КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 3, с. 40–51 **http://www.izdatgeo.ru**

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(40-51)

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КРИОГЕННОГО СТРОЕНИЯ МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

А.Н. Хименков[1], В.Е. Гагарин[2], А.В. Кошурников[2], Ю.Б. Шешин[3], В.В. Скосарь[2]

[1]*Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, лаборатория геокриологии, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия; a_khimenkov@mail.ru*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; msu-geophysics@mail.ru*
[3]*ООО "ГЕОТЕХНОЛОГИЯ"-2001, 142400, Московская обл., Ногинск, ул. Корякин Луг, 6, Россия*

Приведены результаты лабораторных исследований процессов, сопровождающих промерзание морских отложений. Проанализированы особенности формирования криогенного строения и перераспределения поровой воды в породах различного состава в широком диапазоне значений начальных засоленности и влажности. Выявлена специфика промерзания морских осадков в зоне контакта припайного льда с морским дном.

Криогенное строение, льдообразование, кристаллизационная дифференциация, засоленность, влажность

LABORATORY MODELING OF FORMATION OF THE CRYOGENIC STRUCTURE OF MARINE SEDIMENTS

A.N. Khimenkov[1], V.E. Gagarin[2], A.V. Koshurnikov[2], J.B. Sheshin[3], V.V. Skosar[2]

[1] *Sergeev Institute of Geoecology, RAS, Laboratory of Geocryology, 13, build. 2, Ulansky per., Moscow, 101000, Russia; a_khimenkov@mail.ru*
[2] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; msu-geophysics@mail.ru*
[3] *"GEOTECHNOLOGY"-2001 Ltd., 6, Koryakin Lug str., Noginsk, Moscow region, 142400, Russia*

The article is devoted to peculiarities of formation of the cryogenic structure of modern coastal sediments using laboratory simulation. The authors have conducted comparative analysis of the results of laboratory and field studies and have shown how the cryogenic structure of coastal sediments depends upon the composition, salinity and moisture. They also have analyzed redistribution of soil moisture in different types of soils and the features of ice formation in the zone of contact between fast ice and sea bottom.

Cryogenic structure, ice formation, crystallization differentiation, salinity, water content

ВВЕДЕНИЕ

История изучения особенностей морского криолитогенеза насчитывает не одно десятилетие. Этой теме посвящены работы В.Н. Сакса [*1953*], П.А. Шумского [*1955*], Е.М. Катасонова [*1962*], Н.Ф. Григорьева [*1966*], В.А. Усова [*1967*], Е.Н. Молочушкина [*1973*], Ф.Э. Арэ [*1976*], И.Д. Данилова [*1978*], Я.В. Неизвестнова [*1983*], Б.А. Савельева [*1989*], Л.А. Жигарева [*1997*], Т.Е. Остеркампа [*Osterkamp, 2001*] и др. Тем не менее данная тема еще далека от завершения. Разнообразие гранулометрического и минералогического составов морских осадков, большой диапазон значений засоленности и влажности, различие условий промерзания пород на суше и мелководье затрудняют выявление общих закономерностей формирования их криогенного строения в полевых условиях. Моделирование криогенных процессов в лабораторных условиях позволяет преодолеть эти трудности путем подбора характеристик используемых грунтовых образцов и условий промораживания.

В настоящей работе представлены материалы многолетних исследований, проведенных авторами в мерзлотных лабораториях ПНИИИС и кафедры геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [*Хименков, 1985; Хименков, Минаев, 1990; Хименков, Шешин, 1992; Хименков, Брушков, 2003; Хименков и др., 2016*].

В ходе лабораторных экспериментов моделировались типичные условия льдообразования в морских отложениях.

© А.Н. Хименков, В.Е. Гагарин, А.В. Кошурников, Ю.Б. Шешин, В.В. Скосарь, 2018

1. Формирование льда в воде при большом количестве примесей и в водонасыщенных илах с весовой влажностью, в 2–3 раза превышающей предел текучести.

2. Льдообразование в зоне контакта припайного льда и морского дна.

3. Льдообразование в толще морских осадков различного состава, засоленности и начальной влажности при одностороннем промерзании сверху.

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЬДА В МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ РАСТВОРАХ И СУСПЕНЗИЯХ

Первичное промерзание морских осадков начинается в субаквальных условиях. Поэтому в первую очередь следует остановиться на особенностях льдообразования в морской воде. Формирующиеся здесь ледяные кристаллы имеют пластинчатое строение. Растворенные соли в ходе роста распределяются между элементарными пластинками внутри кристаллов и между ними (рис. 1). Данное строение кристаллов засоленного льда и условия его формирования описаны П.А. Шумским в 1955 г.: “В соленых льдах рассол образует прослойки в базисных плоскостях кристаллов, разделяющих кристаллы на ряд пластинок. Чем быстрее происходила кристаллизация и чем больше концентрация солей, тем толще прослойки рассола (до нескольких миллиметров при близкой к нулю температуре) и тем тоньше относительно разделяемые ими элементарные пластинки льда” [*Шумский, 1955, с. 102*].

Придонные воды отличаются большим содержанием взвешенных частиц и часто представляют собой суспензии. Были проведены опыты по промораживанию дистиллированной воды с постепенным увеличением концентрации примесей (рис. 2, *а*) [*Хименков, Брушков, 2003*]. В качестве примеси использовалась каолиновая глина. В опытах при начальном содержании минеральных примесей в воде до 3.2 % во льду начинает формироваться полосчатость за счет цепочек минеральных включений (см. рис. 2, *б*). При увеличении содержания минеральных примесей в воде до 13.5 % хорошо видны параллельные цепочки грунтовых включений (см. рис. 2, *в*). Рисунок, образованный минеральными включениями, похож на структуру кристаллов морских льдов (см. рис. 1). При дальнейшем увеличении примесей до 28.3 % отдельные грунтовые включения сливаются в темные минеральные слои, разделенные полосками прозрачного льда (см. рис. 2, *г*). Плоскости грунтовых слоев ориентированы параллельно базисным плоскостям кристаллов льда (рис. 3). По мере увеличения содержания примесей происходит утолщение как грунтовых слоев, так и прослоев льда от долей миллиметра до 2–3 мм. Каждая зона чередующихся параллельных грунтовых и ледяных полос ведет себя как единый кристалл. В них не наблюдается внутренних границ, а в поляризованном свете эти зоны имеют одну интерференционную окраску (рис. 4, *а*). На фотографии строения образца мерзлых донных илов Охотского моря, любезно предоставленной В.В. Роговым, хорошо видно, что вытянутые включения солей, минеральных примесей и льда формируют аналогичные серии параллельных слоев (см. рис. 4, *б*). Таким образом, при промерзании рассмотренных сред (морская вода, пресная вода с различным содержанием глинистых частиц и морской ил) происходят сходные процессы перераспределения примесей в растущем льду. При этом формируются слоистые кристаллы, в которых параллельно базисным плоскостям чередуются прослои чистого льда и примесей.

Рис. 1. Строение кристаллов морского льда [*Бородачев и др., 1994*].

ФОРМИРОВАНИЕ КРИОГЕННОГО СТРОЕНИЯ ЗОНЫ КОНТАКТА ПРИПАЙНЫХ ЛЬДОВ С ДОННЫМИ ОСАДКАМИ

Мелководная прибрежная часть моря, где однолетний лед смерзается с дном, несмотря на незначительные размеры, в геокриологическом отношении играет важную роль. Именно здесь начинает действовать внешний по отношению к толще морских осадков фактор – процесс зимнего промерзания [*Романовский, 1993; Osterkamp, 2001*]. Между растущим слоем припайного льда и дном, за счет вымораживания растворенных солей, в локальных понижениях с замедленным водообменом формируется слой воды с повышенной минерализацией. Минерализация увеличивается в 1.5–2 раза по сравнению с начальным значением и

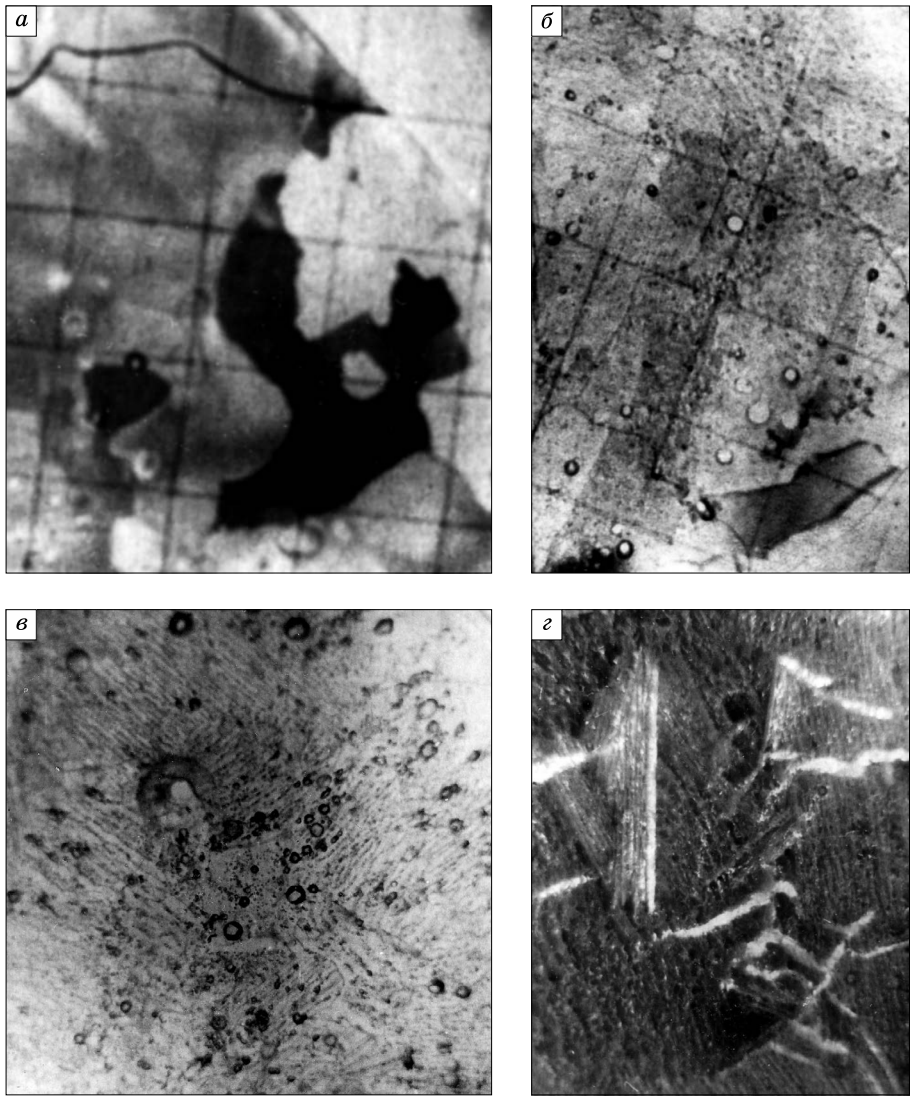

Рис. 2. Особенности распределения грунтовых частиц в кристаллах льда при разном содержании грунтовых примесей в воде:

а – дистиллированная вода (снимок в поляризованном свете); *б* – 3.2 %; *в* – 13.5 %; *г* – 28.3 %. Фото А.Н. Хименкова.

достигает 50–80 г/л, при этом температура воды составляет –4...–5 °С [*Соловьев, 1983; Григорьев, 1987; Богородский и др., 2007*]. Данный процесс приводит к увеличению содержания солей в верхнем слое осадков. Н.Ф. Григорьев [*1966*], изучавший припайные льды в прибрежной части о. Большой Ляховский, установил следующее распределение минерализации поровых растворов в толще морских осадков. Непосредственно под ледяным покровом толщиной 1.5 м, в верхнем полуметровом слое, минерализация поровых растворов составила 43 г/л, на глубине 3 м – 20 г/л, на глубине 4.5 м – 5 г/л. Данное распределение минерализации поровых растворов приводит к тому, что в верхнем, наиболее засоленном слое осадков при отрицательных температурах льдовыделение отсутствует [*Григорьев, 1966*]. Ниже формируются криогенные текстуры. При полном смерзании припайного льда с дном подстилающие его осадки промерзают, но и в этом случае льдовыделение в них незначительное. Криогенное строение этого слоя представляет собой разнонаправленные, часто субвертикальные, очень тонкие (от долей миллиметра до 1 мм) шлиры льда длиной 5–7 см [*Жигарев, Плахт, 1977*]. По физико-механическим свойствам этот слой мерзлого грунта практически не отличается от талых осадков. Между шлирами льда грунт не был сцементирован льдом при температуре –3 °С. Грунтовые частицы легко сдвигаются при малейшем нажатии [*Плахт, 1977*].

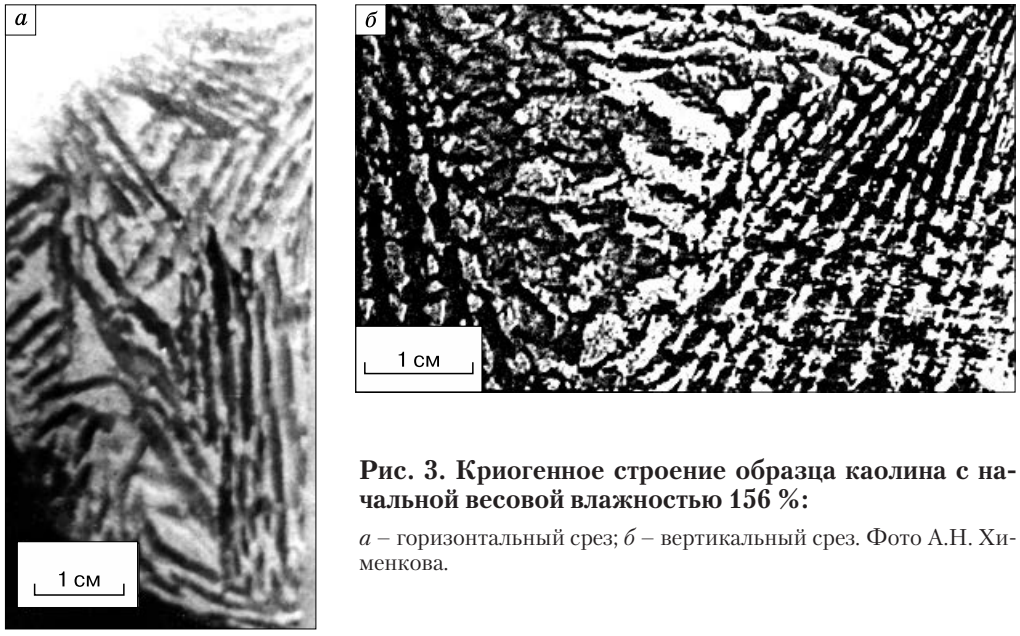

Рис. 3. Криогенное строение образца каолина с начальной весовой влажностью 156 %:

а – горизонтальный срез; *б* – вертикальный срез. Фото А.Н. Хименкова.

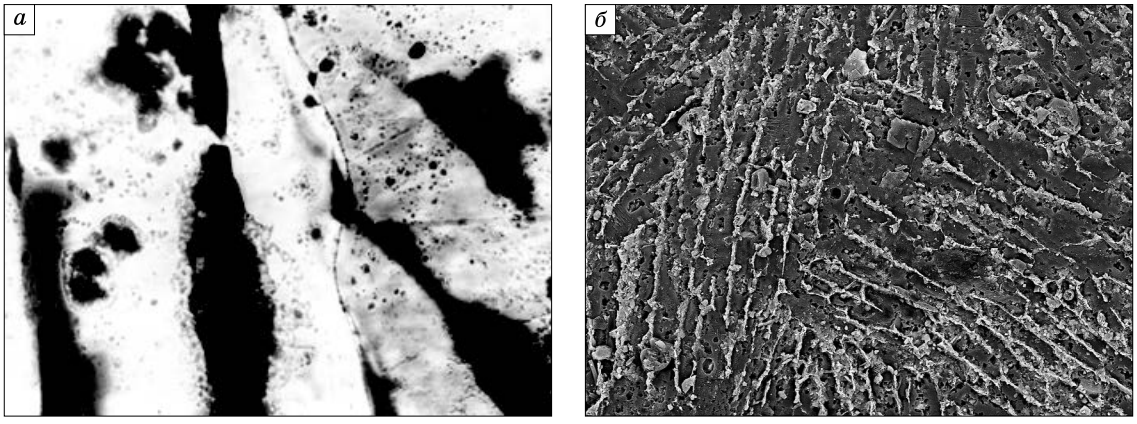

Рис. 4. Пересечение зон различно ориентированных грунтовых включений:

а – суспензия каолина в поляризованном свете (увел. 45). Фото А.Н. Хименкова; *б* – суспензия морского ила (увел. 600). Фото В.В. Рогова.

В мерзлотной лаборатории кафедры геокриологии МГУ были проведены эксперименты по моделированию смерзания припайного морского льда с осадками [*Хименков и др., 2016*]. Одностороннее промораживание проводилось через слой соленой воды, перекрывающий грунтовые образцы, приготовленные из легкого пылеватого суглинка, отобранного на побережье моря Лаптевых. Исходная влажность образцов грунта составляла около 35 %, начальная засоленность 0.7 %, толщина слоя воды 2 см при минерализации 33 ‰. Промораживание осуществлялось сверху при температуре –9 °С. В результате исследований в образцах было выделено два типа криогенного строения. Первый формировался в условиях, когда слой воды не промерз до конца. Между слоем льда и грунтом оставался слой минерализованной воды толщиной от нескольких миллиметров до 1 см, в зависимости от продолжительности эксперимента (рис. 5, *а*, зона 2). В этом случае в верхнем 2-сантиметровом слое грунта вследствие значительной минерализации поровых вод льдообразования не наблюдалось (см. рис. 5, *а*, зона 3). Ниже формировалась типичная для морских отложений криотекстура из тонких (около 1 мм) косонаклонных шлиров, пересечение которых формирует сетчатую криогенную текстуру (см. рис. 5, *а*, зона 4). После полного промерзания слоя воды в верхней

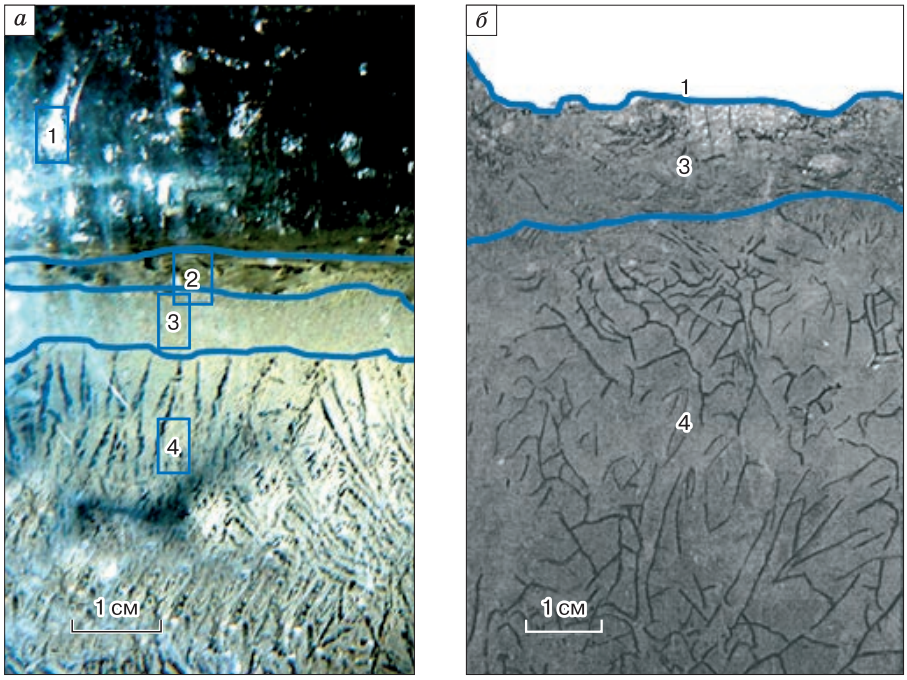

Рис. 5. Криогенное строение грунтов на контакте с припайным льдом:

а – отсутствие смерзания льда с грунтом; *б* – смерзание льда с грунтом; 1 – лед, 2 – вода, 3 – зона слабого льдовыделения, 4 – зона формирования криогенных текстур. Грунт – легкий пылеватый суглинок. Фото В.Е. Гагарина.

части (0–1.2 см) грунтового образца (см. рис. 5, *б*, зона 3) формировалась тонкошлировая криогенная текстура с редкими мелкими хаотично ориентированными шлирами, грунт находился в пластично-мерзлом состоянии. Ниже (1.2–4.2 см) формировалась сетчатая криогенная текстура (см. рис. 5, *б*, зона 4) с преобладанием вертикально ориентированных шлиров толщиной до 1 мм и длиной до 2 см.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КРИОГЕННОГО СТРОЕНИЯ ГРУНТОВ МОРСКОГО ГЕНЕЗИСА

Для лабораторных исследований использовались следующие грунты: среднеплейстоценовая морская глина монтмориллонитового состава (п-ов Ямал); современный ил гидрослюдистого состава, со дна бухты Диксон; суглинок морского генезиса гидрослюдистого состава, отобранный на побережье Карского моря, в районе пос. Амдерма; покровный суглинок преимущественно гидрослюдистого состава, из центрального района Ямала; бентонит – мономинеральная глина монтмориллонитового состава; каолиновая глина. Выбранные для проведения исследований грунты типичны для пород морского генезиса, распространенных на арктическом побережье. Их особенностью является гидрослюдистый и монтмориллонитовый состав глинистой фракции. В данную группу грунтов с характерным для морских условий осадконакопления минеральным составом была включена каолиновая глина, типичная для континентальных условий. Сравнение процессов формирования криогенного строения для разных типов грунтов позволяет более точно выявить характерные особенности льдообразования, связанные с их генезисом. Существует давняя традиция лабораторного изучения особенностей процессов льдообразования в глинистых грунтах путем сравнения криогенного строения мерзлых образцов каолинитового, монтмориллонитового и гидрослюдистого составов [*Нерсесова, 1961; Жесткова, 1982*].

При проведении экспериментов по определению влияния минерального состава, начальной влажности и засоленности грунтов на их криогенное строение использовались три вида грунтов: каолин, монтмориллонитовая глина и современный ил гидрослюдистого состава. Минерализация их поровых растворов равна 1 г/л в каолине, 6.9 г/л в монтмориллонитовой глине и 35 г/л в современном иле. Начальная влажность грунтов менялась от значений, соответствующих нижнему пределу пластичности, до значений, в 2–3 раза превышающих предел текучести (см. таблицу).

Для каждого вида грунта количество образцов различной засоленности составляло от 9 до 13. Засоленность находилась в диапазоне 0–2 %. Значения влажности подбирались близкими к верхне-

му пределу пластичности. Образцы высотой 14 см и шириной 7 см подвергались одностороннему промораживанию при температурах от –4 до –6 °С. Необходимая влажность в образцах достигалась путем предварительного уплотнения. Выбранные состав грунтов, начальные влажности, значения минерализации порового раствора, температур и режимов промораживания позволили смоделировать широкий диапазон реальных условий, обусловливающих криогенное строение морских отложений арктического побережья.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И НАЧАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ НА ИХ КРИОГЕННОЕ СТРОЕНИЕ

В образцах каолина при значениях начальной влажности больше предела раскатывания и меньше предела текучести грунты содержат в основном рыхлосвязанную воду. Ее миграция к фронту промерзания имеет большое значение для формирования криогенных текстур. В результате формируются горизонтально-слоистые криогенные текстуры (рис. 6, I, *а*). В нижней части образцов возникает зона иссушения с массивной криогенной текстурой. В верхней части образцов льдистость достигает 50–60 %.

При увеличении начальной влажности до значений, близких к пределу текучести, наряду с рыхлосвязанной заметную роль начинает играть свободная вода, что приводит к изменению типа льдообразования. Ведущим процессом, как и при меньшей влажности, является миграция связанной воды к фронту промерзания. Одновременно, хотя и в меньших масштабах, за счет наличия свободной воды происходит рост пластинчатых кристаллов льда. Они прорастают в глубь грунта в виде ледяных субвертикальных и наклонных шлиров, опережая продвижение общего фронта промерзания. Теплопроводность льда гораздо больше, чем у влажного грунта, поэтому субвертикальный ледяной шлир, проросший в область талого грунта, становится локальным центром охлаждения и льдообразования [*Шумский, 1955*]. Это искажает общий миграционный поток, направленный в сторону более низких температур. Часть миграционного потока отклоняется к поверхности кристалла льда, достраивая его [*Комаров, 2003*]. Сочетание процессов роста субвертикально ориентированных шлиров льда (за счет наличия свободной воды) и горизонтальных шлиров (за счет миграции связанной воды к фронту промерзания) обусловливает формирование сетчатых криогенных текстур в каолине [*Хименков, Брушков, 2003*].

При увеличении начальной влажности до значений, в 3 раза превышающих предел текучести, механизм льдообразования и тип криогенного строения меняются (см. рис. 6, I, *в*). В верхней части образцов, где льдистость достигает 70 %, льдообразование сходно с ростом кристаллов в суспензии или растворе. Грунтовые частицы перераспределяются согласно внутренней структуре сформировавшихся кристаллов (см. рис. 3). Грунтовые включения в виде плоских пластин толщиной до 1–2 мм чередуются с прослоями льда. В нижней части образцов формируются сетчатые криотекстуры, особенности формирования которых рассмотрены выше, с преобладанием вертикальных шлиров, льдистость здесь составляет 20–30 %. Общее перераспределение поровой воды в образце при промерзании незначительно.

Значения начальных весовых влажностей (W_0) и температур промораживания (T_f) пород

Порода	W_0, %	T_f, °С
Каолин	165	–4
	106	–6
	50	–6
	40	–6
Среднеплейстоценовая морская глина	137	–6
	122	–4
	52	–6
	43	–6
Современные морские илы	128	–6
	55	–6
	39	–6
	30	–6

Криогенное строение мерзлых образцов современных илов гидрослюдистого состава практически однотипно, в них преобладают вертикальные и субвертикальные шлиры (см. рис. 6, II) [*Хименков, Брушков, 2003*]. Толщина шлиров зависит от начальной влажности и колеблется от долей миллиметра (при минимальных влажностях) до 1–2 мм, длина шлиров изменяется от 2–3 до 12–13 см, отдельные шлиры прорастают сквозь весь образец. Льдистость пропорциональна начальной влажности и меняется от 2–5 % (см. рис. 6, II, *а*) до 60–70 % (см. рис. 6, II, *в*). Перераспределения воды в вертикальном направлении при промерзании не наблюдалось (за исключением образцов с влажностью, в 2–3 раза превышающей предел текучести). В этих случаях происходит интенсивное гравитационное расслоение суспензии, с осаждением минеральных частиц и выделением объема свободной воды. При промерзании формируется слой загрязненного льда с большим количеством минеральных примесей (верхняя часть образца, см. рис. 6, II, *г*). Исследования показали, что криогенное строение образцов современных илов аналогично криотекстурам мерзлых морских осадков, встречающихся в природе [*Усов, 1967; Катасонов, Пудов, 1972*].

В образцах среднеплейстоценовой морской глины монтмориллонитового состава перераспре-

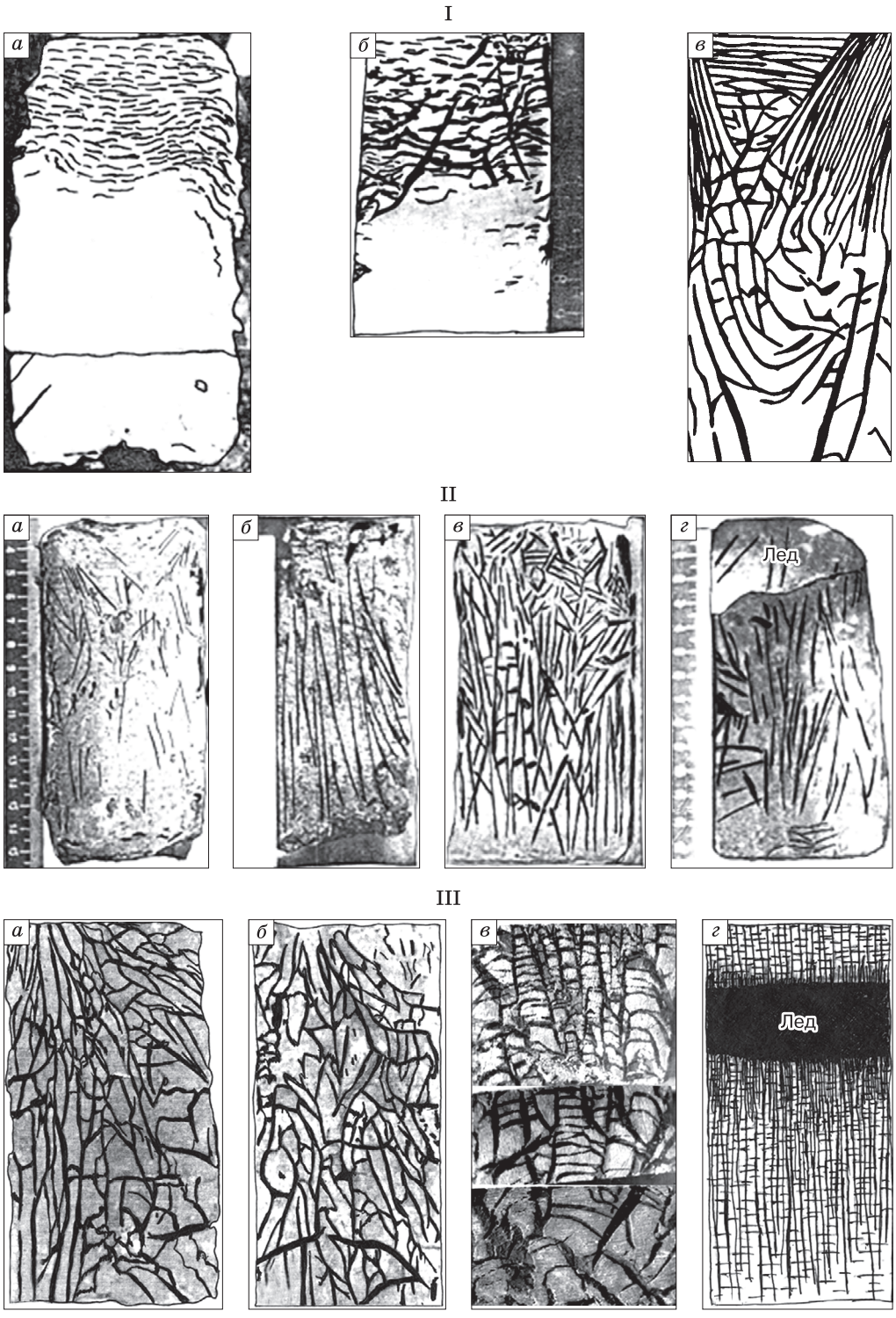

Рис. 6. Криогенное строение грунта различного вещественного состава при разной начальной весовой влажности:

I – каолин (W_0, %: *а* – 50, *б* – 106, *в* – 165 %); II – современные илы гидрослюдистого состава (W_0, %: *а* – 30, *б* – 39, *в* – 55, *г* – 128); III – среднеплейстоценовые морские глины монтмориллонитового состава (W_0, %: *а* – 43, *б* – 52, *в* – 122, *г* – 137). Фото А.Н. Хименкова.

деления влажности в процессе промерзания не наблюдалось. При всех начальных влажностях формировались сетчатые криогенные текстуры (см. рис. 6, III). Размер грунтовых ячеек и ледяных шлиров обратно пропорционален начальной влажности. При минимальной начальной влажности размер грунтовых ячеек составляет 10–15 мм, а размер шлиров льда – 2–3 мм. При достижении максимальной влажности размер грунтовых ячеек уменьшается до 2–3 мм, а толщина шлиров льда до долей миллиметра. При значениях влажности ниже верхнего предела пластичности перераспределение воды в процессе промерзания не отмечалось. Только при начальных влажностях, в 2–3 раза превышающих предел текучести, в процессе промерзания за счет гравитационного разделения воды и грунтовых частиц в верхней части образцов выделялся слой свободной воды (см. рис. 6, III, *г*). При их промерзании формировались слои льда с большим содержанием примесей.

ВЛИЯНИЕ ЗАСОЛЕННОСТИ ГРУНТОВ НА ИХ КРИОГЕННОЕ СТРОЕНИЕ

В незасоленных образцах каолина (начальная влажность во всех образцах каолина 50–60 %) формируются слоистые криогенные текстуры (см. рис. 6, I, *а*). Начиная с засоленности 0.05 %, при общем преобладании слоистых текстур появляются отдельные вертикальные шлиры (рис. 7, *а*). При увеличении засоленности с 0.05 до 0.25 % формируются сетчатые криогенные текстуры с увеличением доли вертикально ориентированных прослоек (см. рис. 7, *б*). Общая толщина прослоек льда при этом уменьшается. При засолении 0.5–1.8 % в криогенном строении мерзлого грунта преобладают вертикально ориентированные шлиры (см. рис. 7, *в*, *г*) [*Хименков, Минаев, 1990*].

В суглинках, отобранных в районе пос. Амдерма, минералогический состав глинистых частиц преимущественно гидрослюдистый. В интервале засоления 0–0.3 % после промерзания формировалась слоисто-сетчатая криотекстура, при этом наблюдалось преобладание горизонтальных ледяных слоев. Грунт прочно цементировался льдом. При засолении 0.4–1.0 % криогенное строение заметно менялось. Вместе с увеличением засоленности возрастала доля вертикальных шлиров, при этом размеры ледяных элементов уменьшались. Грунт был слабо сцементирован, легко крошился в руках. В интервале засоленности 1.0–1.5 % ледяные прослойки различались плохо. Преобладали нитевидные кристаллы льда, а также отдельные изометричные кристаллы размером 1–2 мм. Грунт даже при слабом нажатии легко крошился. В образцах с засоленностью более 1.5 % при температуре промораживания (–4 °С) льдообразования не происходило.

В бентоните увеличение начальной засоленности от 0 до 1.15 % практически не повлияло на формирование криогенного строения. Криотекстура во всех случаях оставалась сетчатой, при этом увеличивалась доля вертикальных шлиров льда. Одновременно с увеличением засоленности уменьшалась прочность мерзлого грунта. Минералогический состав бентонита преимущественно монтмориллонитовый, поэтому и криогенное строение его аналогично строению морской среднеплейстоценовой глины (см. рис. 6, III).

В покровном ямальском суглинке (преимущественно гидрослюдистого состава) при засоленности от 0 до 0.3 % формировались слоисто-сетчатые криотекстуры. При засолении 0.3–1.5 % криогенная текстура становилась вертикально-шлировой.

В образцах современных засоленных илов перераспределение поровой воды при одностороннем промерзании не отмечалось. Формировались вертикально-шлировые криогенные текстуры.

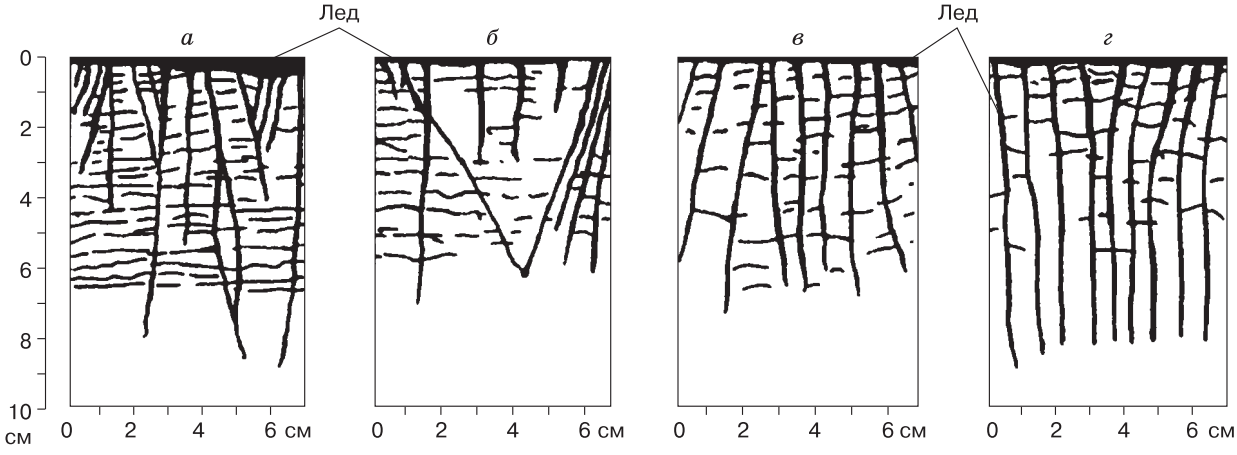

Рис. 7. Изменение криогенных текстур в каолине в зависимости от начальной засоленности образцов:
а – 0.05 %; *б* – 0.25 %; *в* – 0.5 %; *г* – 1.5 %. Температура промораживания T_f = –6 °С, начальная влажность образцов W_0 = 46 %.

В образцах морской глины монтмориллонитового состава перераспределения влажности в процессе промерзания не наблюдалось. Формировались сетчатые криотекстуры.

Указанная связь криогенного строения с засоленностью осадков была установлена авторами и в естественных условиях. А.Н. Хименковым и Б.Н. Шешиным в 1986–1988 гг. изучались многолетнемерзлые отложения лагунного комплекса (суглинки гидрослюдистого состава) в районе пос. Амдерма на побережье Карского моря. Полученные материалы позволили выявить некоторые количественные связи засоленности осадков с их криогенным строением (температура грунтов находилась в диапазоне от –3 до –6 °С). В суглинках с засоленностью до 0.2 % и влажностью до 24 % наблюдались слоистые криотекстуры, минеральные частицы были сцементированы льдом. При большей засоленности грунтов криогенное строение резко менялось. При засоленности свыше 0.8 % и влажности 28–51 % криогенные текстуры не формировались и лед не цементировал минеральные частицы. Получали развитие отдельные кристаллы или гнезда изометричных и вытянутых игольчатых кристаллов размером в несколько миллиметров. Суглинки имели малую механическую прочность, легко разламывались руками, они сохраняли пластичную консистенцию даже в мерзлом состоянии. В песках засоленностью 0.1–0.2 % и выше формировалась массивная криогенная текстура. При засолении 0.3–1.8 % и выше пески при температуре от –3 до –6 °С находятся в пластичном или текучем состоянии, формально являясь мерзлыми, поскольку в них различимы отдельные кристаллы льда размером в несколько миллиметров [*Хименков, Шешин, 1992*].

Проведенные исследования позволили установить некоторые количественные зависимости миграции поровой воды от засоленности при одностороннем промерзании грунтов различного состава. Для всех использованных в экспериментах грунтов наблюдается общая тенденция, выражающаяся в ослаблении миграционного потока при увеличении засоленности. На рис. 8 представлены результаты исследований влияния засоленности на перераспределение поровой воды при одностороннем промерзании каолиновой глины (температура промораживания –6 °С) с начальной влажностью около 40 % (в области пластичного состояния). В качестве показателя, характеризующего итоговое перераспределение поровой воды, авторы использовали разность значений суммарной влажности между верхней, наиболее льдистой, и нижней, иссушенной зоной мерзлых образцов. Таким образом удалось проанализировать общее изменение начальной влажности в ходе одностороннего промерзания. Влияние засоленности на миграцию поровой воды крайне неоднородно. При засоленности 0–0.05 % это влияние наибольшее, разница значений влажности составляет 70–80 % (при изменении засоленности на одну сотую процента влажность меняется на 14 %). При засоленности 0.05–0.25 % разница значений влажности снижается до 60 % (изменение засоленности на 0.01 % изменяет влажность на 3 %). При засоленности в диапазоне 0.5–1.8 % влажность меняется на 20 % (изменение засоленности на 0.01 % приводит к изменению влажности менее чем на 0.2 %) (см. рис. 8) [*Хименков, Минаев, 1990*].

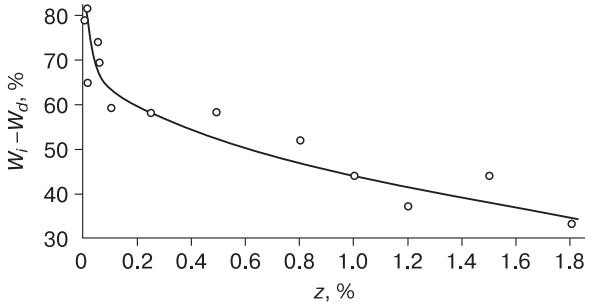

Рис. 8. Зависимость величины перераспределения влажности ($W_i - W_d$) от начальной засоленности z при одностороннем промораживании образцов каолина.

W_i, W_d – весовая влажность льдистой зоны (верхняя часть образцов) и зоны иссушения (нижняя часть образцов) соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные эксперименты показали, что при влажностях, превышающих предел текучести, минеральный состав грунтов в формировании криогенного строения играет второстепенную роль. При начальных влажностях, в 2–3 раза превышающих верхний предел текучести, ведущим процессом является перераспределение грунтовых частиц растущим кристаллом льда. Он или распределяет грунтовые частицы внутри себя, или выталкивает их к своим границам. Примеси внутри кристалла распределяются параллельно базисным плоскостям. При этом формируется слоистое строение кристалла, точнее кристаллоагрегата. Когда начальная влажность уменьшается, но остается выше предела текучести, формируются вертикально-шлировые криотекстуры. В обоих случаях для роста ледяных кристаллов определяющим является наличие свободной воды в грунте.

При уменьшении начальной влажности до значений, соответствующих пределу текучести и ниже, определяющую роль в формировании криогенного строения осадков начинает играть вещественный состав грунтов. Для каолина при данной влажности характерны сетчатые криотекстуры, сформировавшиеся за счет двухстадийного роста, для современных илов гидрослюдистого состава –

слоистые и сетчатые криотекстуры за счет роста и пересечения субвертикальных шлиров.

В морской глине монтмориллонитового состава в широком диапазоне начальных влажностей формируются сетчатые криотекстуры. Данный процесс обусловлен синерезисом, при котором происходит образование грунтовых уплотненных агрегатов с выделением воды между ними. Чем больше начальная влажность осадков, тем интенсивнее образуются трещины, при общем незначительном уменьшении объема грунта [*Горькова, 1965*]. В охлажденных морских осадках процессы синерезиса протекают более интенсивно, чем при положительных температурах [*Маслов, 1988*]. Сформировавшаяся сеть трещин пронизывает породу еще до начала льдообразования [*Ершов, 2002*]. В ходе промерзания льдовыделение происходит в первую очередь в образовавшихся трещинах, при этом формируются сетчатые криотекстуры [*Хименков, 1985; Хименков, Брушков, 2003*].

В образцах современного ила гидрослюдистого состава в больших диапазонах начальных влажностей криогенное строение формируют ледяные шлиры, имеющие вертикальную и субвертикальную ориентировку. Перераспределение влажности при промерзании незначительно. Данная специфика льдовыделения в илах определяется прежде всего их высокой засоленностью.

Ведущий процесс при промерзании грунтов – миграция связанной воды к фронту промерзания. При этом формирующиеся криотекстуры являются основным показателем условий миграции [*Попов и др., 1985*]. В наших опытах данный процесс играл заметную роль только для незасоленных образцов каолина при значениях начальных влажностей менее предела пластичности. Засоление грунтовых образцов оказывает существенное влияние на процессы, происходящие в них при промерзании. Водорастворимые соли, к которым относится хлористый натрий, взаимодействуя с поровой водой, образуют электролит, который дезориентирует молекулы рыхлосвязанной воды, формирующие оболочку грунтовых частиц [*Еловская и др., 1966*]. При промерзании это приводит к тому, что в засоленных грунтах понижается роль пленочного механизма миграции связанной воды, а сама миграция ослабевает. В этих условиях рост кристаллов осуществляется так же, как он происходит в свободной воде. Среди возникающих первичных кристаллов льда в силу анизотропии роста преимущество получают кристаллы, ориентированные базисными плоскостями перпендикулярно фронту промерзания. В данном случае наблюдается схожесть процессов льдообразования в засоленных грунтах разного состава и морской воде.

Криогенное строение отложений на контакте с припайным льдом в природных условиях аналогично строению засоленных влагонасыщенных грунтовых образцов, которые промораживались через слой минерализованной воды. Развиваются субвертикально ориентированные шлиры, пересечение которых формирует сетчатые криогенные текстуры. Различие минерального состава несущественное, грунт не цементируется льдом при отрицательной температуре, грунтовые частицы легко сдвигаются при несильном нажатии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили выявить некоторые общие закономерности влияния начальных влажности и засоленности различных грунтов на формирование их криогенного строения при одностороннем промерзании. При влажностях больше нижнего предела пластичности и меньше предела текучести в незасоленных образцах формировались криогенные текстуры, обусловленные составом грунтов: в каолине – горизонтально-слоистые, в морской глине монтмориллонитового состава – сетчатые, в суглинках гидрослюдистого состава – слоисто-сетчатые (при преобладании вертикальных слоев). При увеличении влажности больше верхнего предела пластичности, а также при увеличении засоленности возрастает доля вертикально ориентированных шлиров.

В ходе экспериментов были выявлены некоторые количественные соотношения между начальной засоленностью грунта, его криогенным строением и перераспределением поровой воды в процессе промерзания. В незасоленных образцах каолина формируются слоистые криогенные текстуры. Разница значений весовой влажности льдистой и иссушенной зон составляет 70–80 %. Начиная с засоленности 0.05 %, при общем преобладании слоистых текстур появляются отдельные вертикальные шлиры. При увеличении засоленности с 0.05 до 0.25 % формируются сетчатые криотекстуры с увеличивающейся долей вертикально ориентированных шлиров. Перераспределение влажности в образце после промерзания уменьшается до 60 %. При засолении 0.5–1.8 % в криогенном строении мерзлого грунта преобладает субвертикальная ориентировка ледяных шлиров. Перераспределение влажности составляет 30–40 %.

Установлена схожесть процессов формирования кристаллов льда из растворов и суспензий. И в том, и в другом случае формируются кристаллоагрегаты с чередующимися слоями чистого льда и примесей. Плоскости слоев примесей и льда параллельны базисным плоскостям кристаллоагрегатов.

Были выявлены особенности формирования криогенного строения морских осадков в зоне их контакта с припайными льдами. Между припайным льдом и поверхностью осадка формируется

слой воды с отрицательной температурой и повышенной (по сравнению с начальной) минерализацией. Толщина слоя воды определяется соотношением минерализации воды и ее температурой. Толщина слоя может колебаться от десятков сантиметров до долей миллиметра. В верхней части осадка, примыкающей к слою воды, лед не формируется или наблюдаются отдельные нитевидные кристаллы. Ниже развиваются криогенные текстуры с преобладанием субвертикально ориентированных шлиров.

Формирование высокольдистых горизонтов в верхней части эпигенетических мерзлых толщ морских отложений принято объяснять миграцией рыхлосвязанной воды к фронту промерзания [*Дубиков, 2002*]. Следует учесть, что эти отложения имеют значительное засоление, в них широко развиты глины монтмориллонитового состава. Эксперименты показали, что данные факторы отрицательно влияют на миграционные свойства грунтов. Наблюдаемое в природе распределение льдистости в эпигенетических мерзлых породах морского генезиса вполне объяснимо типичным распределением влажности в субаквальных осадках без привлечения миграционного механизма.

Криогенное строение диакриогенных многолетнемерзлых грунтов на арктическом побережье представлено преимущественно субвертикальными и косослоистыми криогенными текстурами. Считается, что их формирование обусловлено боковым промерзанием со стороны побережья. Вытянутые шлиры располагаются параллельно фронту промерзания [*Катасонов, 1962*]. Данный тип криогенного строения получен в ходе лабораторных исследований при промерзании сверху засоленных и водонасыщенных грунтов разного состава без какого бы то ни было бокового влияния. По мнению авторов, многие особенности криогенного строения прибрежно-морских осадков могут быть объяснены обычным промерзанием сверху водонасыщенных засоленных осадков в условиях переменной глубины водоема.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00294).

Литература

Арэ Ф.Э. О субаквальной криолитозоне Северного Ледовитого океана // Региональные и теплофизические исследования мерзлых горных пород в Сибири. Якутск, Кн. изд-во, 1976, с. 3–26.

Are, F.E., 1976. On the sub-sea cryolithozone of the Arctic Ocean. In: Regional and thermal physical studies of frozen soils in Siberia. Knizhnoye Izd., Yakutsk, pp. 3–26. (in Russian)

Богородский П.В., Марченко А.В., Пнюшков А.В. Особенности формирования припайного льда в береговой зоне замерзающих морей // Пробл. Арктики и Антарктики, 2007, № 3 (77), с. 17–27.

Bogorodsky, P.V., Marchenko, A.V., Pnyushkov, A.V., 2007. Formation of shore ice in the coastal zone of freezing seas. Arctic and Antarctic Issues, 3 (77), 17–27.

Бородачев В.Е. Словарь морских ледовых терминов / В.Е. Бородачев, В.П. Гаврило, М.М. Казанский. СПб., Гидрометеоиздат, 1994, 127 с.

Borodachev, V.E., Gavrilo, V.P., Kazansky, M.M., 1994. Dictionary of Sea Ice Terms. Gidrometeoizdat, St. Petersburg, 127 pp. (in Russian)

Горькова И.М. Структурные и деформационные особенности осадочных пород различной степени уплотнения и литификации. М., Наука, 1965, 128 с.

Gorkova, I.M., 1965. Structure and Deformities of Sedimentary Rocks of Different Degrees of Consolidation and Lithification. Nauka, Moscow, 128 pp. (in Russian)

Григорьев Н.Ф. Многолетнемерзлые породы Приморской зоны Якутии. М., Наука, 1966, 80 с.

Grigoryev, N.F., 1966. Permafrost Formations of the Littoral Zone of Yakutia. Nauka, Moscow, 80 pp. (in Russian)

Григорьев Н.Ф. Криолитозона прибрежной части западного Ямала. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1987, 111 с.

Grigoryev, N.F., 1987. The Cryolithozone of the Coastal Part of the Western Yamal Peninsula. Publishing House of Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, 111 pp. (in Russian)

Данилов И.Д. Полярный литогенез. М., Недра, 1978, 238 с.

Danilov, I.D., 1978. Polar Lithogenesis. Nedra, Moscow, 238 pp. (in Russian)

Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М., ГЕОС, 2002, 246 с.

Dubikov, G.I., 2002. The Composition of Cryogenic Structure of Permafrost Formations of Western Siberia. GEOS, Moscow, 246 pp. (in Russian)

Еловская Л.Г., Коноровский А.К., Саввинов Д.Д. Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии. М., Наука, 1966, 271 с.

Elovskaya, L.G., Konorovsky, A.K., Savvinov, D.D., 1966. Saline permafrost Soils of Central Yakutia. Nauka, Moscow, 271 pp. (in Russian)

Ершов Э.Д. Общая геокриология. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.

Ershov, E.D., 2002. General Geocryology. Moscow University Press, Moscow, 682 pp. (in Russian)

Жесткова Т.Н. Формирование криогенного строения грунтов. М., Наука, 1982, 216 с.

Zhestkova, T.N., 1982. Formation of the Cryogenic Structure of Soils. Nauka, Moscow, 216 pp. (in Russian)

Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. М., Изд-во Моск. ун-та, 1997, 320 с.

Zhigarev, L.A., 1997. The Oceanic Cryolithozone. Moscow University Press, Moscow, 320 pp. (in Russian)

Жигарев Л.А., Плахт И.Р. Сезоннокриогенные породы Ванькиной губы // Географические проблемы изучения Севера. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, с. 115–124.

Zhigarev, L.A., Plakht, I.R., 1977. Seasonally freezing soils of the Vankina Guba. In: The Geographic Issues of the Studies of the North. Moscow University Press, Moscow, pp. 115–124.

Катасонов Е.М. Криогенные текстуры, ледяные и земляные жилы как генетические признаки многолетнемерзлых четвертичных отложений // Вопросы криологии при изучении четвертичных отложений. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 37–44.

Katasonov, E.M., 1962. The cryogenic structures, ice and ground veins as genetic signs of permafrost Quaternary deposits. In: Cryology Issues in Studying Quaternary Deposits. AS USSR Press, Moscow, pp. 37–44. (in Russian)

Катасонов Е.М., Пудов Г.Г. Криолитологические исследования в районе Ванькиной губы моря Лаптевых // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1972, вып. 12, с. 38–46.

Katasonov, E.M., Pudov, G.G., 1972. The cryolithological studies of the region of Vankina Guba, Laptev Sea. Permafrost Studies, issue 12. Moscow University Press, Moscow, pp. 38–46. (in Russian)

Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М., Науч. мир, 2003, 608 с.

Komarov, I.A., 2003. Thermodynamics and Heat and Mass Exchange in Dispersed Frozen Rocks. Nauchny Mir, Moscow, 608 pp. (in Russian)

Маслов А.Д. Роль криогенеза в физико-механическом преобразовании донных отложений арктического шельфа // Криолитогенез в области прибрежных аккумулятивных равнин в связи с их нефтегазоносностью. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, с. 59–61.

Maslov, A.D., 1988. The role of cryogenesis in the physical and mechanical transformation of the bottom sediments in the offshore Arctic. In: Cryolithogenesis in the Area of Coastal Aggradation Plains due to their Oil- and Gas-bearing Capacity. Moscow University Press, Moscow, pp. 59–61. (in Russian)

Молочушкин Е.Н. К мерзлотной характеристике донных пород восточной части Ванькиной губы моря Лаптевых // Вопросы географии Якутии. Л., Гидрометеоиздат, 1973, вып. 6, с. 123–129.

Molochushkin, E.N., 1973. On the permafrost characteristics of bottom soils in the eastern part of Vankina Guba of the Laptev Sea. In: The Issues of Yakut Geography. Issue 6. Gidrometeoizdat, Leningrad, pp. 123–129. (in Russian)

Неизвестнов Я.В. Этапы формирования гидрогеологических условий шельфа // Основные проблемы палеогеографии позднего кайнозоя Арктики. Л., Недра, 1983, с. 179–182.

Neizvestnov, Ya.V., 1983. The stages of formation of offshore hydrogeological conditions. In: The Main Issues of Paleography of the Late Cainozoic Era of the Arctic. Nedra, Leningrad, pp. 179–182. (in Russian)

Нерсесова З.А. Влияние обменных катионов на миграцию влаги и пучение грунтов при промерзании // Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1961, вып. 4, с. 22–52.

Nersesova, Z.A., 1961. The impact of exchange cations on migration of moisture and soil heaving in freezing. In: Studies in Physics and Mechanics of Frozen Soils. AS USSR Press, Moscow, issue 4, pp. 22–52. (in Russian)

Плахт И.Р. Палеогеография кайнозоя и условия формирования мерзлоты восточного побережья моря Лаптевых: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1977, 19 с.

Plakht, I.R., 1977. Paleography of the Cainozoic Era and the conditions of permafrost formation of the eastern coast of the Laptev Sea. Candidate thesis (geography), Moscow, 19 pp.

Попов А.И. Криолитология / А.И. Попов, Г.Э. Розенбаум, Н.В. Тумель. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 239 с.

Popov, A.I., Posenbaum, G.E., Tumel, N.V., 1985. Cryolithology. Moscow University Press, Moscow, 239 pp. (in Russian)

Романовский Н.Н. Основы криолитогенеза литосферы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 336 с.

Romanovsky, N.N., 1993. Foundations of Cryolithogenesis of the Lithosphere. Moscow University Press, Moscow, 336 pp. (in Russian)

Савельев Б.А. Физико-химическая механика мерзлых пород. М., Недра, 1989, 215 с.

Savelyev, B.A., 1989. Physical and Chemical Mechanics of Frozen Soils. Nedra, Moscow, 215 pp. (in Russian)

Сакс В.Н. Четвертичный период в Советской Арктике. Л.; М., Водтрансиздат, 1953, 626 с.

Saks, V.N., 1953. The Quaternary Period in the Soviet Arctic. Vodtransizdat, Leningrad-Moscow, 626 pp. (in Russian)

Соловьев В.А. Криолитозона шельфа и этапы ее развития // Основные проблемы палеогеографии позднего кайнозоя Арктики. Л., Недра, 1983, с. 185–192.

Solovyev, V.A., 1983. Offshore cryolithozone and the stages of its development. In: The Main Issues of Paleography of the Late Cainozoic Era of the Arctic. Nedra, Leningrad, pp. 185–192. (in Russian)

Усов В.А. Криогенное строение и особенности формирования многолетнемерзлых отложений лагунного берега // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, вып. 7, с. 199–210.

Usov, V.A., 1967. The cryogenic structure and specific formation of permafrost sediments of lagoon shores. In: Permafrost Studies. Moscow University Press, Moscow, issue 7, pp. 199–210. (in Russian)

Хименков А.Н. Формирование криогенного строения морских отложений: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1985, 24 с.

Khimenkov, A.N., 1985. Formation of the cryogenic structure of marine deposits. Candidate thesis (geology and mineralogy). Moscow, 24 pp.

Хименков А.Н. Океанический криолитогенез / А.Н. Хименков, А.В. Брушков. М., Наука, 2003, 336 с.

Khimenkov, A.N., Brushkov, A.V., 2003. Oceanic Cryolithogenesis. Nauka, Moscow, 336 pp. (in Russian)

Хименков А.Н., Гагарин В.Е., Кошурников А.В., Скосарь В.В. Лабораторное моделирование зоны контакта припайных льдов с донными отложениями // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, т. 3, с. 81–87.

Khimenkov, A.N., Gagarin, V.E., Koshurnikov, A.V., Skosar, V.V., 2016. Laboratory modeling of the zone of contact between shore ice and bottom sediments. In: Proceedings of the Fifth Conference of Russia's Geocryologists. June 14–17, 2016. Universitetskaya Kniga, Moscow, vol. 3, pp. 81–87.

Хименков А.Н., Минаев А.Н. Влияние степени засоленности на формирование криогенного строения мерзлых грунтов // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, с. 55–62.

Khimenkov, A.N., Minaev, A.N., 1990. The impact of the degree of salinization on formation of the cryogenic structure of frozen soils. In: Salinized Frozen Soils as Bases for Buildings and Structures. Nauka, Moscow, pp. 55–62. (in Russian)

Хименков А.Н., Шешин Ю.Б. Геокриологические условия побережья Карского моря в районе пос. Амдерма (опыт комплексного геокриологического изучения арктических побережий) // Инж. геология, 1992, № 2, с. 71–82.

Khimenkov, A.N., Sheshin, J.B., 1992. The geocryological conditions of the Kara Sea Coast in the region of Amderma (the experience of a comprehensive study of the Arctic coast). Inzhenernaya Geologiya, No. 2, 71–82.

Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М., Изд-во АН СССР, 1955, 491 с.

Shumsky, P.A., 1955. Foundations of Structural Ice Studies. AS USSR Press, Moscow, 491 pp. (in Russian)

Osterkamp, T.E. Sub-sea permafrost // Encyclopedia of Ocean Sciences. N.Y., Acad. Press, 2001, p. 2902–2912.

Поступила в редакцию
28 апреля 2016 г.