

УДК 551.328.2

Т.Н. Жесткова, Ю.Л. Шур

ОБ ИНФИЛЬТРАЦИОННО-СЕГРЕГАЦИОННОМ МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ

Авторы относят пластовые льды к внутригрунтовым. Рассмотрены сегрегационный и инъекционный механизмы образования пластовых льдов, показано, что они не объясняют некоторые особенности пластовых залежей льда. Учитывая ряд признаков пластовых льдов и вмещающих пород, приуроченность некоторых залежей к озерным отложениям, авторы предложили инфильтрационно-сегрегационный механизм формирования пластовых льдов. Лед образуется на границе подозерного талика, промерзающего снизу. Небольшие по вертикали пласты льда могут образовываться также под промерзающими озерами, на границе субаквального СТС. Предлагаемый механизм наиболее просто объясняет многие особенности макро- и микростроения пластовых льдов. Подобным образом могут формироваться льды в теле плотин и дамб.

После создания стройной теории формирования повторно-жильных льдов и доказательства их исключительно широкого распространения в значительной мере была подорвана уверенность в возможности существования пластовых форм льда.

Изучение подземных льдов рядом исследователей в течение 1960-1970 гг. показало, однако, что наряду с широким распространением жильных льдов, существуют и пластовые льды, отличающиеся от жильных морфологическими признаками, условиями залегания, строением.

С появлением неопровержимых доказательств существования пластовых льдов актуальным стало и объяснение их происхождения.

Исследователи, считающие пластовые льды первичным внутригрунтовым образованием, расходятся во взглядах на механизм их образования. В настоящее время называются четыре возможных механизма - инъекционный, инъекционно-сегрегационный, сегрегационный и инфильтрационно-сегрегационный. Эти гипотезы рассмотрены ранее [*Жесткова, Шур, 1978*].

Согласно сегрегационной гипотезе главными факторами и условиями, определяющими образование пластовых льдов, являются эпигенетический способ промерзания толщи отложений, литологически неоднородный состав, наличие в толще водоносного горизонта и определенное соотношение в интенсивности промерзания и скорости поступления воды из водоносного горизонта к фронту промерзания [*Баулин, Дубиков, 1970; Втюрин, 1975*].

Вместе с тем эта гипотеза, как отмечают и ее сторонники не объясняет некоторые особенности строения многолетнемерзлых пород с пластовыми льдами. Например, невозможно связать образование пластовых льдов с наличием водоносного горизонта в тех разрезах мерзлой толщи, где он не обнаруживается.

Весьма сложным для рассматриваемых гипотез оказалось объяснение синклинального расположения слоев льда, характерного для очень многих пластовых залежей. Столкнувшись с необходимостью такого объяснения, Дж.Р. Маккей и Дж.К. Стаджер предположили [Баулин, Дубиков, 1970], что пласты первоначально формировались как горизонтальные и механизм их образований - сегрегационный. Под давлением ледника, спускавшегося на морскую равнину после промерзания морских пород, горизонтально-слоистые плейстоценовые осадки и пласты льда на отдельных участках деформировались и стали наклонными. Таким образом для объяснения наклонного залегания пластов приходится привлекать дополнительные причины.

С позиции инъекционной гипотезы трудно объяснить отмечаемое для многих залежей переслаивание льда с грунтом. По нашим наблюдениям, в отдельных залежах отмечается переслаивание многих десятков относительно толстых слоев льда с гораздо более тонкими слоями грунта. Может ли повторяться нерегулируемый процесс повторно-инъекционного льдообразования? Как работает неведомый природный регулятор, многократно направляющий дозируемую порцию воды в одно и то же место? Инъекционное льдообразование - случайный процесс. Поэтому вероятность его повторения в одном и том же месте меньше единицы. И соответственно исключительно мала вероятность его многократного повторения.

Между механизмами повторно-инъекционного и повторно-жильного льдообразования на первый взгляд будто бы есть аналогия. Но в отличие от первого во втором случае существует и хорошо известный механизм многократно повторяющегося растрескивания грунтов, в основе которого лежат периодические сезонные и менее продолжительные процессы промерзания и оттаивания, охлаждения и нагревания верхних горизонтов горных пород.

Повторно-инъекционный процесс никогда не наблюдался в контролируемых условиях - в природном или лабораторном эксперименте. Это до сих пор непроверенная гипотеза. И поэтому те объяснения той или иной особенности пластового льда повторно-инъекционным механизмом образования, в которых не ставится под сомнение сама возможность этого механизма и не раскрывается его сущность, создают, по нашему мнению, иллюзию решения проблемы генезиса пластовых льдов.

Невозможность объяснения ряда важных признаков пластовых льдов и вмещающих их отложений с помощью инъекционной, сегрегационной и инъекционно-сегрегационной гипотез заставила ряд исследователей искать другие возможные причины образования пластовых льдов.

В.И. Соломатин провел изучение пластовых льдов известного обнажения Селякино, расположенного на Енисее. Детально изучив с применением структурно-петрографического метода лед залежи, рассмотрев и сопоставив гипотезы, высказанные о происхождении этой залежи рядом исследователей, В.И. Соломатин пришел к иным выводам.

Строение пласта в целом, его сочетание с полигонально-жильным льдом оказалось схоже со льдами в молодых озерных отложениях на юге Тазовского полуострова, изученных В.И. Соломатиным [1963] ранее. Отклонив возможность инъекционного и сегрегационного способов образования пластового льда, В.И. Соломатин пришел к выводу о том, что пластовая залежь сформировалась путем погребения озерного или наледного льда сингенетически промерзавшими осадками аллювиального или прибрежно-морского генезиса. Таким образом, удастся объяснить эпигенетический тип криогенного строения в подстилающих пласт отложениях, сингенетическое промерзание, перекрывающих осадков с сингенетическими

полигонально-жильными льдами и структурные особенности пластового льда [Соломатин, 1976].

Подробный анализ возможных способов образования залегающих вблизи поверхности пластовых льдов в районе г. Норильска дан в работе Н.В. Тумель и Л.Н. Крицук [1965]. Пластовые льды приурочены к толще озерно-болотных отложений. Авторы показали, что генезис изучаемых льдов не связан с погребением ледникового или озерного льда, нельзя его объяснить и инъекционным или сегрегационным происхождением. Они пришли к выводу, что льды образовались при обмелении озер и промерзании осушавшихся участков. При этом формировались локальные горизонты грунтовых вод, имеющих озерное или атмосферное питание. Промерзание этих локальных грунтовых вод в замкнутой системе сопровождалось излиянием воды на поверхность и образованием наледей. Погребение наледей материалом, сносимым с межозерных перемычек, или озерными осадками и привело к образованию пластового льда.

Озерные отложения - как вместилище пластовых льдов, озера - как места их образования, неоднократно упоминались в литературе на протяжении всей истории изучения подземных льдов. А.А. Григорьев [1930] в своей известной статье приводит работы Маддрена, Мендеголла, Рёссела, Смита, Дола, в которых описаны пластовые залежи льда на Аляске, приуроченные к местам бывших озер. С озерами связывал образование части подземных льдов и сам А.А. Григорьев. Эти исследователи считали, что пласты льда образовались при погребении или зарастании сплывиной озерного льда.

Пластовые льды в озерных отложениях в районе Анадыря описаны в работах П.А. Соловьева [1946] и П.Ф. Швецова [1946]. Они считают пласты льда погребенным льдом озер и болот.

Гипотеза погребения льда не объясняет ряд особенностей структуры пласта, его строения, слоистости, негоризонтального положения.

Рассматривая возможный механизм первичного внутригрунтового образования пластового льда, мы в первую очередь остановились на следующих признаках льдов и вмещающих пород: эпигенетическом промерзании подстилающих отложений, сегрегационном характере пластов льда, сингенетическом промерзании перекрывающих пласт отложений, невыраженности залежей в рельефе, горизонтальном и наклонном положении пластов, особенности химического состава льда. При этом весьма существенным для нас является приуроченность некоторых из известных залежей к озерным отложениям.

Различие в форме промерзания разделенных пластом отложений указывает на то, что их промерзание происходило не синхронно. Подстилающие пласт отложения были мерзлыми до того, как началось промерзание осадков над пластом. Но в таком случае влага, необходимая для образования льда, не могла поступать из отложений, подстилающих лед. Это означает, что поступление воды должно было идти сверху вниз, а промерзание снизу вверх, со стороны мерзлой зоны. На сингенетический характер промерзания перекрывающих пласт отложений указывает В.И. Соломатин [1976]. Но, как известно, для того чтобы промерзание снизу было существенным и привело к наращиванию слоя льда, температура многолетнемерзлых грунтов должна быть низкой. В таких условиях в первую очередь и наиболее интенсивно происходит промерзание толщи сверху, и если его не было, то этому препятствовали какие-то длительно действующие факторы отепления поверхности, необходимым свойством которых является наряду с отеплением некоторого слоя литосферы и его обогащение водой, идущей на формирование льда. Такими свойствами среди природных объектов обладают озера, многочисленные в районах распространения пластовых залежей льда.

Озеро - практически неограниченный по запасам воды резервуар, из которого происходит инфильтрация воды в талые грунты, вмещающие водную массу.

Первоначально [*Жесткова, Шур, 1978*] считали, что необходимо рассматривать лишь возможность развития пластовых льдов под озерами, глубина которых больше критической и под которыми образуется талик. Поэтому рассматривали лишь озера небольшие в плане, поскольку под большими происходит оттаивание грунта на большую глубину. Изучение материалов, ранее нам неизвестных, полевые наблюдения убедили нас в том, что рассмотренная схема образования пластовых льдов под озерами может быть расширена и что генетически схожими (однотипными) могут являться залежи льда, отличные по своим морфологическим признакам.

Рассмотрим отдельно два случая тепло- и влагообмена водной толщи озера с грунтами.

1. Глубина озера меньше критической. Среднегодовая температура донных осадков такого озера отрицательная и под ним верхние горизонты многолетнемерзлых пород оттаивают летом и промерзают зимой. Таким образом, под озером существует субаквальный слой сезонного оттаивания.

Накопление донных осадков - минеральных, образующихся при разрушении берегов озера, или биогенных приводит к поднятию верхней поверхности толщи многолетнемерзлых пород. В этом случае имеет место субаквальное сингенетическое наращивание мерзлой толщи [*Катасонов, 1962*]. Тепловые условия и условия водного питания весьма благоприятны для накопления крупных прослоев льда. Более того, если применить к данному случаю разработанную А.И. Поповым [*1967*] схему сингенетического роста осадков и миграционного льда во времени, то нетрудно показать, что наращивание льда и рост многолетнемерзлой толщи пород сверху может в субаквальных условиях (а в принципе это возможно и в субаэральных) проходить и без накопления донных осадков. Это возможно потому, что наращивание льда не приводит к изменению свойств перекрывающего грунта. Накопление осадка должно приводить к промерзанию части отложений и формированию слоистого льдогрунтового горизонта. Н.Н. Романовский [*1978*] отмечал, что при сингенезе формирование мерзлой породы происходит за счет двух источников материала: осадка и влаги, переходящей в сегрегационный лед. Рассмотрение показывает, что в определенных экстремальных условиях формирование мерзлой породы может идти либо только за счет сухого осадка (вполне вероятно, таким образом, накопление сухих сингенетических толщ эоловых осадков), либо только за счет воды. Ранее к схожему выводу пришел А.П. Горбунов: «Образование очень крупных прослоев льда, вероятно, происходит при сингенетическом промерзании донных осадков еще в аквальных условиях. Следует учесть, что вследствие большого бокового выхолаживания и часто небольшой глубины высокогорных озер под некоторыми отсутствуют талики. Постоянное и обильное поступление воды к фронту промерзания донных осадков могло привести к возникновению очень крупных прослоек льда» [*Горбунов, 1965, с. 211*].

Образование пластового льда в условиях субаквального сингенеза чаще, очевидно, происходит на стадии деградации озера, при переходе его в болото. Такие льды, перекрытые сверху торфом или минеральным наносом и растительным слоем, описаны Маддреном, Доллом, А.А. Григорьевым [*1930*]. В таких условиях, по нашему мнению, сформировались пласты льда, изученные В.И. Соломатиным [*1963*] на Тазовском полуострове. Такой лед мы неоднократно находили в озерно-болотных отложениях. Так, на севере Ямала (вблизи пос. Карский) в заболоченных понижениях слои льда толщиной от 0,5 до 1,5 м залегали на глубине от 1 до 2 м. Лед в залежи чистый, прозрачный с включением органических остатков. В нижней части лед

слоистый с включением тонких прослоек супеси или песка, сильно заторфованного со слоистой криогенной текстурой. Лед перекрывается слоистым сильно оторфованным суглинком со слоистой криогенной текстурой или торфом с порфирированной текстурой. Общее льдонасыщение перекрывающих отложений достигает 70%.

2. Глубина озера больше оптической, среднегодовая температура воды в озере положительная. Наибольшая температура воды отмечается в непромерзающих до дна водоемах. Среднегодовая температура воды термических мелких непромерзающих озер в северной геофизиологической зоне составляет 1-2°C, а если озеро перемерзает полностью, то среднегодовая температура воды в озере еще меньше.

Под озером с положительной среднегодовой температурой образуется талик, величина которого зависит от размера озера, температуры воды и температуры пород на окружающей озеро территории.

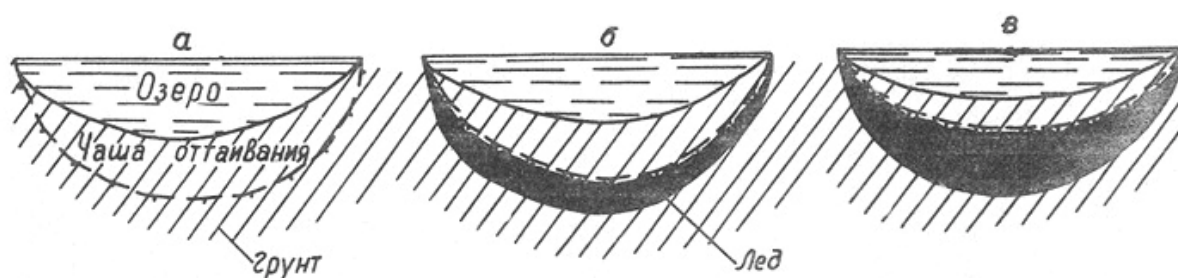


Рис.1. Схема образования пластового льда (пояснения в тексте).

Мы считаем [Жесткова, Шур, 1978], что образование пластового льда происходит при промерзании подозерного талика снизу. Схема деградации талика и развития пластового льда показана на рис. 1: а - чаша оттаивания соответствует установившемуся тепловому состоянию; б - при понижении температуры воды в озере или из-за других причин начинается промерзание талика снизу. Оно происходит при обводнении грунтов чаши оттаивания за счет инфильтрации воды из озера. Медленное промерзание обводненных грунтов снизу сопровождается интенсивным льдообразованием и выпучиванием вышележащих талых грунтов. Это приводит к уменьшению глубины озера; в - процесс продолжается до нового установившегося теплового состояния и стабилизации чаши оттаивания или до начала промерзания грунтов под озером сверху. Формирование пластового льда при промерзании талика снизу возможно только при положительной среднегодовой температуре воды. В противном случае происходит и промерзание талика сверху, и слой мерзлого грунта непосредственно под озером блокирует доступ воды к нижней границе чаши оттаивания. Лед в таком случае может образовываться только на границе сезонноталого слоя в соответствии с рассмотренной выше схемой.

Глубина залегания пластового льда определяется морфометрией озера, зональными и локальными условиями территории. От этих условий, а также от состава и свойств грунта, динамики озера (расширение, обмеление, зарастание и др.) зависит и конфигурация пластового тела. Следует отметить, что развитие пластовой залежи может происходить в любых по генезису осадках, в которых сформировалась чаша оттаивания, а не только в озерных осадках непосредственно под водоемом. Здесь и далее мы говорим о формировании пластового льда под озером. В общем случае это могут быть любые водоемы и даже водотоки [Жесткова, Шур, 1978].

Теплофизическая сторона процесса промерзания подозерных таликов снизу, насколько нам известно, никогда не рассматривалась. Но так как озера являются довольно изменчивыми природными образованиями, подозерный талик также должен

отражать эти изменения озера, и тем быстрее, чем суровее геокриологические условия окружающего озера ландшафта, ниже температура воды, меньше размеры озера в плане. На рис. 2 показаны три варианта изменения подозерного талика под озером: а - размеры озера неизменны, причиной уменьшения талика под озером является понижение температуры воды при обмелении озера или вызванное похолоданием климата. В последнем случае происходит и понижение температуры грунтов; б - промерзание талика связано с уменьшением размера озера в плане или обмеления его прибрежных частей настолько, что среднегодовая температура донных отложений на этих участках становится отрицательной; в - перемещение озера, весьма характерное для блуждающих озер, когда абразия берегов и термокарст на одной стороне озера происходят одновременно с аккумуляцией осадка на другой. Штриховкой на рисунке отмечены области, благоприятные в тепловом отношении и по условиям водного питания для ледообразования при промерзании подозерного талика снизу.

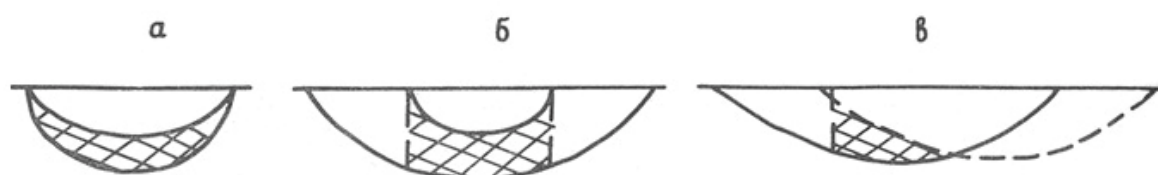


Рис.2. Возможные варианты промерзания талика под озером (пояснения в тексте).

Математическое описание промерзания талика снизу представляет собой весьма сложную задачу. Решение ее для случаев, изображенных на рис. 2, б, в, связано с необходимостью проведения дополнительных исследований. Для случая, представленного на рис. 2, а, решение можно получить на основе «метода вспомогательных температур», разработанного Г.В. Порхаевым [1964]. Результаты решения задачи промерзания подозерного талика снизу, проведенного нами на основе этого метода, показали, что промерзание талика снизу - процесс медленный.

Как известно, малые скорости кристаллизации при достаточном притоке расплава весьма благоприятны для роста больших кристаллов, которые весьма характерны для многих залежей пластового льда. С уменьшением скорости промерзания талика связываем отмечаемое многими исследователями увеличение размеров кристаллов льда пластовой залежи снизу вверх. Изменение размера кристаллов по глубине пласта льда представлено на рис. 3, а. При кристаллооптических исследованиях пластовых льдов на п-ове Ямал, проведенных одним из авторов настоящей статьи совместно с А.А. Васильевым летом 1978 г., было отмечено следующее. В пластовых льдах слоистого сложения, в которых слои льда переслаиваются с тонкими слоями грунта, слой льда состоит из нескольких рядов кристаллов. Чаще всего отмечалось три ряда. Кристаллы среднего ряда самые крупные и наиболее совершенной формы. Поэтому при сравнении размеров кристаллов нужно либо сравнивать кристаллы из сопоставимых рядов, либо давать статистическую характеристику кристаллов всего слоя. Весьма интересным оказалось незначительное расхождение в величине кристаллов льда в пределах одного слоя, независимо от глубины отбора (рис. 3, б), при резком уменьшении размера кристаллов от слоя к слою.

Это связано с тем, что каждый слой льда отражает некоторое положение границы промерзания и соответственно скорости движения границы, равной для каждого слоя, и уменьшающейся при переходе снизу вверх от слоя к слою. При этом в

описываемой залежи отмечалось уменьшение с глубиной толщины слоев льда и увеличение загрязнения льда минеральными примесями.

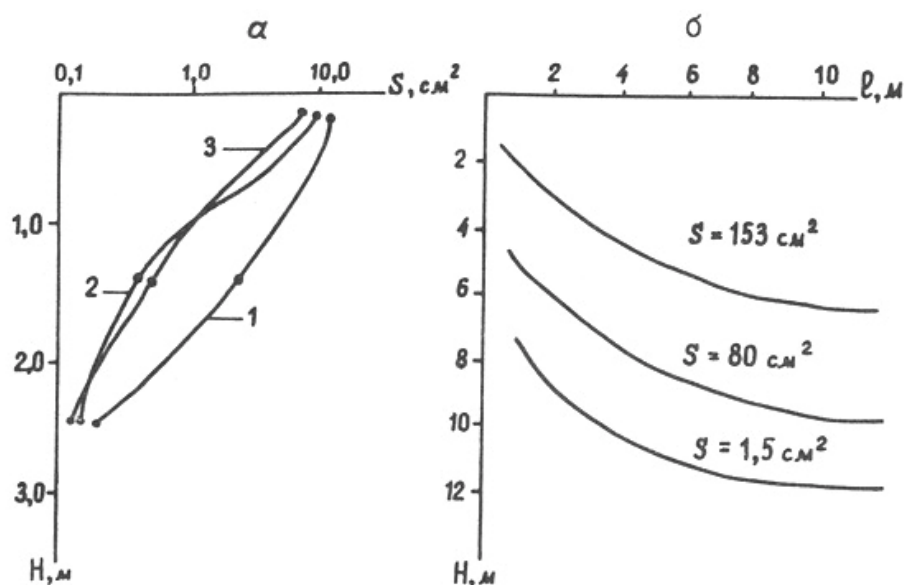


Рис.3. Изменение площади сечения кристаллов льда по глубине пластовой залежи (а) в одном из сечений (б).

1, 2, 3 – различные слои внутри пластовой залежи.

Рассмотренная зависимость изменения размеров кристаллов пластовой залежи не обязательно должна выдерживаться во всех случаях. Закономерно увеличение размеров кристаллов с замедлением промерзания. Однако при промерзании подозерного талика снизу скорость промерзания, начиная с некоторого момента, может даже возрасти. Это связано с тем, что с ростом залежи и выпучиванием талого грунта над ней происходит обмеление озера, уменьшается его размера в плане, понижается среднегодовая температура воды. В результате чего и может произойти увеличение скорости роста льда. Кроме того, процесс формирования пластового льда в соответствии с рассматриваемой нами схемой протекает медленно и на скорость промерзания талика и рост льда влияют климатические изменения и изменения температурного режима грунтов на территории, окружающей озеро, связанные с развитием ландшафта.

Рассматриваемая инфильтрационно-сегрегационная гипотеза позволяет наиболее естественно, с наименьшим числом дополнительных предпосылок объяснить и другие особенности пластовых льдов, а именно зональную приуроченность пластовых льдов к северной геокриологической зоне, невыраженность их в рельефе, химический состав пластовых льдов, сходство между пластовыми льдами и булгуньями.

Выше рассмотрена схема образования пластового льда в природной обстановке. Подобный механизм льдообразования, по нашему мнению, имеет место и в насыпных сооружениях. По этому типу происходит, возможно, формирование пластов и линз льда в плотинах и дамбах, промерзающих со стороны нижнего бьефа при фильтрации воды через тело сооружения.

Литература

Баулин В.В., Дубиков Г.И. Пластовые залежи подземного льда. - Труды ПНИИИС, 1970, т. 2, с. 175-193.

Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. - М.: Наука, 1975. - 213 с.

Горбунов А.П. Некоторые типы подземных льдов Тянь-Шаня. - В кн.: Подземный лед. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1965, с. 205-215.

Григорьев А.А. Вечная мерзлота и древнее оледенение. - В кн.: Вечная мерзлота. Л.: Изд-во АН СССР, 1930, с. 43-104.

Жесткова Т.Н., Шур Ю.Л. О генезисе пластовых льдов. - Вестник МГУ. Сер.геол., 1978, № 3, с. 35-42.

Катасонов Е.М. Криогенные текстуры, ледяные и земляные жилы как генетические признаки многолетнемерзлых четвертичных отложений. - В кн.: Вопросы криологии при изучении четвертичных отложений. М.: Изд-во АН СССР, 1962, с.86-98.

Попов А.И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). - М.: Изд-во Моск.ун-та, 1967. - 302 с.

Порхаев Г.В. Метод вспомогательной температуры. - В кн.: Тепло-физика промерзающих и протаивающих грунтов. - М.: Наука, 1964, с. 160-172.

Романовский Н.Н. Сингенетическое промерзание отложений. - В кн.: Общее мерзловедение / Под ред. В.А.Кудрявцева. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1978, с. 311-316.

Соловьев П.А. Лед в вечномерзлых грунтах в районе поселка Анадырь. - В кн.: Недра Арктики. М.-Л.: Главсевморпуть, 1946, т. II, с. 213-231.

Соломатин В.И. Подземные льды в торфяниках приполярных районов Обско-Тазовского полуострова. - В кн.: Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР. - М.: Изд-во АН СССР, 1963, с.155-160.

Соломатин В.И. Пластовые льды в нижнем течении р. Енисея (на примере разреза Селякино). - В кн.: Проблемы криолитологии. Вып. V, М.: Изд-во Моск.ун-та, 1976, с. 87-94.

Тумель Н.В., Крицук Л.Н. Пластовые подземные льды в районе поселка Кайеркан (Норильский район). - В кн.: Подземный лед. Вып. II. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1965, с. 91-109.

Швецов П.Ф. Подземные воды и ископаемые льды поселка Анадырь и бухты Угольной. - В кн.: Недра Арктики. М.-Л.: Главсевморпуть, 1946. Т. II. С. 204-212.

Ссылка на статью:



Жесткова Т.Н., Шур Ю.Л. **Об инфильтрационно-сегрегационном механизме образования пластовых льдов.** - В кн.: Пластовые льды криолитозоны. Якутск: ИМ СО АН СССР, 1982, с. 105-115.