

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Геологический факультет  
Кафедра геокриологии

**ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Под редакцией проф. Э.Д.Ершова

Издательство Московского университета

1987

генных) пород: а) высокое льдонасыщение за счет льда включений (до 50% и больше) и льда-цемента; б) преобладание в толще отложений шпировых полноразвитых криогенных текстур простого и сложного типов, развивающихся в симбиозе с повторно-жильными льдами; в) неустойчивость криогенного строения толщи ММП и перестройка текстуры и структуры пород внутри мерзлой зоны; г) высокая просадочность пород и резкое изменение инженерно-геологических свойств после оттаивания.

### Литература

- Жесткова Т. Н. Криогенное строение и льдообразование в рыхлых отложениях. - М., 1966. - 105 с.
- Жесткова Т. Н. Формирование криогенного строения грунтов. - М., 1982. - 215 с.
- Приклонский В. А. Грунтоведение. Т. I. - М., 1955. - 429 с.
- Шур Ю. Л., Максимов В. В., Швецов П. Ф. Стратиграфия верхних горизонтов многолетнемерзлых грунтов Крайнего Севера и ее инженерно-геологическое значение // Инженерная геология. - 1984. - № 2. - С. 16-25.
- Шур Ю. Л. Термокарст и строение верхнего горизонта толщи многолетнемерзлых пород: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. - М., 1985. - 46 с.

Э. Д. Ершов, Ю. П. Лебеденко, В. В. Кондаков,  
Е. М. Чувилин, М. Н. Проворова

### МЕХАНИЗМ КРИОГЕННОГО ТЕКСТУРООБРАЗОВАНИЯ В НЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Под неконсолированными водонасыщенными отложениями мы понимаем илы и осадки (тонкодисперсный нелитифицированный материал) с высокой влажностью. Изучение механизма криогенного текстурообразо-

вания в таких отложениях представляет большой теоретический интерес. Во-первых, такие исследования позволяют определять степень литификации отложений до промерзания по криогенной текстуре и структуре мерзлой породы. Во-вторых, изучение процесса промерзания илов и осадков так же, как и исследование процессов набухания, усадки, позволяет глубже понять природу грунтовых систем. В-третьих, результаты исследований могут найти применение для прогноза деформаций пучения при искусственном промораживании сильноводонасыщенных грунтов.

В настоящее время процесс криогенного текстурообразования в промерзающих илах и осадках практически не исследован. По этой теме существуют лишь отдельные экспериментальные данные, полученные Т.Н.Жестковой, А.М.Пчелинцевым, Р.Миллером, В.В.Роговым. Имеется также мнение, согласно которому неуплотненные водонасыщенные отложения не влияют на процесс криогенного текстурообразования, в связи с чем кристаллы льда в них развиваются по собственным законам. При этом текстура мерзлой породы определяется главным образом ориентировкой возникающих в ней кристаллов льда (Шумский, 1955). Специфичность процесса криогенного текстурообразования в промерзающих илах и осадках следует также из их свойств и строения. Согласно современным представлениям, или континентальных, лагунных и морских бассейнов, а также неуплотненные водонасыщенные молодые глины и суглинки отличаются наличием высокопористого и малопрочного каркаса. Пористость их может достигать 80-90%, объемная масса скелета грунта 300-1200 кг/м<sup>3</sup>, влажность более 100%, причем значительная доля воды находится в свободной форме. Данные отложения характеризуются наличием ячеистой или скелетной микроструктуры. Структурные связи между частицами и агрегатами осуществляются через гидратные пленки воды толщиной до 100 Å за счет дальнедействующих молекулярных, а в некоторых случаях - магнитных и электростатических сил. Вследствие рыхлого сложения и преобладания дальних коагуляционных контактов прочность илов низка. По данным В.И.Осипова (1979), ее величина при испытании конусом изменяется от 0,02 до 0,05 МПа. Для илов характерно отсутствие набухания и высокая сжимаемость.

Авторами проведена серия экспериментов по промораживанию неконсолидированных водонасыщенных отложений. Подготовка образцов к опытам проводилась по методике, предложенной В.И.Осиповым (1979). Для исследований использовались искусственно полученные полиимне-

ральные осадки глинистого, суглинистого и супесчаного составов. Промораживание образцов осуществлялось на холодильной установке, конструкция которой изложена в работе Э.Д.Ершова (1979). В процессе опытов проводились наблюдения за изменением криогенных текстур в промерзающих грунтах, измерялись плотность потока влаги и температура в образцах. Кроме того, определялись начальные и конечные влажность и плотность осадков.

Наличие свободной воды в осадках и ее более высокая температура замерзания по сравнению со связанной водой делают возможным предположение о том, что в начальный момент промерзания процесс криогенного текстурообразования в промерзающих осадках определяется законами кристаллизации свободной воды. Поэтому для правильного понимания процесса криогенного текстурообразования в промерзающих осадках необходимо знание особенностей кристаллизации чистой воды и водных суспензий грунтов с различной концентрацией минеральной компоненты.

Согласно экспериментальным исследованиям О.С.Конновой, Б.А.Савельева, а также данным, полученным авторами, замерзание чистой воды и водных суспензий с различной концентрацией минеральных частиц начинается с формирования ледяного каркаса, состоящего из сросшихся удлиненных кристаллов льда. Пространство внутри такого ледяного каркаса оказывается заполнено водой или суспензией, которые замерзают постепенно по мере дальнейшего промерзания. Размеры кристаллов льда в ледяном каркасе, а также размеры самого каркаса возрастают с удалением от поверхности охлаждения. Так, по данным О.С.Конновой (1965), при промерзании бидистиллята воды на контакте с поверхностью охлаждения на площади 90 мм<sup>2</sup> насчитывалось 50 кристаллов, а в слое, находящемся на глубине 10 мм, эту же площадь образуют 16 кристаллов льда. Во всех случаях при промерзании бидистиллята воды, суспензий гумбина и суспензий каолина наблюдались крупные кристаллы льда, окруженные мелкими кристаллами с более правильной формой. Более правильная форма мелких кристаллов указывает на формирование их при более медленном промерзании, т.е. после того, как образовался ледяной каркас из крупных кристаллов льда. С удалением от поверхности охлаждения, кроме того, наблюдается увеличение концентрации грунтовых частиц и включений воздуха, которые, как правило, сосредоточены по границе разделов кристаллов. Такое распределение включений, как известно, обусловлено отталкиванием примесей растущими кристаллами льда.

Приведенные литературные данные и экспериментальные результаты, полученные авторами, позволяют вскрыть механизм криогенного текстурообразования в неконсолидированных водонасыщенных отложениях при промерзании, основанный на представлениях о протропной стадии кристаллизации свободной воды (Ершов, 1986).

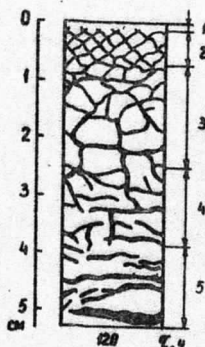


Рис.1. Криогенные текстуры, сформировавшиеся в суглинистом осадке при промерзании: 1 - 5 - слои образцов с различной криогенной текстурой

В осадках, промерзающих в условиях открытой системы, наблюдается пять слоев, различающихся по типу криогенной текстуры (рис.1). Для первого слоя, мощностью не более первых миллиметров, характерно наличие массивной криогенной текстуры. Ее формирование объясняется большой скоростью промерзания в начальный момент и специфической ледовыделением на прототропной стадии кристаллизации свободной грунтовой воды. Минеральный скелет мерзлого осадка представлен отдельными агрегатами, разобщенными льдом-цементом базального типа. Располагающийся ниже второй слой мерзлого осадка характеризуется наклонно-решетчатой криогенной текстурой, обусловленной развитием ортотропной стадии кристаллизации свободной воды, в избытке присутствующей в неконсолидированном осадке. В отличие от миграционно-сегрегационного механизма

образования ледяных шпиров в данном случае рост ледяных прослоев происходит за счет замерзания окружающей незамерзшей воды. При этом минеральные частицы отталкиваются растущими прослоями льда в стороны. При быстром замерзании воды наблюдается захват минеральных частиц и формируются ледяные прослой с большим количеством минеральных включений. Утолщение шпиров льда, оконтуривающих замкнутые ячейки грунта, приводит к обжатию грунта и его компрессионному уплотнению. В результате часть связанной воды переходит в свободное состояние и вымерзает, наращивая имеющиеся ледяные прослой. С глубиной большая часть наклонно ориентированных шпиров льда выклинивается и наклонно-решетчатая криогенная текстура переходит сначала в неупорядоченную сетчатую текстуру, а затем в неполносетчатую. Такой переход связан с большой плотностью осадка на этом участке и с резко замедляющейся

скоростью промерзания. Мощность и расстояние между шпирями льда при этом существенно возрастают.

Выталкивание минеральных частиц растущими кристаллами льда в направлении движения фронта промерзания при формировании решетчатых криогенных текстур приводит к изменению влажности внутри осадка. Изменение влажности в данном случае обусловлено не движением влаги, как при миграционно-сегрегационном образовании ледяных прослоев, а перемещением минеральной составляющей. В результате увеличивается влажность в верхней и уменьшается — в нижней частях промерзающего осадка. Например, при промерзании суглинистого осадка объемная влажность в верхней его части увеличилась на 0,1 ед.

Вымерзание свободной воды сопровождается увеличением ее объема и развитием кристаллизационного давления. Поэтому можно предположить, что при формировании массивной, наклонно-решетчатой и сетчатой криогенных текстур происходит уплотнение и обезвоживание осадка за счет оттока влаги под действием кристаллизационного давления. Это предположение подтверждают наблюдения за изменением плотности потока влаги во времени. Согласно полученным результатам, образование массивной, ячеистой и сетчатой криогенных текстур в первых трех слоях мерзлого осадка сопровождается оттоком влаги из образцов, т.е. в данном случае плотность потока имеет отрицательное значение и в среднем составляет  $1,5 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>2</sup>·с (рис.2). Кроме того, наличие отрицательного по величине потока влаги указывает на то, что названные криогенные текстуры формируются за счет вымерзания именно свободной воды. Если бы вымерзала связанная вода, то поток влаги имел бы положительное значение. Такое компрессионное уплотнение осадков в нижней части образцов приводит к увеличению плотности скелета от 960–1040 до 1410–1660 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, к моменту промерзания нижней части образца осадок успевает уплотниться и обезводиться за счет перемещения минеральных частиц и кристаллизационного давления. В результате в нем формируются криогенные текстуры, типичные для миграционно-сегрегационного механизма льдовыделения (см.рис.1, слой 4 и 5). Наблюдения за динамикой плотности потока влаги показали, что в данный промежуток времени происходит подток влаги в образец, т.е. плотность потока влаги имеет положительную величину (см.рис.2). Причем параллельно с образованием в четвертом и пятом слоях криогенной текстуры миграционно-сегрегационного генезиса во втором и

третьем слоех продолжалось также доращивание уже существовавших ледяных прослоев.

В целях проверки генезиса криогенных текстур в выделенных горизонтах было проведено одностороннее промораживание осадка без возможности вертикального деформирования. В конечном итоге в образце сформировались массивная, наклонно-решетчатая и сетчатая криогенные текстуры, в которых преобладают ледяные шпирь с вертикальной и близкой к вертикальной ориентировками.

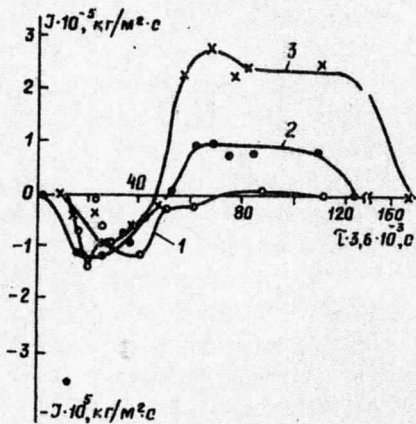


Рис. 2. Динамика плотности потока влаги в супесчаном (1), суглинистом (2) и глинистом (3) осадках при их промерзании

образования таких криогенных текстур сопровождаются оттоком влаги из образца. Количество оттаятой воды из образца, промерзавшего без возможности вертикального деформирования, приблизительно равно количеству оттаятой воды из образца, промерзавшего с возможностью вертикального деформирования. Отсюда можно сделать вывод, подтверждающий предложенный ранее механизм формирования наклонно-решетчатой и сетчатой криогенных текстур. Растущие прослои льда освобождают себе пространство за счет замерзания окружающей их незамерзшей воды и за счет компрессионного уплотнения талого осадка. В результате того, что

осадок промораживался без возможности деформирования вверх, нижняя часть (таялая) грунта оказалась под воздействием кристаллизационного давления, возникшего за счет промерзания верхней части образца. Поэтому при дальнейшем промерзании грунта миграция влаги отсутствовала и в нем образовалась массивная криогенная текстура. Следует отметить, что формирование горизонта со слоистой криогенной текстурой характерно для неконсолидированных пород, промерзающих в основном в условиях открытой системы, так как именно в этом случае возможен отток влаги и уплотнение нижнего слоя осадка. В условиях закрытой системы в осадках, по-видимому, образуются лишь массивная, наклонно-решетчатая и сетчатая криогенные текстуры.

Исследования формирования криогенных текстур в промерзающих осадках различной дисперсности подтверждают предложенный ортотропно-компрессионный механизм текстурообразования. Например, тот факт, что в водонасыщенных супесчаных отложениях образуются ледяные прослои, а в тех же отложениях, но предварительно уплотненных, при благоприятных условиях льдонакопления (медленная скорость промерзания и небольшое расстояние до водоносного горизонта) ледяные прослои отсутствуют, указывает на то, что пленочный механизм перемещения влаги не участвует в льдонакоплении в водонасыщенных супесчаных осадках. Следует отметить, что при промерзании осадков различной дисперсности в разрезе могут пролеживаться не все пять ранее описанных разновидностей криогенных текстур. Так, в суглинистых и глинистых осадках наблюдается весь набор криогенных текстур. Промерзающим же супесчаным осадкам свойственно отсутствие в разрезе сетчатой криогенной текстуры. Объясняется это, на наш взгляд, строением самих осадков и его влиянием на характер кристаллизации свободной воды.

Рассматривая процесс кристаллизации воды в промерзающих осадках, необходимо учитывать также влияние центров кристаллизации. С увеличением дисперсности осадков увеличивается количество частиц, которые могут служить центрами кристаллизации и, следовательно, возрастает вероятность одновременного зарождения кристаллов льда во многих центрах, что должно приводить к более частому расположению ледяных прослоев.

Наблюдения за изменением плотности потока влаги во времени показали, что образование ледяных прослоев за счет ортотропно-компрессионного механизма сопровождается во всех промерзающих осадках оттоком влаги. Средняя величина плотности потока влаги в осадках приблизительно одинаковая -  $1,5 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>2</sup>·с (см. рис. 2).

В нижней половине промерзающих образцов наблюдалось миграционно-сегрегационное формирование криогенных текстур. В результате промерзания супесчаных осадков в интервале 2,5-3,5 см образовалась линзовидная криогенная текстура. Мощность ледяных линз составляла доли миллиметра, длина изменялась от 3 до 15 мм. В суглинистом и глинистом осадках сформировались неполносетчатая и слоистая криогенные текстуры. Наименьшая мощность прослоев льда наблюдалась в глинистом осадке. Миграционно-сегрегационное льдовыделение в глинистом осадке привело к образованию в нем плетенчатой криогенной текстуры с мощностью ледяных прослоев,



увеличивающейся сверху вниз от I до 2-3 мм.

Максимальная плотность потока влаги во время промерзания нижней части образца наблюдалась в глинистом осадке и составляла  $2,5 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>2</sup>.с, в суглинистом -  $1 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>2</sup>.с, а в супесчаном подток влаги отсутствовал (см. рис.2). Полученные данные подтверждают ранее известную закономерность, согласно которой льдовыделение в промерзающих грунтах увеличивается с возрастанием их дисперсности.

Наблюдения за изменением влажности в ходе промерзания осадков подтвердили вышеописанные результаты. Например, приблизительно одинаковые по величине потоки влаги при ортотропно-компрессионном механизме криогенного текстуробразования обусловили и примерно равное изменение влажности. При миграционно-сегрегационном механизме формирования криогенных текстур максимальная по значению плотность потока влаги наблюдалась в глинистом осадке и соответственно увеличение влажности в нем было также максимальным. Полученные экспериментальные данные подтверждаются результатами исследований криогенного строения эпигенетических мерзлых толщ, сложенных породами, промерзшими на стадии раннего диагенеза.

Таким образом, в ходе исследований криогенного текстуробразования в промерзающих неконсолидированных водонасыщенных отложениях установлен новый механизм формирования криогенных текстур, отличный от миграционно-сегрегационного механизма криогенного текстуробразования в уплотненных породах. Согласно выявленному механизму ориентировка ледяных прослоев определяется ортотропным ростом кристаллов льда, а рост ледяных шпиров осуществляется за счет свободной воды, компрессионно отжимаемой из осадка. В ходе исследований выявлено, что при промерзании осадков и неконсолидированных пород формируются характерные для них наклонно-решетчатые и сетчатая криогенные текстуры.

#### Литература

- Ершов Э. Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. - М., 1979. - 213 с.
- Ершов Э. Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. - М., 1986. - 333 с.
- Конинова О. С. Структура льда и суспензий глин // Крио-

генные процессы в почвах и горных породах. - М., 1965. - С. 114-131.

О с и п о в В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. - М., 1979. - 230 с.

Ш у м с к и й П. А. Основы структурного ледоведения. - М., 1955. - 492 с.

Э.Д.Ершов, Ю.П.Лебедеико, В.В.Кондаков,  
Е.М.Чувилн, А.Н.Ганов, С.Д.Ганова

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОГЕННОГО ТЕКСТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЭПИ- И СИНГЕНЕТИЧЕСКОМ СПОСОБАХ ПРОМЕРЗАНИЯ ПОРОД

Формирование криогенных текстур в эпи- и сингенетических мерзлых толщах имеет ряд отличительных особенностей, которые приводят к образованию в многолетнемерзлых породах специфического криогенного строения. Криогенное текстурообразование в эпигенетических многолетнемерзлых породах происходит при промерзании уже накопившихся отложений и прошедших более или менее длительную стадию диagenеза. В сингенетических многолетнемерзлых породах криогенные текстуры формируются при одновременном осадконакоплении и промерзании пород.

В связи с лучшей изученностью процесса криогенного текстурообразования в эпигенетических породах по сравнению с сингенетическими, рассмотрим только те особенности образования криогенных текстур в эпигенетических породах, которые слабо или практически не исследованы. Одна из таких особенностей - образование криогенных текстур под действием давления вышележащих отложений. Исследованиями А.М.Пчелинцева (1959) показано, что внешнее давление не влияет на процесс криогенного текстурообразования в породах, промерзающих в условиях закрытой системы. Влияние же внешнего давления на формирование криогенных текстур в отложениях, промерзающих в условиях открытой системы, практически не исследовано. Имеются лишь отдельные теоретические и экспериментальные результаты, по-