	16—99
Песчаные	Мерзлые	0,15—0,55	0,33 (15)	5—40
	Охлажденные	0,59—3,2	1,63 (13)	29—73
<i>Пляж</i>				
Глинистые	Мерзлые	0,8—1,9	1,55 (19)	15—66
	Охлажденные	2,0—2,4	2,2 (5)	42—95
Песчаные	Мерзлые	0,1—0,5	0,28 (16)	6—11
	Охлажденные	1,5—3,8	2,8 (8)	56
<i>Пойма дельтовой части рек</i>				
Глинистые	Мерзлые и охлажденные	0,30—4,03	2,01 (32)	6—96
Песчаные	Мерзлые	0,11—0,52	0,29 (15)	3—52
	Охлажденные	0,80—1,5	0,98 (9)	28—75

Примечание. В скобках — количество определений.

Распределение солей в переслаивающейся песчано-глинистой мерзлой толще на морских террасах характеризуется резкими скачками на границах слоев и устойчиво без выравнивания засоленности по глубине. Изменения в концентрации солей по разрезу связаны с составом мерзлых грунтов и не подчиняются известной для талых пород вертикальной гидрохимической зональности, когда тяжелые рассолы перемещаются вниз. В этом заключается особенность мерзлых дисперсных пород, через которые струйчатое движение растворов любой концентрации проявляется несущественно или вообще не происходит.

В верхнем горизонте мерзлой толщи до глубин 10—15 м отмечено закономерное уменьшение засоленности грунтов вверх по разрезу, что связано с перераспределением солей под влиянием градиентов температуры и потенциала незамерзшей воды. В зимний температурный минимум поток соли мигрирует к поверхности; в летний сезон — поток соли вниз намного выше за счет высоких значений градиента незамерзшей воды. Суммарный поток соли в годовом цикле направлен вниз и грунты верхнего горизонта рассоляются.

Глинистые отложения глубоких горизонтов характеризуются устойчивыми значениями засоленности (0,6—0,9%), что связано с глубоководными условиями их накопления (рис.1).

Засоленность палеогеновых пород близка таковой у плейстоценовых отложений, однако по характеру засоления они отличаются большим содержанием иона SO_4^{2-} — до 90—100 мг-экв-% (рис.1, глубже 150 м). Химический состав растворов в палеогеновых глинах имеет вторичный характер и генетически связан с окислением содержащегося в них пирита.

Грунты сезонноталого слоя, как правило, незасолены, хотя в основании слоя в отдельных местах засоленность составляет до 0,5%. Обычно же отложения этого комплекса имеют в среднем до 0,05% солей и незначительное количество хлора — до 0,02%. Среди катионов в составе солей чаще преобладает Na^+ , но его содержание снижается. Таким образом, в характерных для побережья условиях избыточного увлажнения и развития процессов выщелачивания солевой состав морских пород оказывается крайне неустойчивым при протаивании. При выщелачивании оттаявших пород поровые растворы постепенно обогащаются ионами более труднорастворимых солей, в первую очередь Ca^{2+} , HCO_3^- и SO_4^{2-} .

В отложениях дельт рек на побережье содержание солей достигает 3—4%; их количество сокращается по направлению от устья, а в поперечном сечении — по мере приближения к руслу рек. В этом же направлении меняется и тип засоления пород с хлоридного на хлоридно-сульфатный и далее на гидрокарбонатный.

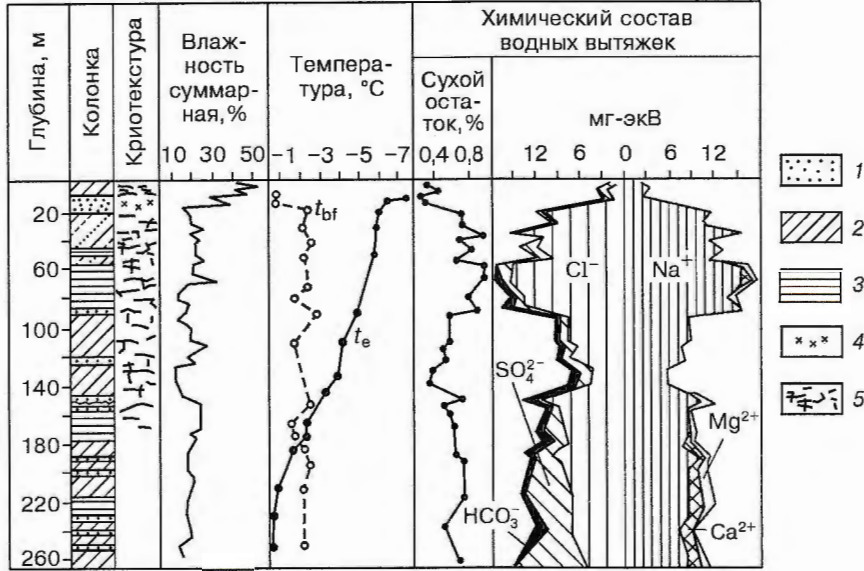


Рис. 1. Разрез засоленных отложений криогенной толщи по скв. КТС-8 на Харасавэйской газоносной структуре.

1 — песок, 2 — суглинок, 3 — глина, 4 — лед-цемент, 5 — шпирь льда, t_e — природная температура грунтов, t_{bf} — температура замерзания грунтов.

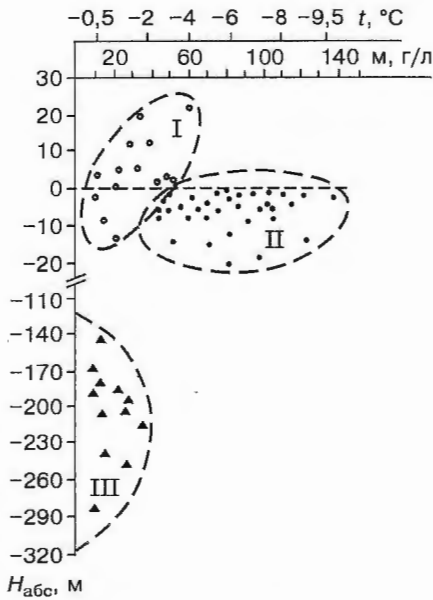


Рис. 2. Распределение минерализации криопэггов на западном побережье Ямала.

I — в мерзлых отложениях первой—третьей морских террас; II — в мерзлых отложениях морского пляжа, лавды и дельтовой части рек; III — в мерзлых и охлажденных отложениях нижнего-среднего плейстоцена и палеогена на всех геоморфологических уровнях.

С засоленными мерзлыми грунтами береговых участков генетически связаны криопэги. Пространственно они приурочены к районам распространения сильнозасоленных грунтов лавды, пляжа и дельты рек. Здесь рассолы характеризуются высокой минерализацией до 140 г/л и неглубоким залеганием, начиная с 1 м (рис.2). В разрезах морских террас криопэги встречаются гораздо реже в аномальных условиях с относительно высокими (не ниже -4°C) среднегодовыми температурами грунтов.

Особенности химического состава поровых растворов мерзлых грунтов и криопэггов обусловлены метаморфизмом морских вод, который протекает при отрицательных температурах. Как показал анализ, в криопэгах по сравнению с поровыми растворами отмечается повышенное содержания хлора и магния и пониженное — натрия и сульфат-иона. Для наглядности данные химических анализов пересчитаны в гипотетический солевой состав (табл. 3).

Основную массу солей в криопэгах и водных вытяжках составляют хлориды натрия — до 90% от общего количества солей. Близкие значения концентрации этих солей в породах и рассолах свидетельствуют о том, что в мерзлых породах хлориды натрия находятся в поровом растворе. Это относится и к хлоридам магния. Что касается сульфатов натрия, то их содержание в породах и криопэгах существенно различно.

ЗАСОЛЕНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Таблица 3. Гипотетический солевой состав засоленных мерзлых пород и криопэггов, %

Состав пород	Глубина, м	Минерализация*	NaCl	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	MgCl ₂	MgSO ₄	Mg(HCO ₃) ₂	CaSO ₄ +Ca(HCO ₃) ₂
<i>Крузенштернское месторождение, лайда</i>									
Суглинок	1,0	30	71	20	2	—	5	1	1
Суглинок	2,0	68	68	18	1	4	6	1	2
Суглинок	3,0	50	84	6	—	6	3	—	1
Супесь	4,0	66	83	8	1	4	2	1	1
Криопэг	4,2	80	77	—	—	14	2	4	3
<i>Низовье долины р. Юрибей</i>									
Песок	5,0	2	18	33	15	—	—	9	25
Суглинок	25,0	42	67	13	6	2	5	4	3
Суглинок	32,0	46	73	10	4	1	4	4	4
Песок	33,0	19	78	3	2	—	3	2	2
Криопэг	35,0	70	80	—	2	16	—	1	1

* Для пород приводится концентрация порового раствора (расчетная, ‰), для криопэггов — минерализация в г/л. Прочерк — содержание соли менее 1 ‰.

Характерно, что повышенное содержание сульфатов натрия фиксируется нередко в верхних горизонтах засоленных мерзлых грунтов, подверженных воздействию наиболее низких температур. В таком случае можно предполагать, что основная масса сульфатов натрия в этих породах присутствует в кристаллическом виде, а их отсутствие в криопэгах может свидетельствовать, что данные рассолы подвергались воздействию температур -8°C и ниже.

Таким образом, четвертичные отложения Ямала и шельфа Карского моря имеют седиментационную засоленность в результате их накопления в морском бассейне. Судя по результатам геохимических исследований, состав воды в бассейне на протяжении всего периода осадконакопления не изменялся; менялась только концентрация солей в воде.

Выполненное геохимическое исследование подтверждает справедливость выделения двух геохимических зон, совпадающих со стратиграфо-генетическими подразделениями криогенной толщи: а) верхней зоны хлоридных растворов в мерзлых и охлажденных водонепроницаемых породах и охлажденных минерализованных вод в водопроницаемых породах, охватывающей четвертичные отложения до глубины 150—200 м; б) нижней зоны сульфатных растворов в мерзлых и охлажденных водонепроницаемых породах палеогена, развитой до глубины 250 м и ниже. Внутри этих зон засоленность пород испытывает колебания, определяемые дисперсностью пород.

КОРРОЗИОННАЯ АГРЕССИВНОСТЬ

В области распространения незасоленных мерзлых грунтов защита подземных металлических конструкций от коррозии не представляет какой-либо особой проблемы. Дело в том, что эти

грунты, в соответствии с ГОСТ 9.602-89 и СНиП 2.03.11-85, по своим коррозионным свойствам относятся к низкоагрессивным. Появление в поровой влаге солей снижает удельное электрическое сопротивление (УЭС) грунтов и они переходят в разряд агрессивных. Отсутствие нормативных документов, регламентирующих определение коррозионной агрессивности (КА) мерзлых грунтов, потребовало проведения специальных исследований. Начатые в ПНИИИСе в 1992 г. они были направлены на разработку методики определения КА мерзлых грунтов и получение количественных закономерностей изменения КА мерзлых грунтов разного состава и состояния.

Для талых грунтов, в соответствии с ГОСТом, степень коррозионной агрессивности (низкая, средняя, высокая) оценивается с помощью двух обязательных методов: по величине их УЭС и по плотности катодного тока (J_k). Разработанная авторами технология измерений подробно описана [Зыков и др., 1995].

При выработке критериев отнесение грунтов к той или иной степени КА учитывалось, что оценка ее по значениям УЭС является косвенной. Критерии, используемые для талых пород, могут меняться при переходе грунтов в мерзлое состояние. Метод, использующий измерения катодного тока, является прямым, так как его величина прямо пропорциональна количеству металла, перешедшего из стали в грунт. Метод оценки КА по величине потерь металла (ΔM) также следует отнести к прямым.

Сопоставление экспериментальных результатов косвенной оценки (по УЭС) и прямой (по ΔM) позволило более обоснованно подойти к выбору значений УЭС, определяющих границы низко-, средне- и высокоагрессивных мерзлых

Таблица 4. Границы степени КА мерзлых грунтов по отношению к стали

Тип грунта	Степень КА, оцененная методами					
	УЭС, Ом·м			$J_k, A/м$		
	высокая	средняя	низкая	высокая	средняя	низкая
Песок	<20	20—50	>50	>0,2	0,05—0,2	<0,05
Супесь	<20	20—50	>50	>0,2	0,05—0,2	<0,05
Суглинки	<30	30—60	>60	>0,2	0,05—0,2	<0,05
Глина	<40	40—70	>70	>0,2	0,05—0,2	<0,05

грунтов [Коррозионная..., 1996]. Оказалось, что для мерзлых суглинков и глин они должны быть изменены по сравнению с талым (табл.4).

В процессе экспериментов было выяснено, что степень КА мерзлых грунтов, оцениваемая по плотности катодного тока, практически во всех случаях оказывается ниже, чем таковая по данным УЭС. Учитывая регламентированную ГОСТ 9.602-89 необходимость выбирать худшую из оценок КА, дальнейшее описание результатов экспериментов опирается на данные измерений УЭС.

Если параметры состава и состояния (температуры) грунтов рассматривать как координатные оси некоего пространства, внутри него могут быть выделены области, в пределах которых грунты будут характеризоваться единой степенью КА: высокой, средней или низкой. Границами этих областей будут служить изолинии (точнее изоповерхности) равных значений УЭС, являющихся граничными (см. табл. 4). Таким образом, для определения границ оказывается необходимым проанализировать изменение удельных электрических сопротивлений (ρ) по каждой из координатных осей, а затем проследить, как могут взаимозависимо изменяться параметры состава и температура таким образом, чтобы граничные значения ρ оставались неизменными.

Для получения количественных зависимостей измерения проводились на сериях. В каждой серии изменялся один из параметров (например, степень засоленности) при фиксации всех остальных. Влияние температуры оценивалось путем проведения экспериментов в широком диапазоне от 0 до $-20^{\circ}C$. Все образцы готовились по специально разработанной технологии, обеспечивающей создание в них массивной криогенной текстуры [Рекомендации..., 1984]. Влияние каждого из параметров рассмотрено ниже по отдельности.

Влияние температуры. Охлаждение грунта приводит к тому, что при некоторой температуре (температуре начала замерзания t_{bf}) часть порового раствора переходит в лед, как правило пресный. Увеличение объема льда, являющегося непроводящим компонентом, и сужение сечения или перекрытие пор приводит к повышению УЭС

породы. Таким образом чем ниже температура, тем выше УЭС породы во всем диапазоне, начиная с t_{bf} и тем в меньшей степени порода проявляет свои коррозионные свойства.

Коррозионная агрессивность сезонноталых грунтов может и должна оцениваться в соответствии с ГОСТ 9.602-89. В пределах мерзлой толщи условию $t > t_{bf}$ отвечают только охлажденные грунты и криопэги, концентрация солей в которых достаточно высока. Их удельные сопро-

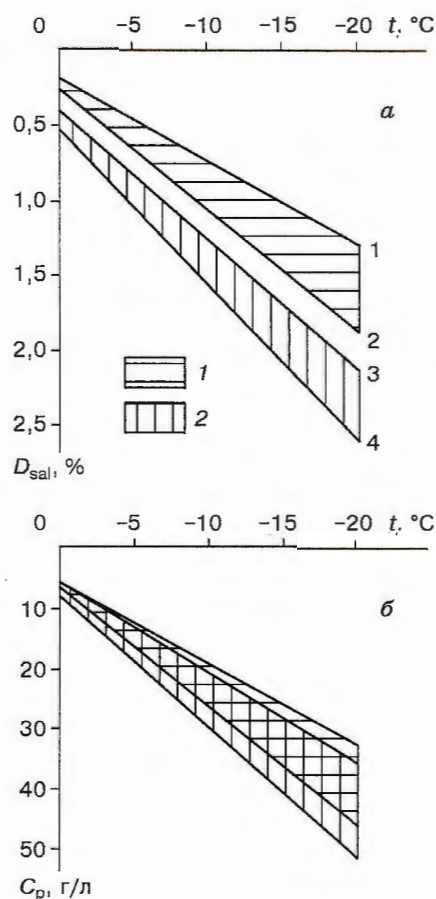


Рис. 3. Области средней степени коррозионной агрессивности для глины различной влажности в координатах.

a — температура—засоленность, *b* — температура—концентрация порового раствора; $W_{tot}, \%$ 1 — 39, 2 — 51.

тивления лежат в пределах 1—15 Ом·м, т. е. все они могут быть отнесены к высокоагрессивным. В остальных случаях влияние температуры на ρ должно рассматриваться в тесной связи с концентрацией порового раствора. Если учесть, что C_p определяется засоленностью и влажностью, необходимо внимательно рассмотреть влияние этих факторов на значение ρ , а соответственно и КА.

Влияние влажности. Наибольшей коррозионной агрессивностью (наименьшими значениями ρ) обладают грунты, влажность которых соответствует полному влагонасыщению и лежит в пределах между нижним и верхним пределами пластичности. В общем случае увеличение влажности вызывает уменьшение ρ (рис. 3, а), которое при $W_{\text{тоф}}$, равном пределу текучести, сменяется его ростом. Причины этого следующие.

При влажности выше предела текучести, как правило, образуются шпиры льда, размеры и общий объем которых связаны с концентрацией порового раствора и температурой. Появление льда и тем более замкнутых систем ледяных шпиров вызывает возрастание удельного электрического сопротивления грунта. При влажности менее предела раскатывания в грунте появляется воздух, повышающий общее электрическое сопротивление грунта. Если рассматривать влияние влажности внутри границ пластичности, можно сказать, что её увеличение при неизменной засоленности приводит к „разбавлению“ раствора и тем самым увеличивает УЭС грунта. Таким образом, для того, чтобы при фиксированной температуре увеличение влажности не внесло изменений в УЭС и КА необходимо, чтобы засоленность была соответствующим образом увеличена. При фиксированной засоленности постоянство ρ и КА достигается повышением температуры. Оба эти случая хорошо иллюстрируются рис. 3.

Влияние литологического состава. В качестве параметра, определяющего литологический состав в количественном выражении, нами выбрано число пластичности I_p во многом синтезирующее такие характеристики грунта, как гранулометрический и минеральный состав, химический состав обменных катионов, характерную пористость и распределение пор по радиусам. Наиболее важный эффект, оказывающий непосредственное влияние на изменение УЭС различных грунтов и их коррозионную агрессивность, заключается в том, что влажность грунтов, соответствующая полному влагонасыщению, напрямую связана с числом пластичности. Они тем выше, чем выше I_p . В результате при постоянном значении степени засоленности D_{sal} концентрация порового раствора C_p в водона-

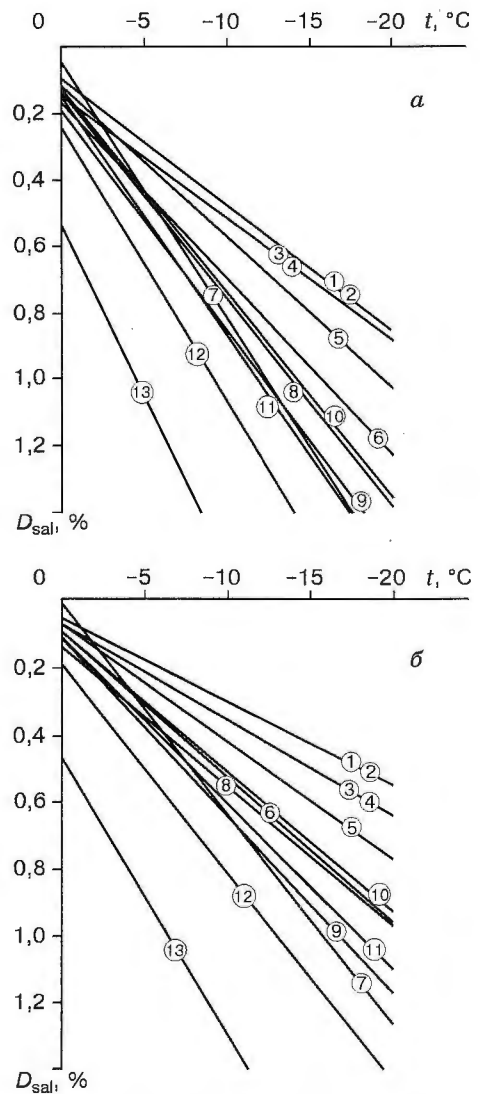


Рис. 4. Границы, разделяющие грунты по степени их коррозионной агрессивности в координатах температура—засоленность.

а — между высокой и средней, б — между средней и низкой. Индексы границ соответствуют номерам в табл. 5.

сыщенных грунтах будет монотонно уменьшаться от песков к глинам. В соответствии с этим уменьшается и „агрессивность“ грунтов (рис. 4). Ниже, в табл. 5 приведена краткая характеристика ряда грунтов, использовавшихся в экспериментах.

Влияние засоленности. На величину УЭС грунтов влияет химический состав растворенных в поровой влаге солей, что обусловлено различной подвижностью ионов, и их содержание. Именно эти два фактора определяют проводимость порового раствора — основного электро-

Таблица 5. Сводная таблица значений D_{sal} и (C_p), разделяющих грунты по степени коррозионной агрессивности (Н—низкая, С—средняя, В—высокая) при фиксированных температурах для различных грунтов по результатам экспериментов

№	Тип грунта	$t, ^\circ\text{C}$ $W_{tot}, \%$	-1°C		-5°C		-10°C	
			Н-С	С-В	Н-С	С-В	Н-С	С-В
1	Песок пылеватый	22	0,07(3,1)	0,15(6,8)	0,175(7,95)	0,32(14,5)	0,28(12,7)	0,5(22,7)
2	Песок пылеватый	22	0,07(3,1)	0,14(6,3)	0,18(8,2)	0,33(15,0)	0,32(14,5)	0,5(22,7)
3	Супесь $I_p = 3,2$	22	0,095(4,3)	0,17(7,7)	0,185(8,4)	0,32(14,5)	0,28(12,7)	0,49(22,3)
4		25	0,105(4,2)	0,18(7,2)	0,19(7,6)	0,33(13,2)	0,3(12,0)	0,52(20,8)
5	Суглинок $I_p = 11,2$	27	0,105(3,9)	0,145(5,3)	0,23(8,5)	0,33(2,2)	0,38(14,0)	0,55(20,3)
6		37	0,14(3,8)	0,2(5,4)	0,32(8,6)	0,43(11,6)	0,48(12,9)	0,71(19,2)
7	Суглинок $I_p = 12,2$	37	0,04(1,08)	0,11(3,0)	0,28(7,6)	0,4(10,8)	0,6(16,2)	0,82(22,2)
8	Глина $I_p = 17,8$	39	0,14(3,6)	0,22(5,6)	0,25(6,4)	0,38(9,7)	0,5(12,5)	0,74(19,0)
9		50	0,165(3,3)	0,25(5,0)	0,34(6,8)	0,52(10,4)	0,61(12,2)	0,85(17,0)
10	Глина $I_p = 21$	39	0,13(3,3)	0,19(4,9)	0,295(7,6)	0,44(11,3)	0,51(13,0)	0,75(19,2)
11		51	0,15(2,9)	0,23(4,5)	0,35(6,9)	0,51(10,0)	0,6(11,8)	0,88(17,2)
12	Глина $I_p = 20,2$	39	0,24(6,1)	0,32(5,0)	0,48(12,3)	0,68(17,4)	0,77(19,7)	1,06(27,2)
13		51	0,4(8,8)	0,55(10,7)	0,7(13,7)	0,89(17,4)	1,26(24,7)	1,55(30,4)

проводящего компонента грунта. Все описываемые эксперименты выполнялись с использованием хлористого натрия. Содержание соли в грунте оценивается степенью засоленности D_{sal} . Этот параметр является характеристикой грунта, но не определяет содержания соли в поровом растворе, т.е. его концентрацию C_p . Вместе с тем известно, что именно с последней напрямую связано ρ раствора, а соответственно и грунта в целом. Таким образом, для оценки УЭС грунта кроме его засоленности необходимо знать и влажность, которые вместе позволяют найти C_p .

Что касается УЭС грунта и его коррозионной агрессивности, то можно констатировать: увеличение засоленности однозначно вызывает снижение первого и соответственно рост КА (см. рис. 3, а). Однако данная связь имеет довольно сложный характер. Значительная роль остается здесь за влажностью и литологическим составом (см. рис. 3 и 4). На последнем хорошо видно, что увеличение дисперсности грунта (или числа пластичности) приводит к перемещению границ высокой-средней и средней-низкой КА в сторону повышения D_{sal} и повышения t . В случае же использования в качестве второй координаты вместо D_{sal} значения C_p указанные границы сближаются до такой степени, что могут быть осреднены без внесения значимой погрешности (рис. 5, а). Также сближаются и границы, определенные для одного и того же грунта, но имеющего различную влажность (см. рис. 3, б).

Из отмеченного следует, что можно пользоваться всего двумя характеристиками — концентрацией порового раствора и температурой. В силу описанных закономерностей и физически объяснимых связей между всеми параметрами,

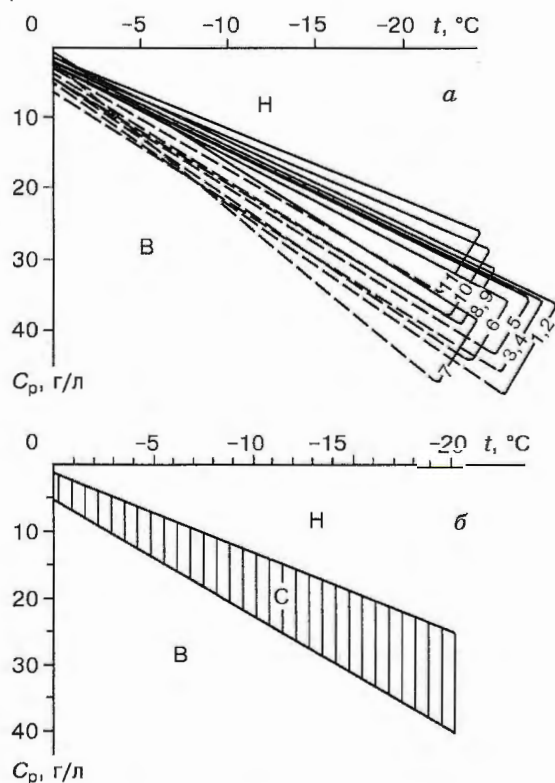


Рис. 5. Границы, разделяющие грунты по степени их коррозионной агрессивности в координатах температура—концентрация порового раствора:

а — экспериментальные данные; индексы соответствуют номерам в табл. 5; б — сводная диаграмма.

Таблица 6. Концентрация порового раствора C_p , соответствующая различным степеням КА грунтов при фиксированной температуре

Степень КА	Концентрация порового раствора C_p (г/л) при температуре t , °C						
	-2 °C	-3 °C	-4 °C	-5 °C	-6 °C	-7 °C	-8 °C
Низкая	<4	<5	<6,3	<7,5	<8,7	<10	<11
Средняя	4—9	5—10,7	6,3—12,5	7,5—14,2	8,7—16	10—17,7	11—19,5
Высокая	>9	>10,7	>12,5	>14,2	>16	>17,7	>19,5

эти две характеристики практически полностью определяют УЭС, а соответственно и КА грунтов. В результате удаётся построить единственный график, позволяющий определять степень КА, если известны C_p и t грунта (см. рис. 5, б).

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ АГРЕССИВНОСТИ ГРУНТОВ

Как показано выше, важнейшими параметрами состава и состояния грунтов, определяющими их коррозионную агрессивность, являются концентрация порового раствора и температура. Остальные факторы (генезис, тип грунта, состояние, влажность и пр.) оказываются опосредованно учтенными. Опираясь на этот основной вывод, оценим КА грунтов прибрежных участков Карского моря.

Согласно систематизации, приведенной в начале статьи, среди прибрежных отложений выделены донные грунты, грунты переходной от моря к суше зоны и грунты морских террас. Оценка их коррозионной агрессивности осуществляется с помощью графика (см. рис. 5, б).

В донных грунтах мелководья (изобата до 3 м) концентрация порового раствора как охлажденных, так и мерзлых грунтов достаточно высокая, выше 20 г/л. Учитывая характерную для таких условий температуру (от -5 до -2 °C), степень коррозионной агрессивности определяется как „высокая“. На глубоководных участках акватории (глубже изобаты 3 м) концентрация порового раствора ниже, чем в грунтах мелководья. Наименьшее значение C_p равно 12 г/л. При этом обнаруживается существенная разница в значениях C_p для охлажденных и мерзлых грунтов (~ в 2 раза). Так как температура грунтов глубоководных участков не ниже -2 °C, то все грунты этой части акватории имеют высокую степень КА. Наконец, донные грунты под льдом у берега, несмотря на значительную изменчивость значений концентрации порового раствора, также относятся к высокоагрессивным благодаря большим значениям C_p ($33 < C_p < 73$ г/л).

Следующие две группы: грунты переходной от моря к суше зоны и грунты всех морских

террас характеризуются изменчивостью и пестротой содержания солей. Значительным колебаниям также подвержены и среднегодовые температуры; диапазон их изменения находится в пределах от -2,5 до -8 °C. При таких температурно-солевых условиях названные категории грунта могут иметь весь спектр степеней коррозионной агрессивности от „низкой“ до „высокой“. Для ее оценки произведены расчеты значений C_p , отвечающих границам степеней КА, при различных температурах. Их результаты сведены в табл. 6. Используя эту таблицу, можно отметить, что грунты морских террас и переходной зоны в основном попадают в категорию высокоагрессивных. Лишь небольшая их часть, относящаяся к пескам морских террас, которые имеют, как правило, невысокие значения C_p , могут характеризоваться средней степенью коррозионной агрессивности. Грунты с низкой коррозионной агрессивностью встречаются редко, на локальных участках, приуроченных к высоким отметкам морских террас.

Работа выполнена при содействии РАО Газпром и РФФИ (проекты 97-05-64909 и 97-05-64961).

Литература

- Дубиков Г.И., Бадю Ю.Б., Иванова Н.В. Состав и строение криогенной толщи на западном Ямале // Лабораторные и полевые исследования мерзлых грунтов и льдов. М., 1986, с. 27—35.
- Зыков Ю.Д., Красовский А.Г., Мозганова Е.Я. Коррозионная агрессивность засоленных мерзлых грунтов по отношению к стали (на примере грунтов Ямала) // Геофизические исследования криолитозоны. Науч. тр. Вып.1. М., 1995, с. 153—165.
- Коррозионная агрессивность грунтов // Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т.П. Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения. Тюмень; Ин-т проблем освоения Севера СО РАН, 1996, с. 144—151.
- Рекомендации по лабораторному изучению строения мерзлых грунтов. ПНИИИС Госстроя СССР. Стройиздат, М., 1984, 34 с.

Поступила в редакцию
10 июня 1998 г.