

ОСОБЕННОСТИ КРИОЛИТОГЕНЕЗА В ПРИСУТСТВИИ ГАЗГИДРАТОВ (НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

А. А. Коновалов

Институт проблем освоения Севера Сибирского отделения РАН, Тюменский индустриальный университет (Тюмень, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 21 января 2017 г.

Обсуждаются особенности криолитогенеза Западной Сибири, обусловленные неоднократной сменой холодных (ледниковых) и теплых эпох, морских трансгрессий и регрессий в четвертичный период, а также наличием скоплений газа, в том числе в гидратной форме. Показано, что в позднем плейстоцене (в холодные эпохи) климат благоприятствовал образованию и сохранению всего криогенного комплекса, не только мерзлых горных пород, но и газгидратов. В голоцене, особенно в период его оптимума, и те и другие в значительной степени деградировали, область их существования сдвинулась далеко на север, оставив многочисленные физические и морфометрические следы своего прежнего широкого распространения: термокарстовые озера, лессовые грунты, клиновидные и пластовые грунтовые текстуры.

Ключевые слова: криолитозона, льдообразование, газгидраты, трансгрессии и регрессии моря, переохлаждение, прочность, просадочность.

О криолитозоне Западной Сибири

Особенности криолитозоны Западной Сибири обусловлены в основном двумя факторами:

- неоднократной сменой холодных (ледниковых) и теплых эпох, а также морских трансгрессий и регрессий в четвертичный период;
- наличием скоплений газа, в том числе в гидратной форме.

В тундре и лесотундре вечномерзлые породы имеют сплошное распространение, их мощность увеличивается от 250—300 м на широте Полярного круга до 500—550 м на 70° с. ш.

Южная граница сплошной вечной мерзлоты лежит в лесотундре и примерно совпадает с изолинией индекса тепла (сумм положительных температур) $\Sigma_5 = 1000$. К югу от Полярного круга примерно до широты 63° вечномерзлые породы имеют двухслойное строение. Верхний слой прослеживается до глубины 30—80 м, в интервале глубин (40—80)—150 м располагаются тальные породы, подстилаемые вторым слоем вечной мерзлоты, мощностью до 200—300 м. Иногда в разрезе криолитозоны чередуются несколько мерзлых и талых слоев. Нижний (обычно второй) слой считается реликтовым, оставшимся от холодной эпохи, предшествовавшей климатическому оптимуму в голоцене. При последующем

похолодании оттаявшие породы вновь промерзли на 30—80 м.

В более южных районах (63—60° с. ш.) сохранился только нижний («реликтовый») слой вечной мерзлоты. Кровля его залегает на глубине 150—230 м, а подошва опускается до 400—500 м [1].

В пограничной области между многолетнемерзлыми и тальми грунтами широко распространены лессовидные грунты преимущественно плейстоценового возраста, прошедшие в своем развитии стадию криогенеза. Их отличительными свойствами являются макропористость и просадочность при замачивании. Просадочность (разность высот образцов грунта до замачивания и после, отнесенная к высоте до замачивания) лессов хорошо объясняет криогенная теория, основные представления которой сводятся к следующему [2]. При замерзании дисперсных грунтов влага подтягивается к фронту кристаллизации и увеличивает свой объем, создавая давление на стенки пор. В результате происходят дробление твердых частиц и коагуляция коллоидов, приводящие к увеличению размеров пор. Одновременно формируются коллоидно-солевые структурные связи, достаточно жесткие в сухой (ледяной) среде, но нестойкие во влажной. Затем грунт частично обезвоживается за счет испарения оттаявшего при положительных температурах льда или его сублимации. Просадочность является

следствием растворения и раз­мыва водонестойких структурных связей обезвоженного грунта при вторичном замачивании (при под­топлении территории, аварийном сбросе воды промышленными предприятиями и т. п.), а большие значения пористости (35—55%) и просадочности (10—20%) объ­ясняются высоким содержанием в мерзлом грунте в плейстоцене газа, в том числе в гидратном со­стоянии [3].

Текстура мерзлых грунтов со­храняется после их оттаивания в течение длительного времени при нагрузках до 0,4 МПа. Поэтому лессовые грунты, их свой­ства и особенности строения свидетельству­ют о наличии в прошлом многолетней мерзлоты и газгидратов.

Влияние давления и засоленности

Многорядное строение криолитозоны может возникнуть не только в результате изменений климата, но и под воздействием менявшихся в ходе транс­грессий и регрессий моря давления и засоленности донных отложений. Увеличение давления и засоленности горных пород в результате трансгрессии моря вызывает понижение температуры фазового равнове­сия влаги и оттаивание мерзлоты, и наоборот. Основное влияние в общем оказывает засоленность — температура замерзания понижается примерно на 0,75°C при повышении концентрации раствора на 1%. Но для открытых и сжимаемых систем большое значение имеет и давление. Понижение температу­ры замерзания (и оттаивания) t_{ϕ} в них доходит до 0,9—1,0 °C/МПа, а в среднем колеблется в преде­лах 0,23—0,4 °C/МПа. Установлено [4], что зави­симости относительной температуры замерзания грунтовой влаги $\theta = t_{\phi}/t_{\phi}^m$ от относительных давления $H = P/P_m$, где $t_{\phi}^m \approx -22^{\circ}\text{C}$, $P_m \approx 220$ МПа — макси­мальные температура и давление, при которых еще возможно существование обычной воды, и концен­трации растворенных солей $K = Z/Z_{\text{эв}}$, где Z и $Z_{\text{эв}}$ — текущая и эвтектическая концентрации раствора, и их формулы идентичны (рис. 1). При определении температуры замерзания засоленного грунта θ при­нимается равной t_{ϕ}/t_{ϕ}^m .

Динамика температурного поля криолитозоны севера Западной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене в зависимости от давления и засоленности исследовалась на компьютерной модели [5]. Исследования показали зависимость типа криогенной ярусности от направленности изменения засо­ленности. Криогенная ярусность типа «талый слой — мерзлый слой — талое основание» возникает при уменьшении засоленности с глубиной. Криогенная ярусность типа «мерзлый слой — талый слой — мерзлый слой — талое основание» появляется при

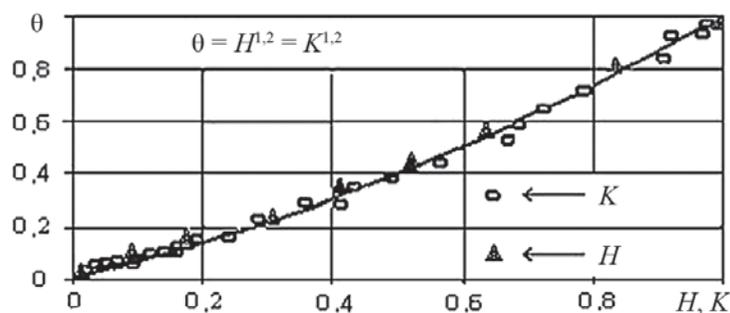


Рис. 1. Зависимость θ от $H = P/P_{\text{эв}}$ и $K = Z/Z_{\text{эв}}$

увеличении засоленности с глубиной. Криогенная ярусность практически не образуется в незасолен­ных грунтах. Под дном моря они сохраняют свое твердомерзлое состояние. Возможно лишь незначи­тельное их оттаивание, что зафиксировано расчетом в начале казанцевской трансгрессии (около 150 тыс. лет назад). Многорядное строение криолитосферы формируется на начальных стадиях транс- и регрес­сивных этапов длительностью 5—7 тыс. лет как ре­зультат запаздывания реакции среды на изменение внешних условий. В дальнейшем тепловое состоя­ние породы и измененные внешние условия уравниваются. В предельных случаях, фактически через 15—20 тыс. лет, либо образуется сплошная толща мерзлоты на талом основании — в холодные регрессивные эпохи, когда температуры поверхно­сти ниже температуры фазового равновесия, либо мерзлота полностью оттаивает в трансгрессивные эпохи, когда соотношения температур обратные.

Роль барического фактора в «жизни» криоли­тозоны существенно возрастает в присутствии газгидратов.

Газгидраты в криолитозоне

Газгидраты образуются при низких температурах и высоких давлениях в водо- и газонасыщенных сре­дах. Благоприятными термобарическими условиями их стабильного существования обладают криолито­зона и придонные отложения Мирового океана. По цвету и текстуре газгидраты похожи на мерзлый грунт. Сходство газгидратов со льдом сильно за­трудняет их выделение среди ледяных образований. Распознать их можно только по запаху и горючести «газгидратного» льда. Похожи и многие физические свойства. При образовании и льда и гидратов вы­деляется тепло, вода мигрирует к фронту затвер­девания, увеличивается объем соответственно на 9% и 26—32%. Один объем воды при гидратации связывает 70—300 объемов газа, развивая огром­ные давления (до сотен мегапаскалей), способные деформировать и разрывать металлические тру­бы. В газгидратоносных отложениях всегда име­ется некоторое количество газа, не включенного в структуру газгидрата, подобно незамерзшей воде

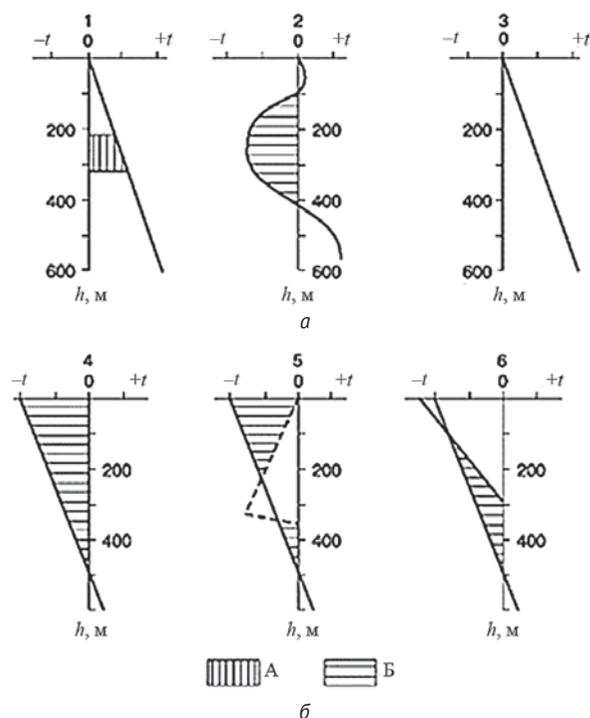


Рис. 2. Принципиальная схема образования многоярусного криогенного строения горных пород при разложении газгидратов (а) и при разной засоленности (б): 1–3 – ход температуры t по глубине h : 1 – до разложения газгидрата, 2 – в процессе и непосредственно после разложения, 3 – спустя геологически длительное время; 4–6 – ход по глубине температуры не засоленного грунта (сплошная линия) и температуры замерзания засоленного (штриховая линия): 4 – грунт не засолен, 5 – степень засоленности сначала увеличивается, а затем падает, 6 – степень засоленности с глубиной уменьшается); А – газгидратная залежь, Б – мерзлая порода

в мерзлых грунтах. Прочность и долговечность льдо- и газгидратонасыщенных грунтов — сопоставимые величины [6].

Наблюдениями установлены значительное содержание газа в деятельном слое и его сезонный характер. В 20–30-сантиметровом слое зимой газа больше, чем летом, — в торфах в 9 раз, в суглинках в 4 раза. Зато летом в 10–100 раз увеличивается содержание газа (метана) в приземном воздухе [7]. В талом пространстве между промерзающим сверху и мерзлым снизу пластами грунта развиваются высокие давления и тем самым создаются благоприятные условия образования газгидратов. Во льду Байкала обнаружены сезонные газгидраты [6]. В [8] описывается местность в китайской провинции Ляонин с аномальными температурами поверхностного слоя грунта $+17^{\circ}\text{C}$ зимой и -12°C летом. Жители зимой используют его для посадки овощей, а летом как холодильник. Этот феномен объясняют газоносностью района и приуроченностью к тектоническому разлому, по которому летом идет расширение, а зимой сжатие

земной коры. Через трещины, образующиеся при расширении, газ выходит на поверхность, охлаждаясь за счет дроссельного эффекта и понижая температуру грунта. Зимой трещины закрываются, перекрывая ток газа, температура в охлажденной зоне стремится к температуре воздуха. Январская температура воздуха здесь равна $-8\text{...}-10^{\circ}\text{C}$. Следовательно, в этих же пределах, на 2–3 $^{\circ}\text{C}$ выше за счет тепляющего влияния снега, установилась бы и температура у поверхности грунта (примерно $-5\text{...}-7^{\circ}\text{C}$, но никак не $+17^{\circ}\text{C}$). Более вероятной причиной этих аномалий являются тепловыделение из образующегося газгидрата зимой и поглощение тепла разлагающимся газгидратом летом.

При повышении температуры и (или) понижении давления газгидраты, как и лед, «разжижаются», разлагаясь на газ и воду, поглощая тепло и тем самым охлаждая окружающее пространство. При температуре фазового превращения $t_{\phi} < 0^{\circ}\text{C}$ это приводит к замерзанию выделившейся воды и охлаждению окружающего грунта вплоть до его перехода в мерзлое состояние. Промерзший грунт препятствует выносу газа в атмосферу и останавливает дальнейшее разрушение газгидрата. Газопроницаемость мерзлых грунтов зависит от льдонасыщенности и температуры. Чем больше льдонасыщенность и ниже температура (меньше незамерзшей воды), тем меньше проницаемость. Льдонасыщенный грунт практически непроницаем [7]. Образование льдогрунтовой оболочки газгидрата называется самоконсервацией [6]. Стабильное существование газгидрата под толщей мерзлого грунта обеспечивается при равенстве его внутреннего давления весу этой толщи. Газгидраты, в свою очередь, и сами часто служат крышкой газовой залежи.

Увеличение давления на газо- и льдонасыщенный грунт приводит к оттаиванию подземного льда и образованию газгидратной залежи. Такая залежь могла образоваться и в талом газо- и водонасыщенном слое, заключенном между «современным» и «реликтовым» мерзлыми слоями криолитозоны севера Западной Сибири в плейстоцене во время трансгрессии моря. Затем, во время регрессии моря и понижения в связи с этим внешнего давления, она разложилась, оставив после себя талый водо- и газонасыщенный слой, который позже промерз. Вполне вероятно, что этот механизм имеет отношение к образованию пластовых льдов, широко распространенных в мерзлых лессовидных отложениях Крайнего Севера. То есть в присутствии газгидратов возможно неклиматическое происхождение «вечной мерзлоты».

На рис. 2 приведены предполагаемые (теоретически возможные) схемы образования мерзлых и талых ярусов при разложении газгидратной залежи (А) после изотермического падения давления и разной степени засоленности грунтов (Б). Сплошные линии — графики хода по глубине температуры грунта, пунктирные — температуры замерзания грунта.

Точки их пересечения маркируют границы мерзлых и талых слоев.

Три графика на рис. 2а отображают начальную (1), главную (2) и конечную (3) стадии динамики разложения газгидрата после изотермического падения давления (при регрессии моря) и последующем его постоянстве. На главной стадии происходит разложение газгидрата с понижением температуры и переход его в новую фазу: воду (и газ) или лед (и газ). Последнее реализуется в условиях отрицательных начальных температур либо положительных, но достаточно быстрых скоростей понижения давления и малых геотермических градиентов. В дальнейшем температуры выравниваются и приходят в соответствие с геотермическим градиентом и температурой окружающего пространства. В предельном случае, т. е. при времени, стремящемся к бесконечности (геологически длительном), если граничные условия, включая новое значение давления, не меняются, температуры грунта принимают первоначальные значения.

На трех графиках (4, 5, 6) рис. 2б показаны основные типы мерзлотной ярусности, формирующейся в разных условиях засоленности. Если пунктирная линия правее сплошной (температура замерзания выше температуры грунта), то между ними мерзлота (заштрихована), если левее, то талый грунт. График 4 отвечает однородному тепловому состоянию, характерному для незасоленного грунта, когда вечномерзлый массив заключен между поверхностью и нулевой изотермой. На графике 5 засоленность с глубиной сначала увеличивается, а потом уменьшается. В этом случае единый мерзлый массив разбивается на два слоя, разделенных талым (но с отрицательной температурой) прослоем. На графике 6 засоленность с глубиной падает, температура замерзания понижается. Здесь, наоборот, талый массив разделен мерзлым прослоем.

Типичными элементами ландшафта Ямала являются термокарстовые озера. Вполне возможно, что по крайней мере часть из них появилась на месте газгидратных (газовых) залежей под кровлей мерзлого грунта, разложившихся в результате потепления климата или уменьшения внешнего давления (при отступлении моря или ледника, оползней) с образованием большой массы воды и газа. Газ ушел в атмосферу, а вода осталась и в дальнейшем пополнялась за счет летних осадков и таяния снега. Этот механизм действует и в настоящее время. В [9—11] описываются современные «воронки взрыва». Так в геологии называется «особый тип вулкана, в котором жерло создано сильным взрывом газов, пробивших канал до земной поверхности»; выброшенные обломки породы образуют кольцевой вал (бруствер) вокруг воронкообразного устья жерла. Газовзрывной механизм (взрывоопасной является 5—16%-ная концентрация метана в воздухе) представляет очевидную угрозу человеку и биоте в целом, особенно вблизи населенных мест. В журнале «За рубежом»

№ 39 за 1986 г. сообщалось о трагедии в Камеруне. Вырвавшееся из озера Ниос облако углекислого газа накрыло прибрежную долину. В течение ночи было уничтожено все живое в радиусе около 20 км; погибло 1700 человек. Среди возможных причин называют расположение озера в кратере вулкана, на дне которого под гидратной оболочкой образовалась газовая залежь. В результате землетрясения или оползня газгидратная оболочка разрушилась, и произошло бурное выделение газа.

Даже медленное сезонное (в теплое время года) частичное разрушение газгидратов оборачивается экологическим бедствием. Повторяющиеся из года в год лесные пожары летом в значительной степени являются следствием выхода газа из нагревающихся газгидратов (или «дыхания» растений) и его возгорания. Например, в результате такого пожара в 1642 г. полностью выгорела легендарная Мангазее — порт и крупнейший торговый центр Арктики того времени [12].

Закономерности льдо- и газгидратообразования

Термобарические условия существования льда и газгидратов определяются уравнением фазового равновесия Клапейрона — Клаузиуса. Для льда (мерзлого грунта) удобно использовать его линейную модификацию [13]:

$$t_{\phi} = \frac{P j_{\phi} T_0}{Q_{\phi} \rho_{\text{в}}} = -AP, \quad (1)$$

где t_{ϕ} (°C) и P (МПа) — равновесные температура и давление фазовых превращений; j_{ϕ} — объемная относительная деформация при фазовых переходах (у льда 0,08—0,09, у мерзлого грунта 0,11—0,13 [14]); T_0 (K) — температура плавления льда при атмосферном давлении; $Q_{\phi} = 334$ кДж/кг — скрытая теплота кристаллизации (плавления); $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды, кг/см³; $A = j_{\phi} T_0 / Q_{\phi} \rho_{\text{в}}$ для воды $A = 0,076$ °C/МПа, для большинства грунтов $A \approx 0,1$ °C/МПа.

Природный газ в основном состоит из метана (80—98%) и углекислого газа. На рис. 3а и 3б показаны экспериментальные значения равновесных (стабильных — 1 [6] и метастабильных — 2 [15]) фазовых температур как функций давления для метана CH₄ и углекислого газа CO₂ и их наиболее достоверные (коэффициент детерминации $R_2 > 0,98$) аппроксимации. Температуры на вертикальных осях графиков отложены в кельвинах (слева) и градусах Цельсия (справа). Расчеты показали, что эта зависимость, записанная для определения давления по известной температуре, с несколько меньшей, но также приемлемой достоверностью ($R_2 = 0,94$) аппроксимируется более простым линейным выражением

$$P = aT + \bar{b}, \quad (2)$$

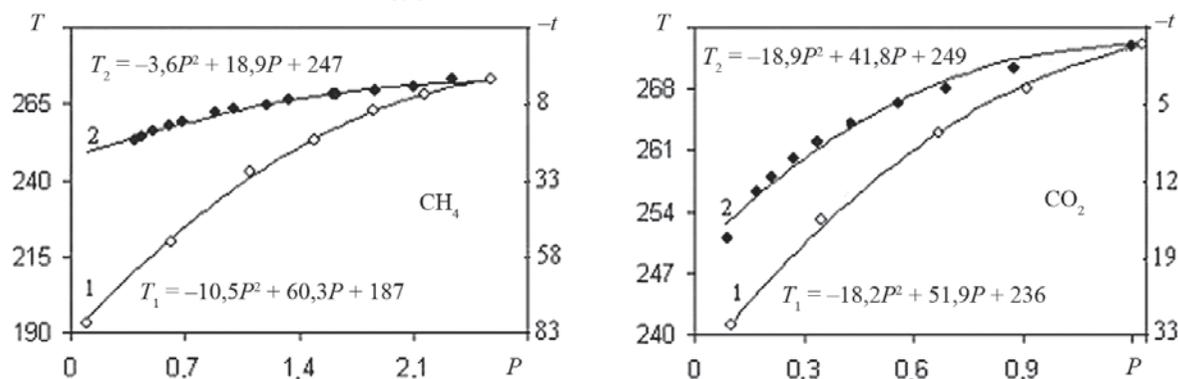


Рис. 3. Барическая зависимость равновесных температур гидратов метана CH_4 и углекислого газа CO_2 (пояснения в тексте)

где a (МПа) и b (МПа/К) — численные коэффициенты, равные для стабильных газгидратов 0,03 и $-5,75$ для CH_4 , 0,03 и $-8,21$ для CO_2 .

В отличие от кристаллизации воды при гидратации газа температура с увеличением давления растет как в стабильном (замерзающем — нижние кривые на рис. 3), так и метастабильном (переохлажденном — верхние кривые) состоянии.

Используя формулы T_1 и T_2 , найдем на рис. 3 соотношения температур газгидратообразования и переохлаждения воды, выделившейся из тающего газгидрата. Разделив их друг на друга, после обработки получаем:

- для CH_4 ($R^2 = 0,95$):

$$T_1/T_2 = 0,09P + 0,79; \quad (3)$$

- для CO_2 ($R^2 = 0,95$):

$$T_1/T_2 = 0,06P + 0,94. \quad (4)$$

Метастабильное состояние характерно для начальной, неявной стадии затвердевания жидкости, когда в условиях переохлаждения ниже t_ϕ без видимых структурных изменений формируются зародыши кристаллов. Природа переохлаждения, его связи с внешними силами и физико-механическими свойствами среды изучены недостаточно. Исследователи часто не придают серьезного значения этой константе, действительно достаточно эфемерной и не всегда проявляющейся, относятся к этому феномену как к досадной помехе в опытах; рекомендуется не допускать переохлаждения, для чего необходимо периодически встряхивать испытуемый образец [13].

Между тем с метастабильным состоянием увязывают ряд важных свойств газгидратов. Например, взрывной характер их разложения при неглубоком залегании [9]; в [15] экспериментально показано, что разложение газгидрата прекращается не только при образовании ледяной оболочки, препятствующей выносу газа, но и при достижении метастабильного состояния, еще в жидкой фазе. То есть кроме «твердой» самоконсервации газгидрата

за счет замерзания выделившейся из газгидрата воды [6] возможна и «жидкая» — на стадии ее переохлаждения.

В качественном плане процесс кристаллизации «газгидратной» воды ничем не отличается от замерзания обычной воды. Рассмотрим его особенности.

Стадии замерзания воды

Формирование структуры льда — каркаса, в ячейках которого формируются зародыши кристаллов, начинается при понижении температуры воды ниже $+4^\circ\text{C}$, когда ее плотность начинает медленно, со скоростью порядка сотых долей процента на градус, убывать, а давление соответственно возрастать. Установление $t = t_{\text{пер}} < t_\phi$ соответствует достижению метастабильного состояния, предшествующего скачкообразному повышению температуры до значения t_ϕ и появлению первых кристаллов.

Переохлаждение создает перепад температур $\Delta t_{\text{пер}} = t_\phi - t_{\text{пер}}$, необходимый для образования фронта кристаллизации (поверхности раздела фаз). За переохлаждением следует объемная кристаллизация в двух отчетливо выделяемых (явных) стадиях (рис. 4). На стадии 1 (так называемом плато) при постоянной температуре t_ϕ замерзает вся свободная (несвязанная) вода. На стадии 2 при понижающейся t_ϕ замерзает рыхлосвязанная влага, здесь каждой t_ϕ соответствует определенное количество незамерзшей воды. К концу стадии при достаточно низкой температуре охладителя $t_{\text{ох}}$ (температуре дневной

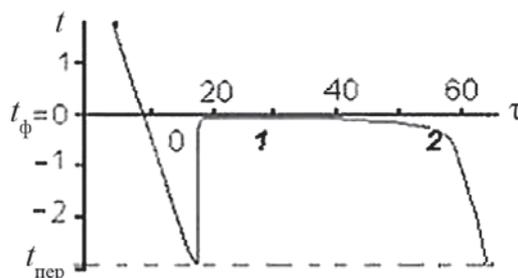


Рис. 4. Стадии перехода жидкости в твердую фазу (0 — переохлаждение, 1, 2 — кристаллизация)

поверхности в натуральных условиях или температуре холодильной камеры в лаборатории) устанавливается твердомерзлое состояние, характеризующееся температурой $t_{\text{TM}} \approx t_{\text{пер}} \geq t_{\text{ок}}$. На графике на рис. 4 показано, что вообще каждую температуру при переохлаждении талого грунта (на левой полой кривой) можно сопоставить с равной ей температурой мерзлого грунта (на правой кривой), определяющей его прочность и другие физические свойства. То есть величина $t_{\text{пер}}$ еще на стадии переохлаждения талого грунта как бы предсказывает («подсказывает» наблюдателю), какая температура и соответственно какие механические свойства (прочность и др.) будут у данного грунта, когда он промерзнет.

Чем ниже температура охладителя, тем меньше период переохлаждения $\tau_{\text{пер}}$. При низких $t_{\text{ок}}$ величина $t_{\text{пер}}$ становится меньше разрешающей способности стандартных измерительных приборов, и весь участок переохлаждения из-за его малости не фиксируется наблюдениями. Для примера в табл. 1 приведены результаты наших (совместных с Л. Т. Роман) опытов по определению $t_{\text{ф}}$ и $t_{\text{пер}}$ заторфованных глинистых грунтов при разных $t_{\text{ок}}$. Из данных табл. 1 видно, что с понижением $t_{\text{ок}}$ область переохлаждения сокращается и при $t_{\text{ок}}$ около -6°C уходит за пределы «видимости» измерительных приборов.

Детальные исследования зависимости $t_{\text{пер}}$ от $\tau_{\text{пер}}$ выполнил С. Е. Гречищев с соавторами [16]. Эту зависимость можно выразить приближенной формулой [4]

$$\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{мин}}} = \left(\frac{\tau_{\text{пер}}}{\tau_{\text{мин}}} \right)^g, \quad (5)$$

где $t_{\text{мин}}$ и $\tau_{\text{мин}}$ — минимальные температура и период переохлаждения в опыте; $g \approx 0,09$ — относительное изменение объема воды при замерзании.

С помощью формулы (5) можно установить минимальную температуру охлаждения $t_{\text{ок}}$, при

Таблица 1. Связь $t_{\text{ок}}$, $t_{\text{пер}}$ и $t_{\text{ф}}$ заторфованных глинистых грунтов

Характеристика	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5	Опыт 6
$t_{\text{ок}}$	-3,2	-5,8	-6,4	-8	-9,8	-17,7
$t_{\text{пер}}$	-2,4	-2,5	—	—	—	—
$t_{\text{ф}}$	-0,1	-0,1	-0,11	-0,12	-0,12	-0,27

Таблица 2. Температуры в промерзающем грунте при $W_c = 20\%$ (t_1) и $W_c = 8\%$ (t_2)

τ , мин	0	5	6	7	8	44	45	51
$-t_1$	0,6	1,6	<u>1,8</u>	0,1	0,06	0,06	0,1	0,2
τ , мин	0	6	7	8	9	10	31	35
$-t_2$	1,3	2,2	<u>2,4</u>	1,5	1,3	1,2	1,2	1,35

Примечание. Подчеркнуты $t_{\text{пер}}$, жирным шрифтом выделены температуры на первой стадии (участок с $t_{\text{ф}} \approx \text{const}$).

которой еще наблюдается (улавливается приборами) величина $t_{\text{пер}}$. Примем условия одного из опытов [16]: суглинок с влажностью 26,2%, $t_{\text{ф}} = -0,4...-0,5^{\circ}\text{C}$, $g \approx 0,1$, $t_{\text{мин}} = -3,3^{\circ}\text{C}$ и $\tau_{\text{мин}} = 30$ с. Расчет по формуле (5) дает: при $t_{\text{пер}} = -4,6^{\circ}\text{C}$ величина $\tau_{\text{пер}} = 1$ с, при -5°C она равна 0,43 с, а при -8°C — всего 0,004 с. Ясно, что в данном случае $t_{\text{пер}}$ фиксируется при $t_{\text{ок}}$ не ниже -5°C . Если $t_{\text{ок}}$ ниже температуры твердомерзлого состояния грунта t_{TM} (у суглинков $t_{\text{TM}} \approx -6...-8^{\circ}\text{C}$), переохлаждение не наблюдается.

При повышении $t_{\text{пер}}$ растет и $\tau_{\text{пер}}$. В том же опыте, но с $t_{\text{пер}} = -1^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{пер}}$ равно уже около 2 мес и далее быстро увеличивается, стремясь к бесконечности. Подобные результаты получились и в опытах с газгидратами [15]: период кристаллизации переохлажденной воды, образующейся при их диссоциации, зависел от величины $t_{\text{пер}}$, изменяясь от десятков часов при $t_{\text{пер}} = -3^{\circ}\text{C}$ до нескольких секунд при $t_{\text{пер}} = -23^{\circ}\text{C}$. При более низких температурах переохлаждение не фиксируется из-за малости $\tau_{\text{пер}}$, сразу происходит кристаллизация диссоциата.

В обратном процессе — переходе твердой фазы в жидкую — метастабильная стадия не реализуется, в ней нет необходимости, так как в мерзлом грунте практически при любой температуре есть незамерзшая вода, т. е. поверхность раздела фаз всегда присутствует.

Количество образующегося льда в водонасыщенной среде лимитировано сжимаемостью льда и воды и воздушной пористостью. При недостаточном (для расширения воды до плотности льда) объеме «пустого» пространства льдовыделение прекращается, а давление незамерзшей воды увеличивается. Следующая порция льда может образоваться только при его понижении или удалении части воды. В процессе промерзания грунт как бы постепенно подсыхает. В табл. 2 приведен фрагмент хода температуры грунта в наших опытах по замораживанию образцов водонасыщенного ($W_c = 20\%$) и подсушенного ($W_c = 8\%$) суглинка при $t_{\text{ок}} = -6^{\circ}\text{C} = \text{const}$. Из него видно, что в маловлажном грунте также присутствует свободная вода, замерзающая при некоторой постоянной температуре, с предварительным переохлаждением.

Процесс кристаллизации на стадии 1 (участок с постоянной температурой) также носит дискретный характер. Он состоит из серии

микроактов, каждый из которых заканчивается микровзрывом, сопровождающимся высвобождением части сжатой влаги, понижением давления и замерзанием новой порции влаги [17]. То есть при использовании измерительных приборов, способных фиксировать микропроцессы, протекающие с большой скоростью, сплошная (сглаженная) кривая кристаллизации 1—2 на рис. 4 становится ступенчатой.

О льдообразовании при диссоциации газгидратов, фактор времени

Как видно из рис. 3, температура кристаллизации воды, выделившейся из газгидрата, может достигать очень больших (по модулю) величин, до -83°C у гидрата метана. Эти температуры равновесны атмосферному давлению у дневной поверхности $P = 0,1$ МПа. Такое понижение температуры у поверхности газгидратной залежи возможно только при мгновенном, катастрофическом изменении внешнего давления. Резко, практически скачкообразно изменяется давление при землетрясениях, извержениях вулканов, сдвигах и других эндогенных процессах катастрофического характера.

Большинство геолого-географических процессов, приводящих к изменению природного давления (наступление и сход морей и ледников, осадконакопление и денудация, тектонические движения и др.), протекают медленно, эволюционно, внешне проявляясь поднятием или опусканием дневной поверхности. Максимальные скорости изменения толщины ледниковых покровов в плейстоцене составляли порядка 0,3 м/год, глубины моря — 0,015 м/год. Максимальные амплитуды колебания уровня поверхности ледника — 3000 м, моря — 600 м, что соответствует перепадам давления в 6 и 30 МПа [18]. На порядки быстрее изменяется горное давление в результате инженерной деятельности — при разработке месторождений полезных ископаемых, подземном строительстве, водоснабжении и т. д.

Равновесные температуры разложения газгидратов, приведенные на графиках рис. 3, — это максимально возможные, предельные температуры. Они не учитывают кинетику разложения. Инерционные свойства реальной среды — вязкость, внутреннее трение, сжимаемость, теплоемкость и др. — вызывают запаздывание установления равновесия среды с изменившимися внешними условиями, растягивание фазовых превращений во времени. Поэтому при уменьшении давления температура разложения газгидрата, равновесная новому давлению, устанавливается (понижается) постепенно, и газгидрат может полностью разложиться еще при положительных температурах. Эффект запаздывания установления равновесной температуры в естественных условиях усугубляется при небольших скоростях падения давления на газгидрат при отступлении моря (или ледника). В опытах, описанных в [6], температура разложения метаногидрата при давлении, равном атмосферному, не опускалась ниже $-7...-12^{\circ}\text{C}$.

Коротко говоря, уравнения и диаграммы фазового равновесия давления и температуры типа (1) или приведенных на рис. 3 не учитывают фактор времени.

Примем, что бесконечно малые изменения долговечности (времени до разрушения) и работы разрушения (плавления) мерзлого грунта, отнесенные к своим максимумам, равны. Перепишем это равенство в интегральной форме:

$$\int_{\tau_3}^{\tau_3} \frac{1}{t} dt = \frac{1}{j_{\phi}} \int \frac{1}{P_m} dP, \quad (6)$$

где τ_3 — элементарный (минимальный, условно неделимый) отрезок времени («мгновение») порядка минут [14]; P_m — максимальная (мгновенная) прочность, соответствующая минимуму долговечности τ_3 ; $j_{\phi} = 0,08$ — относительное изменение объема при таянии льда (мерзлого грунта), $j_{\phi} \approx 0,1—0,13$ [14].

После интегрирования и несложного преобразования (6) с учетом (1) получаем формулу, по которой определяется долговечность мерзлого грунта при заданной нагрузке или его длительная прочность на заданное время как функции температуры или давления:

$$\frac{P}{P_m} = \frac{PA}{t} = \frac{t_{\phi}}{t} = \left(\frac{t_3}{t} \right)^{j_{\phi}}. \quad (7)$$

Формула (7) — это по сути развернутое во времени уравнение Клапейрона — Клаузиуса, в которое она обращается при $\tau_{\text{д}} = \tau_3$. Анализ показал ее хорошую сходимость с фактическими данными. Например, в табл. 3 приведены значения относительной прочности супеси P/P_m при $t = -10^{\circ}\text{C}$ при разной долговечности t (мин), полученные при различных видах испытаний экспериментально [14] и рассчитанные по формуле (7) при $j_{\phi} = 0,11$ и $\tau_3 = 1$ мин.

Таблица 3. Зависимость P/P_m от τ (мин) при сжатии (1), растяжении (2), сдвиге (3) и расчет по формуле (7) (4)

τ	При сжатии	При растяжении	При сдвиге	Расчет по формуле (7)
1	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,84	0,79	0,78	0,78
60	0,65	0,61	0,61	0,63
180	0,56	0,55	0,54	0,56
480	0,5	0,5	0,5	0,51
720	0,49	0,48	0,47	0,48

Из сравнения формул (5) и (7), описывающих образование и разрушение ледяного тела, видно, что они отличаются противоположным характером связи температуры и времени: чем ниже температура, тем короче эмбриональная (скрытая) фаза ледяной структуры, но длиннее период ее явного существования, и наоборот. Определенное соответствие температуры переохлаждения температурам кристаллизации и плавления позволяет использовать параметр $t_{\text{пер}}$ в ориентировочных расчетах долговечности по формуле (7) при подстановке в нее $t_{\text{пер}}$ вместо t :

$$\left(\frac{t_{\text{д}}}{t_{\text{э}}}\right)^{j_{\text{ф}}} = \frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ф}}}. \quad (8)$$

Можно полагать, что формулы (7) и (8) актуальны (хотя бы в первом приближении) и для газгидратов при подстановке в них соответствующих физических констант.

Антиномия газгидратов и льда как экологический фактор

Противоположная направленность фазовых превращений газгидратов и льда при изотермическом изменении давления (при его понижении ниже равновесного значения газгидраты переходят в жидкую фазу, а вода — в твердую, и наоборот) приводит к тому, что эти в общем родственные природные образования становятся антиподами, появление и накопление одного ведет к разрушению другого. Но существует предел, за которым возникает обратная отрицательная связь, приводящая взаимодействующие антиподы к динамическому равновесию (принцип Ле Шателье — Брауна).

В некоторых климатических моделях допускается возможность прогрессирующего (необратимого) развития процесса потепления климата (возникновения положительной обратной связи или цепной реакции) при разложении газгидратных залежей за счет того, что выделившийся газ при поступлении в атмосферу вызовет «парниковый» эффект, усиливающий первоначальное потепление климата и еще большую эмиссию газа и затем еще большее потепление и т. д. Ввиду антиномии газгидрата и льда это вряд ли произойдет — неограниченному выносу газа в атмосферу воспрепятствует «мерзлотный экран», образующийся при разрушении газгидратов. Об этом косвенно свидетельствуют данные о составе древнего воздуха в кернах антарктического льда [19]. В начале теплых, межледниковых эпох при интенсивном разрушении (оттаивании) криогенного комплекса — льда, мерзлых грунтов и газгидратов — резко возрастало количество газа в атмосфере. Затем по мере создания мерзлотного экрана оно постепенно уменьшалось, достигая минимума к началу нового оледенения. За последние примерно 130 тыс. лет прослеживается три таких криоцикла.

Заклучение

В позднем плейстоцене (в холодные эпохи) климат благоприятствовал образованию и сохранению всего криогенного комплекса, не только мерзлых горных пород, но и газгидратов. В голоцене, особенно в период его оптимума, и те и другие в значительной степени деградировали, область их существования сдвинулась далеко на север, оставив многочисленные физические и морфометрические следы своего прежнего широкого распространения: термокарстовые озера, лессовые грунты, клиновидные грунтовые текстуры, повторяющие форму жильных льдов, и др.

Газонасыщенность мерзлых грунтов, наличие газгидратов, особенно при неглубоком их залегании, в условиях современного потепления климата создает экологические риски — опасность пожаров, «воронки взрыва», термокарст, обвалы и просадки грунта... Изложенные результаты позволяют хотя бы в первом приближении дать им количественную оценку.

Литература

1. Ершов Е. Д. Общая геокриология. — М.: Недра, 1990. — 559 с.
2. Лессовые породы СССР. — Т. 1 / Под ред. Е. М. Сергеева. — М.: Недра, 1986. — 276 с.
3. Коновалов А. А. О природе просадочности лесовых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 1997. — № 1. — С. 90—95.
4. Коновалов А. А. О фазовом равновесии и прочности мерзлых грунтов (единая модель). — North Carolina, USA: Lulu Press, 2016. — 151 с.
5. Коновалов А. А., Данилов И. Д. Трансгрессии и регрессии Арктического бассейна как причина многослойного строения мерзлых толщ Севера Западной Сибири // Криосфера Земли. — 1999. — Т. 3, № 2. — С. 33—39.
6. Истомин В. А., Якушев В. С. Газовые гидраты в природных условиях. — М.: Недра, 1992. — 236 с.
7. Оловин Б. В. Фильтрационная проницаемость вечномерзлых грунтов. — Новосибирск: Наука, 1993. — 256 с.
8. Бзатов В. И. Происхождение многолетнемерзлых пород // Совет. геология. — 1990. — № 8. — С. 32—38.
9. Аржанов М. М., Мохов И. И., Денисов С. Н. Дестабилизация реликтовых метангидратов при наблюдаемых региональных изменениях климата // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 4. — С. 30—33.
10. Божьявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 12—18.
11. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. — 2016. — № 2. — С. 15—24.
12. Белов М. И. По следам полярных экспедиций. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 144 с.

13. Лабораторные методы исследования мерзлых грунтов / Под ред. Э. Д. Ершова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. — 351 с.
14. Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов. — М.: Стройиздат, 2000. — 454 с.
15. Решетников А. М. Экспериментальное изучение метастабильных состояний при диссоциации газовых гидратов ниже температуры 273 К: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тюмень, 2010. — 18 с.
16. Гречищев С. Е., Павлов Арк. В., Гречищева О. В. Закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов // Материалы Третьей конференции гео-криологов России. — Т. 1. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. — С. 38—45.
17. Пехович А. И. Основы ледогидротермики. — Л.: Энергия, 1983. — 251 с.
18. Царев В. П. Особенности формирования, методы поиска и разработки скоплений углеводородов в условиях вечной мерзлоты. — Якутск: Якут. кн. изд-во, 1976. — С. 213.
19. Ривкина Е. М., Самаркин В. А., Гиличинский Д. А. Метан в многолетнемерзлых породах Колымо-Индигирской низменности // Докл. РАН. — 1992. — Т. 323, № 3. — С. 726—745.

Информация об авторе

Коновалов Александр Александрович, доктор технических наук, кандидат географических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем освоения Севера Сибирского отделения РАН (625003, Тюмень, а/я 2774), профессор, Тюменский индустриальный университет (625000, Тюмень, ул. Володарского, д. 38), e-mail: Konov7@rambler.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Коновалов А. А. Особенности криолитогеоза в присутствии газгидратов (на примере Западной Сибири) // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 18 — 27. DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-18-27

FEATURES OF CRYOLITHOGENESIS IN THE PRESENCE OF GASHYDRATES (ON EXAMPLE OF WEST SIBERIA)

Konov A. A.

Institute of Problems of Development of the North, Tyumen Industrial University (Tyumen, Russian Federation)

Abstract

Discusses the features of the dynamics of permafrost zone of Western Siberia, due to repeated change of cold (glacial) and warm periods, marine transgressions and regressions during the Quaternary period; as well as the presence of gas accumulations, including those in hydrated form. It is shown that in the late Pleistocene (cold epochs) climate favored the formation and preservation of all cryogenic complex, not only frozen rocks, and gas hydrates. In the Holocene, especially during optimum, both are heavily degraded, their existence has shifted far to the North, leaving numerous physical and morphometric traces of its former wide distribution (thermokarst lakes, loess soils, the wedge-shaped formation and soil textures of the same shape, vitaulic ice formations, etc.). The peculiarities of crystallization of soil moisture in three stages: the latent (hypothermia), which formed the first crystals of ice and two explicit. The first of them at a constant temperature, freeze all free (unbound) water. Second, with decreasing temperatures freeze loosely bound moisture, there corresponds to each temperature a certain amount of unfrozen water. At the end of stage at a sufficiently low cooling temperature is set solid frozen condition, approximately equal to the temperature exposure. It is established that each temperature on the stage of hypothermia thawed soil can be mapped equal to the temperature of freezing of the soil that determines its strength and other physical properties in a frozen state. I. e., the temperature at the stage of supercooling of the melt of ground as it tells the observer, what is its value and, consequently, the stress — deformation condition is in this soil when it freezes. The formula of long-term strength of frozen soil as functions of temperature, pressure, time and relative deformation thawed ice. Shown the General features of the freezing of ground water and water released during dissociation of gas hydrates. For both cases the formulae are obtained when the temperature of crystallization and hypothermia. Analyzed environmental risks associated with climate warming under conditions of high gas content of frozen rocks.

Keywords: cryolithozone, ice formation, gas hydrates, transgressions and regressions of the sea, supercooling, strength, subsidence.

References

1. Ershov E. D. Obshchaya geokriologiya. [General Geocryology]. Moscow, Nedra, 1990, 559 p. (In Russian).
2. Lessovyye porody SSSR. [Loess rocks of the USSR]. Vol. 1. Pod red. E. M. Sergeyeva. Moscow, Nedra, 1986, 276 p. (In Russian).
3. Konovalov A. A. O prirode prosadochnosti lessovykh gruntov. [About the nature of subsidence of loess soils]. Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya, 1997, no. 1, pp. 90—95. (In Russian).
4. Konovalov A. A. O fazovom ravnovesii i prochnosti merzlykh gruntov (edinaya model). [Phase equilibrium and strength of frozen soils (unified model)]. North Carolina, USA, Lulu Press, 2016, 151 p. (In Russian).
5. Konovalov A. A., Danilov I. D. Transgressii i regressii Arkticheskogo basseyna kak prichina mnogoslonoynogo stroyeniya merzlykh tolshch Severa Zapadnoy Sibiri. [Transgressions and regressions of the Arctic basin as the cause of the layered structure of frozen strata of Northern West Siberia]. Kriosfera Zemli, 1999, vol. 3, no. 2, pp. 33—39. (In Russian).
6. Istomin V. A., Yakushev V. S. Gazovyye gidraty v prirodnykh usloviyakh. [Gas hydrates in natural conditions]. Moscow, Nedra, 1992, 236 p. (In Russian).
7. Olovin B. V. Filtratsionnaya pronitsayemost vechno-merzlykh gruntov. [The filtration permeability of the permafrost soil]. Novosibirsk, Nauka, 1993, 256 p. (In Russian).
8. Bgatov V. I. Proiskhozhdeniye mnogoletnemerzlykh porod. [The origin of permafrost]. Sovet. geologiya, 1990, no. 8, pp. 32—38. (In Russian).
9. Arzhanov M. M., Mokhov I. I., Denisov S. N. Destabilizatsiya reliktovykh metangidratov pri nablyudayemykh regionalnykh izmeneniyakh klimata. [Destabilization of methane hydrates relic with observed regional climate changes]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 4, pp. 30—33. (In Russian).
10. Bogoyavlenskiy V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala i Taymyra. [Human peril katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Jamala i Tajmyra]. Bureniye i neft, 2014, no. 9, pp. 12—18. (In Russian).
11. Leybman M. O., Kizyakov A. I. Novyy prirodnyy fenomen v zone vechnoy merzloty. [New natural phenomenon in the permafrost zone]. Priroda, 2016, no. 2, pp. 15—24. (In Russian).
12. Belov M. I. Po sledam polyarnykh ekspeditsiy. [On the trail of polar expeditions]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977, 144 p. (In Russian).
13. Laboratornyye metody issledovaniya merzlykh gruntov. [Laboratory methods of frozen soils]. Pod red. E. D. Ershova. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1985, 351 p. (In Russian).
14. Vyalov S. S. Reologiya merzlykh gruntov. [Rheology of frozen soils]. Moscow, Stroyizdat, 2000, 454 p. (In Russian).
15. Reshetnikov A. M. Eksperimentalnoye izucheniye metastabilnykh sostoyaniy pri dissotsiatsii gazovykh gidratov nizhe temperatury 273 K. [Experimental study of metastable States during dissociation of gas hydrates below the temperature of 273 K]. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Tyumen, 2010, 18 p. (In Russian).
16. Grechishchev S. E., Pavlov Ark. V., Grechishcheva O. V. Zakonomernosti formirovaniya pereokhlazhdeniya porovoy vlagi pri obyemnom zamerzaniy dispersnykh gruntov. [Regularities of formation of supercooling of the pore water while volumetric freezing fine-grained soils]. Materialy Tret'yey konferentsii geokriologov Rossii. Vol. 1. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2005, pp. 38—45. (In Russian).
17. Pekhovich A. I. Osnovy ledogidrotermiki. [The basics of ledgitimate]. Leningrad, Energiya, 1983, 251 p. (In Russian).
18. Tsarev V. P. Osobennosti formirovaniya. metody poiska i razrabotki skopleniy uglevodorodov v usloviyakh vechnoy merzloty. [Features of formation, methods of exploration and development of hydrocarbon accumulations in the permafrost]. Yakutsk, Yakut. kn. izd-vo, 1976, pp. 213. (In Russian).
19. Rivkina E. M., Samarkin V. A., Gilichinskiy D. A. Metan v mnogoletnemerzlykh porodakh Kolymo-Indigirskoy nizmennosti. [Methane in permafrost of the Kolyma — Indigirka lowland]. Dokl. RAN, 1992, vol. 323, no. 3, pp. 726—745. (In Russian).

Information about the author

Konovalov Aleksandr Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Cand. Sc. (Geography), Ch. Researcher, Institute of Problems of Development of the North, SB RAS (PO Box 2774, Tyumen, 625003, Russia); Professor, Tyumen Industrial University (38, Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russia), e-mail: Konov7@rambler.ru.

Bibliographic description

Konovalov A. A. Features of cryolithogenesis in the presence of gashydrates (on example of West Siberia). The Arctic: ecology and economy, 2017, no. 3 (27), pp. 18—27. (In Russian). DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-18-27