

ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ СУБАКВАЛЬНОГО КРИОЛИТОГЕНЕЗА МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ГАЗОНОСНЫХ СТРУКТУР ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

Ю.Б. Баду

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; yubadu@mail.ru*

Схема формирования криогенной толщи полуострова Ямал, составленная по результатам криосистемного анализа газоносных структур, существенно отличается от известных положений о развитии мерзлоты. Показано криолитологическое содержание предлагаемой концепции. Установлено, что формирование льдистых мерзлых пород нередко связано с проникновением газа и дроссельным эффектом его расширения, охлаждающего и промораживающего. Выделенные типы субаквального криолитогенеза объединены в последовательность смены фациальных обстановок седиментации и промерзания морских осадков в отрицательно-температурной среде по мере уменьшения глубин моря от подводного берегового склона к приливно-отливной зоне, низкой и высокой лайде.

Segregation ice-formation; gas deposit; gas-bearing structure; subaqueal cryolithogenesis; submarine, plication and endogenic diffusion types of the cryolithogenesis

FOUNDATIONS OF THE CONCEPTION OF SUBAQUAL CRYOLITHOGENESIS OF MARINE DEPOSITS OF GAS-BEARING STRUCTURES ON THE YAMAL PENINSULA

Yu.B. Badu

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; yubadu@mail.ru*

The paper presents a scheme for the Yamal Peninsula cryogenic strata formation compiled from the results of the system analysis of cryogenic framework of gas-bearing structures, which is significantly different from the known theories on the permafrost development. It is found that the formation of ice-rich permafrost is generally governed by the penetration of gas migrating upward and the Joule-Thompson effect of its expansion, due to the cooling and freezing processes. The identified types of subaqueal cryolithogenesis are arranged in a sequence of changing sedimentation facies of the depositional environments, and subsequent freezing of the marine sediments at temperatures below freezing point, as the sea water depth decreases grading from the underwater coastal slope to the tidal zone, low and high laida.

Segregation ice-formation; gas deposit; gas-bearing structure; submarine syncryolithogenesis; submarine, plication and endogenic diffusion types of the cryolithogenesis

ВВЕДЕНИЕ

Главные научные проблемы развития криолитогенеза в земной коре впервые были поставлены А.И. Поповым в конце 60-х гг. прошлого века. Учение о криолитогенезе в холодных зонах Земли, признанное ныне научным сообществом, лежит в основе практически всех современных работ по строению мерзлых толщ и эволюции криолитозоны [Попов, 2013].

Изучение криолитологических особенностей криогенной толщи было востребовано в ходе поиска полезных ископаемых (строительных материалов, рудных россыпей, газа и нефти), строительства и других видов освоения земных недр. Современная практика освоения постоянно требует не только обновления баз данных, но и обобщения новых теорий, взглядов, гипотез, развивающих геологию, геокриологию, криолитологию, в том числе дан-

ных, связанных с разработкой широкого круга проблем надежности и устойчивости газопромысловых объектов, гражданских сооружений, проблем сохранения экологического равновесия природных ландшафтов. Такое положение привело к развитию актуальной научной темы – проявления криолитогенеза в земной коре, для решения которой углубленно исследуются закономерности и особенности строения криогенной толщи, состояния ее основных компонентов, их состава и свойств.

Современное состояние криогенной толщи и ее компонентов (и связанные с этим вопросы развития криолитогенеза) требует анализа и обобщения каждые 25–30 лет, так как его постоянному изменению способствуют не только климатические колебания, но и возрастающая интенсивность техногенного воздействия.

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ

С точки зрения методологии “криогенная ледниково-морская парадигма” – это принятая автором система идей, взглядов и понятий, которыми определена модель развития криолитогенеза в газоносных структурах севера Западной Сибири, созданная на основе методов исследования, принятых в 70-х гг. прошлого века. На этой парадигме основана научная и преподавательская деятельность автора.

История вопросов, затронутых в статье, представляет собой смену научных парадигм, регламентировавших выбор проблем и методы их решения. Еще М.В. Ломоносов и полярные исследователи XVIII в. задали **природную** парадигму – понятийный инструментарий и основные направления научного поиска. **Научная** парадигма была создана М.И. Сумгиным из практического применения научных знаний о мерзлоте. Из нее возникли **теоретические** криолитологические парадигмы Е.М. Катасонова и А.И. Попова: первого – о единой основе криолитогенеза, второго – о триединой основе криолитогенеза, объединяющей понятие о развитии криолитогенеза в трех областях осадконакопления и промерзания (денудации, стабилизации сноса и аккумуляции, аккумуляции). В развитие парадигмы А.И. Попова были добавлены тезисы В.Н. Конищева, В.В. Рогова, А.Д. Маслова, В.И. Соломатина, И.Д. Данилова, Н.А. Шполянской, Н.В. Тумель, А.А. Архангелова и многих других.

Одна из ветвей этой парадигмы – криолитологическая парадигма криогенной толщи в разрезе газоносной структуры. Она заключается в том, что общие закономерности криолитологического поля (поля развития криолитогенеза в земной коре) определяются преимущественно экзогенными факторами осадконакопления и промерзания и их сочетанием в субаэральных и субаквальных обстановках. Но в строении и состоянии криогенной толщи над газовой залежью особо сказывается воздействие эндогенных факторов (неотектонических движений и нарушений, теплового влияния, эмиссии и миграции газов), под влиянием которых возникает необычное сочетание процессов осадконакопления и промерзания, т. е. под их влиянием развивался и развивается криолитогенез в области древней и современной аккумуляции [Бадю, 2010, 2016].

По сути, криолитогенез заключается в замерзании поровой воды в толще породы охлаждаемой сверху литосферы. И это преобразование является не только главным в криогенном диагенезе, изменяющим состояние пород, но и сопровождает процесс новообразования мерзлых пород в зависимости от природной обстановки и фациальных условий промерзания. Поровая вода содержит растворенный газ, как и свободный газ в порах.

Толща пород над газовой залежью испытывает прямое воздействие оттока тепла с поверхности залежи, которое приводит к сокращению мощности криогенной толщи. В свою очередь, на динамику развития криогенной толщи в немалой степени влияет эмиссия газа из залежи, сплошность которой нарушена неотектоническими подвижками. Эти процессы активно воздействуют на общий ход сегрегационного льдовыделения.

Главным двигателем массопереноса от газовой залежи является давление газа внутри нее. Но движение газа вверх по разрезу может быть результатом обычного всплывания за счет разницы плотностей воды и газа или диффузии сквозь породы в свободном поровом пространстве, а также по прямым каналам фильтрации в виде тектонических разломов.

Вполне вероятно, что под действием давления газы проникают вверх в поровое пространство толщи пород, начиная процесс первичной миграции [Авилов, Авилова, 2009, 2011]. Вода и газы, распространяясь в порах породы, образуют в ней пузырьки, капли, заполненные каверны либо создают новые рассеянные потоки, либо прорываются к разуплотнениям и по трещинам. Каверны схлопываются, затем наполняются и опять схлопываются, т. е. работают как циклический перекачивающий насос. *И это не механизм криогенной миграции влаги к фронту промерзания, а процесс, который ему предшествует до начала формирования криогенной толщи.* Ведь газы более свободно накапливаются в хорошо проницаемой породе, чем в низкопроницаемой.

Таково действие механизма, предшествующего образованию криогенной толщи в осадочном чехле над газовыми залежами газоносных структур III порядка, расположенных на глубинах до 600–800 м от дневной поверхности.

Концентрация нефтегазовых углеводородов в газоносной структуре происходит по хорошо известным схемам нефтегазонакопления – скопление в ловушках мегаструктур, перетекание в вышерасположенные структуры II и III порядков. А оттуда и в поровое пространство пород, и в скопления газа в замках мелких антиклинальных складок (размерностью в десятки метров) пород толщи четвертичных отложений (по мнению автора).

Криосистемный анализ параметров криогенной толщи (температуры, мощности, льдистости, засоленности, гранулометрического состава, криогенных текстур и др.) и поиск закономерностей их изменчивости в результате дают представление о криогенной толще и ее ярусах, реконструируется процесс их возникновения и развития, динамики в геологическом масштабе времени, детализируется процесс диагенетических преобразований в микро-, мезо- и макрообъеме пород, в разнообра-

зии фациальных обстановок осадконакопления и промерзания [Баду, 2010, 2016]. При этом учитывается главное: внешняя природная среда и ее изменения определяют ход всех криогенных процессов, но эндогенные факторы в немалой степени искажают такой ход развития, создавая криоаномалии в криогенной толще [Баду, 2011].

На базе этих представлений разработаны основы концепции развития криолитогенеза в земной коре на примере севера Западной Сибири.

КОНЦЕПЦИЯ СУБАКВАЛЬНОГО КРИОЛИТОГЕНЕЗА МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Предлагаемая концепция – точка зрения на представление криолитогенеза как процесса криогенного породообразования и криодиагенеза морских отложений, сформулированная для понимания генезиса и развития криогенной толщи засоленных пород во времени (десятки и сотни тысяч лет) и пространстве над площадью купола газовой залежи, т. е. в составе газоносной структуры.

Структура концепции

Структура концепции включает:

- эмпирическую базу из установленных научных фактов (в авторских статьях и монографиях, докладах и сообщениях, в опубликованной литературе, а также в работах оппонентов, критикующих основы общеизвестных концепций);

- теоретическую основу с выявленными закономерностями и научными обобщениями (общеизвестные теории и концепции А.И. Попова, Е.М. Катасонова, В.Н. Конищева, В.В. Рогова, Б.И. Втюрина, Г.И. Дубикова, В.В. Баулина, В.С. Якушева, Н.Н. Романовского), с собственными обобщениями о криогенном строении и льдистости мерзлой толщи, о криогенетически неоднородной мерзлой толще, о систематизации пластовых льдов, о криогенной толще над газовой залежью [Баду, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015а,б];

- систему используемых логических связей и построений (основанную на принципе актуализма в поиске пространственных и временных закономерностей палеогеографической изменчивости основных параметров криогенной толщи).

Основное содержание концепции сформулировано из совокупности доказанных утверждений и выводов в ряде основных статей и монографий, определяющих расширенное понятие криолитогенеза в земной коре [Баду, 1978, 2006, 2010, 2011, 2015а, б, 2016; Трофимов и др., 1980; Баду, Подборный, 2013].

Криолитологическая основа концепции

Новизна точки зрения на генезис криогенной толщи, на развитие типов криолитогенеза в регио-

нальном и теоретическом плане [Баду, 2015а,б] заключается в том, что общая схема формирования криогенной толщи в земной коре существенно отличается от существовавшей до настоящего времени в некоторых аспектах:

- криогенная толща возникает при отрицательном балансе теплообмена в системе “литосфера–атмосфера”, но деградирует под водами Полярного бассейна в периоды его трансгрессий;

- глубина и скорость промерзания литосферы определяются и суровостью климатических условий, и вещественным составом грунтовой толщи, и продолжительностью субаэрального режима развития;

- криогенная толща в пределах газоносной площади имеет мощность меньше, чем вне площади такой залежи, из-за теплового влияния выступов кристаллического фундамента, или, как показано В.С. Якушевым [2009, 2015]: уменьшение мощности многолетнемерзлых пород может быть связано с “фокусированием” естественного теплового потока антиклинальной складкой.

Новая концептуальная схема основана на следующем:

1. Криолитогенез (субмаринный синкриолитогенез) в засоленных донных осадках шельфа проявляется прежде всего при теплообмене в системе “акватория–донный грунт” [Шполянская, 1993, 1999, 2010; Шполянская и др., 2006].

2. Криогенная толща формируется в субаквально отрицательно-температурном режиме седиментации донных морских осадков и по мере их накопления в охлажденном состоянии последовательно сопровождается промерзанием из-за поглощения тепла при диффузионном расширении скоплений газа¹ [Мельников, Спесивцев, 1995; Мельников и др., 1998; Бондарев и др., 2002; Рокос, Тарасов, 2007; Рокос, 2008]. Вполне возможно, что такой способ охлаждения газом может быть достаточен, чтобы обеспечить фазовый переход поровой воды в лед. Но вероятнее всего, замерзание воды происходит при быстром прорыве газа из неглубокой залежи. Газ этот либо местный, микробиального происхождения, либо глубинный, мигрировавший наверх, накопившийся и смешанный с микробиальным.

3. Процессы седиментационного активного криосинерезиса и субмаринного криодиагенеза [Попов, 1985, 1991; Маслов, 1988, 1992, 2008] протекают при активизации неотектонических движений, когда охлажденные ниже 0 °С тиксотропные грунты подвергаются динамическим напряжениям подводного оползания и сминаются в складки. Когда горизонтально залегающие осадки с соленой водой в охлажденном состоянии сминаются в складки, освобождается часть связанной

¹ Способ промерзания выделен автором в эндогенно-диффузионный тип синкриолитогенеза [Баду, 2010, 2015б].

воды, потерявшей соли из каркаса глинистых минералов. Вода вытесняется в менее плотный грунт (супесь, песок) и там замерзает – с пониженной минерализацией, которой соответствует повышенная температура начала замерзания. При этом шпирь льда располагаются вдоль контакта деформированных слоев суглинка и песка. Так возникают пликвативные залежи сильнольдистых пород в согласно залегающих складчатых слоях².

Из вышесказанного следует, что мощность яруса мерзлых пород криогенной толщи постепенно наращивается практически синхронно осадконакоплению как на участках существенного газонасыщения осадков, так и на участках пликвативных деформаций пород.

В общем, любая синкриогенная толща имеет эпикриогенное основание [Бадю, 2010, 2013]. Когда процесс осадконакопления в кровле толщи пород сопровождается промерзанием (и в субаквальных, и в субаэральных обстановках), формирование синкриогенной пачки пород сопровождается потоком холода, промораживающим и подстилающую пачку отложений, которая сформировалась ранее, т. е. в нижней части толщи пород промерзает эпихронно осадконакоплению. В целом же толща определяется как криогенетически неоднородная.

Синкриогенный и эпикриогенный горизонты криогенной толщи

В новообразованиях современных и позднеголоценовых толщ мерзлых пород области морской и прибрежно-морской аккумуляции синкриогенный горизонт обычно невелик (до 10–12 м), а эпикриогенный примерно соответствует ему по мощности или превосходит его [Бадю, 2010].

В разрезах морских террас Ямала автором выделено два горизонта с различным распределением льдистости и криогенных текстур по вертикали. Основные морфологические особенности синкриогенного горизонта отчетливо прослеживаются лишь в верхних 3–5 метрах, редко в 5–6-метровой части разреза. В основании верхнего горизонта отмечается мелкосетчатая криогенная текстура с ровными четкими вертикальными прожилками льда. Они постепенно выклиниваются книзу и являются мелкими элементарными жилками морозобойного растрескивания, имея соответствующую форму. Мощность такого “базального” горизонта колеблется от 0.3 до 0.6–0.7 м. Ниже по разрезу горизонтальные ледяные шпирь разреживаются, постепенно утолщаются, толщина минеральных прослоев также увеличивается, а объемная льдистость уменьшается. Судя по распределению криогенных текстур, отложения верхней и нижней частей толщи промерзали неодинаково, т. е. в разрезе существует два криогенетических

горизонта, а подошва верхнего из них, синкриогенного, находится в основании “базального” слоя. Нижний горизонт промораживался вниз по мере увеличения толщины синкриогенного горизонта. Так формировались криогенетически неоднородные толщи монотонного суглинисто-глинистого состава пород Ямала [Бадю, 1978, 2010, 2015а,б].

Следы субаквального синкриолитогенеза

В отрицательно-температурной среде (с момента начала промерзания) фиксируются все следы процессов, происходивших в субаквальной обстановке седиментации: конвективные нарушения слоистости в виде послонных каплевидных подтеков и пльчатых деформаций слоистости, пликвативные нарушения целых пачек слоев (син- и антиклинальные пологие складки небольшой амплитуды и высоты), дизъюнктивные нарушения, связанные с действием неотектонических подвижек (микросбросы и надвиги пачек слоев, крупные асимметричные складки брахиантиклинальной формы, закрученные песчаные слои (“рулеты”) и кластические дайки внедрений песка в глинистую породу [Великоцкий, 1987, 1992, 2001; Бадю, 2010]).

Ледяные и льдогрунтовые образования субаквального синкриолитогенеза [Бадю, 2010], сформированные в водонасыщенных засоленных донных грунтах, не похожи на формы субаэрального криолитогенеза ни по составу вмещающей грунтовой массы, ни по способу ее промерзания, ни по типу льдовыделения. Пояснения следуют из указанных выше работ Н.А. Шполянской, А.И. Попова, А.Д. Маслова и др.

Механизмы субаквального синкриолитогенеза

Морские осадки верхней части разреза отлагались при отрицательных температурах морской воды, точка замерзания которой составляет –1.7...–1.8 °С из-за высокого содержания легкорастворимых солей, препятствующих льдовыделению в поровом растворе. Кроме того, мелкозернистые песчаные грунты с большим количеством пылеватых частиц и слюдистых минералов обладают тиксотропностью, удерживая большое количество рыхлосвязанной воды с более низкой температурой начала замерзания, чем у свободной. Верхние горизонты толщи осадков водонасыщенны, но коагуляционные связи препятствуют их течению при небольших уклонах поверхности дна. В толще охлажденных осадков происходит постепенное перераспределение воды и солей. Под весом вышележащих осадков породы уплотняются, поровая вода отжимается в приповерхностные слои или в более крупнодисперсные разности, а соли концентрируются в нижних горизонтах толщи.

² Способ промерзания выделен автором в пликвативный тип синкриолитогенеза [Бадю, 2010, 2015б].

Разжиженные морские осадки способны течь уже при уклонах в $1-2^\circ$ и удерживаются только за счет коагуляционных структурных связей, к разрушению которых приводят не только неотектонические толчки или прохождение крупных морских волн по поверхности, но и просто увеличение угла наклона слоев выше критического, т. е. не менее $2-3^\circ$. При этом в движение и складкообразование вовлекаются толщи осадков мощностью не менее 15 м. В целом ряде разрезов северного Ямала и Гыдана отмечено [Бадю, 2010, 2013], что дислокации приурочены к крыльям неотектонических структур.

Как показано в работе А.И. Попова [1991], деформирование осадков при отрицательных температурах воды и пород на подводном береговом склоне является непосредственной причиной льдовыделения, так как при деформации тиксотропной грунтовой массы выделяется часть связанной воды с повышенной температурой начала ее замерзания, и свободная вода оказывается в переохлажденном состоянии. Наиболее значительные ее скопления замерзают в замках складок в виде пластовых залежей льда и преимущественно в песчаных отложениях или на литологических границах. По структуре эти льды похожи на инъекционные: содержат взвесь минерального материала, хаотично ориентированные включения мерзлой породы и многочисленные круглые пузырьки воздуха. Эти признаки свидетельствуют о скачкообразном снятии напряжений и динамическом (напорном) внедрении масс свободной воды в толщу отложений. Но, в отличие от инъекционных льдов, они практически не нарушают литологической слоистости вмещающих пород и залегают согласно с деформированными горизонтами. Кроме того, на литологических границах концентрируются объемы воды, отжатые непосредственно из вмещающих отложений и замерзшие на том же месте. Из них образуются прослойки чистого стекловидного льда без минеральных включений и пузырьков газа. Два вида льда обычно замещают друг друга по простиранию слоев и отделены четким контактом. В песчаных отложениях часто встречаются отдельные прослойки и линзочки льда, они являются результатом такого же отжата свободной воды.

Следствия субаквального криолитогенеза

Из того что выявленные криолитологические признаки подтверждают гипотезу морского субаквального криолитогенеза, разработанную А.И. Поповым [Попов, 1985, 1991], следует главное: после перехода из субаквального режима осадконакопления и промерзания в субаэральный режим ос-

новные “следы” субаквального криолитогенеза сохраняются в толще, промерзавшей и после осушения морского дна. В субаэральном режиме седиментация прекращается, но глубокое промерзание продолжается под действием экзогенных факторов природной среды. На определенном этапе (только после того, как все локализованные очаги субаквального криолитогенеза окажутся консервированными в мерзлоте, а ее мощность достигнет первой сотни метров) криогенная толща начинает испытывать тепловое влияние газовой залежи, залегающей на глубинах 400–800 м от поверхности.

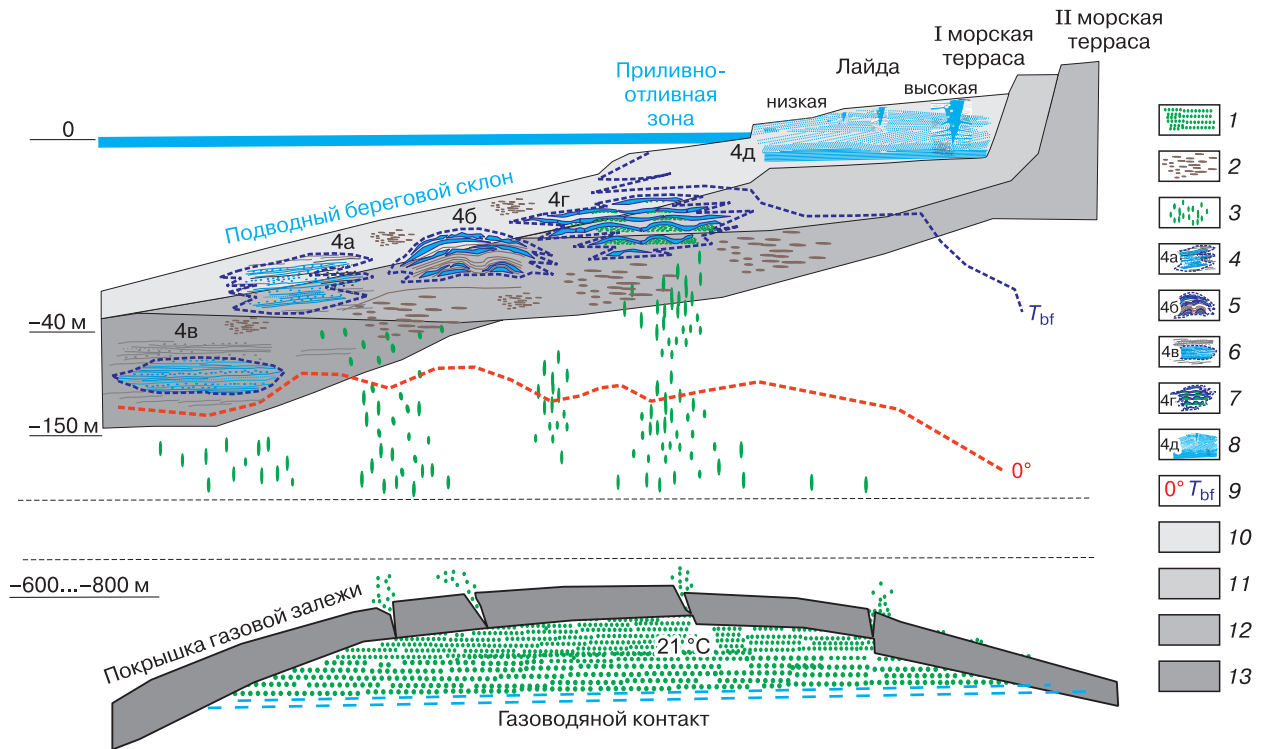
Пока над газовой залежью продолжается субаквальный морской режим седиментации, газ мигрирует в вышележащие донные грунты, замораживая их. При переходе в субаэральный режим локальные новообразования мерзлоты над газовой залежью сливаются в более крупные массивы и, промерзая сверху, перекрывают поток газа, а газ скапливается под криогенной покрывкой в ярусе охлажденных пород криогенной толщи. В этих частях и возникают термобарические условия для образования газогидратов [Якушев, 2009, 2015].

Вполне логично, что, поскольку газовые залежи могут существовать только в условиях постоянной подпитки углеводородами, в геологическом масштабе времени идет непрерывное восполнение открытых и эксплуатируемых газоносных структур. Поэтому криогенная толща всегда имела возможность возникновения и развития в неоплейстоцене на фоне меняющихся трансгрессивно-регрессивных обстановок Полярного бассейна, испытывая влияние газовой залежи [Бадю, 2006, 2013, 2014, 2015а,б].

Развитие криогенной толщи как в субаэральной, так и в субаквальной обстановке фиксируется на отдельных и узколокализованных участках морского дна над скоплениями биогенного газа, над скоплениями газов смешанного (биогенного и глубинного) происхождения, приуроченных к площадям неотектонических разломов в осадочном чехле и выявленных геофизическими исследованиями.

В новой схеме (см. рисунок) типы криолитогенеза³ объединены в последовательность смены фациальных обстановок седиментации и промерзания морских осадков в отрицательно-температурной среде по мере уменьшения глубин моря от подводного берегового склона к приливно-отливной зоне, пляжу, низкой и высокой лайде. Эта последовательность стадий развития типов субаквального криолитогенеза непосредственно связана с хронологическими этапами развития морского бассейна в среднем, позднем неоплейстоцене и голоцене.

³ Субмаринный, пликативный, эндогенно-диффузионный, прибрежно-морской типы криолитогенеза.



Субаквальный криолитогенез в отрицательно-температурных обстановках осадконакопления и промерзания морских отложений [Баду, 2017].

1 – газоносные пески под глинистыми породами (верхний мел) покрышки газовой залежи; 2 – скопления биогенного газа; 3 – скопления глубинного газа; 4–7 – типы криолитогенеза в отдельных частях разреза отложений подводного берегового склона: 4 – эндогенно-диффузионный, 5 – пликативный, 6 – субмаринный, 7 – субмаринный диапирогенный; 8 – прибрежно-морской тип криолитогенеза в разрезах отложений приливо-отливной зоны и лайды; 9 – положение подошвы яруса мерзлых пород криогенной толщи (T_{bf}) и подошвы криогенной толщи (0°); 10 – глинисто-песчаные отложения, м IV; 11 – песчано-глинистые отложения I морской террасы, м III–IV; 12 – глинисто-песчаные отложения II морской террасы, м III₃₋₄; 13 – песчано-глинистые отложения позднего и среднего неоплейстоцена.

ВЫВОДЫ

Проанализированные и обобщенные факты, положения и выводы о криогенной толще подтверждают новое представление о возможности ее формирования в морских обстановках, господствовавших на территории севера Западной Сибири в неоплейстоцене – от эпоры с ледниками горного обрамления, с проникающими по разломам трансгрессиями раннего неоплейстоцена, до средненеоплейстоценового максимума развития акватории Полярного бассейна, осушения морского дна в позднем неоплейстоцене и термоабразионного разрушения прибрежной суши в голоцене.

1. В арктической части планеты промерзание пород с поверхности резко увеличивается из-за дополнительного охлаждения атмосферы. Промерзающая, промерзшая и охлажденная части литосферы перманентно образуются там, где периодически возникают отрицательно-температурные градиенты, обеспечивающие миграцию поровой воды к фронту промерзания, перемерзают водо-

носные слои и горизонты, газы консервируются в порах грунта, в замках антиклинальных складок, в литологических окнах пород осадочного чехла в виде залежей газогидратов. Общие закономерности строения криолитосферы, сложившиеся под воздействием экзогенных процессов, заметно изменены локальными эндогенными факторами неравнозначного влияния газовой залежи на вышележащую толщу пород: от купола залежи выделяется мощный тепловой поток, а из-под купола по тектоническим трещинам подается поток мигрирующего кверху природного газа.

2. Концепция, соединяя положения предшествующей теории формирования мерзлой толщи и других концепций, позволяет восстановить современную структурную организацию криогенной толщи только в пределах границ газоносной площади, только в разрезе газоносной структуры. Ее главные характеристики вписываются в общую концепцию существования литосферы и ее промерзшей части – криолитосферы.

3. Окончание среднего неоплейстоцена на севере Западной Сибири связано с завершением шельфового режима седиментации, а в позднем неоплейстоцене консервируются следы морского криолитогенеза. Главное событие, изменившее облик грунтовой толщи, – промерзание неоплейстоценовых отложений, сопровождаемое синхронным и эпихронным льдовыделением на локализованных участках распространения пород, насыщенных и биогенным, и глубинным газами.

4. В субаквальной части разреза современные морские осадки промерзают и вблизи донной поверхности, этим подтверждено, что новообразование участков льдистых мерзлых пород связано именно с проникновением газов и действием дроссельного эффекта их расширения, охлаждающего и промораживающего донные отложения.

5. Криогенная толща возникает и развивается в субаквальной морской обстановке, когда донные отложения охлаждаются до отрицательной температуры и промерзают:

– на участках при глубинах моря более 40–50 м в условиях *субмаринного синкриолитогенеза* из-за дополнительного теплосъема с донного грунта массивом воды с отрицательной температурой;

– на участках при глубинах моря менее 40–50 м в условиях *пликативного синкриолитогенеза*, когда охлажденные ниже 0 °С донные грунты промерзают при деформации слоистых массивов, оползающих по подводному склону крутизной в первые градусы;

– при тех же глубинах, когда охлажденные донные грунты промерзают при адиабатическом расширении проникающих сюда газов (*эндогенно-диффузионный синкриолитогенез*).

6. Участки локальных новообразований субаквальной мерзлоты над газовой залежью сливаются в более крупные массивы и прерывают миграцию, консервируя газы и биогенного, и глубинного генезиса в толще пород. Мощность яруса мерзлых пород криогенной толщи наращивается по вертикали вверх, к донной поверхности и практически синхронно осадконакоплению.

7. Синкриогенная толща всегда имеет эпикриогенное основание. Когда в кровле толщи процесс осадконакопления сопровождается промерзанием, формируется синкриогенная пачка пород. При этом поток холода промораживает и нижележащие, подстилающие отложения, которые сформировались ранее, т. е. в нижней части грунтовой толщи промерзает эпихронно осадконакоплению. В целом такая толща определяется как криогенетически неоднородная, возникшая на локальных участках шельфа в условиях проявления эндогенно-диффузионного, пликативного, субмаринного и прибрежно-морского синкриолитогенеза морских фаций отложений Ямала.

8. После осушения дна мощность криогенной толщи увеличивается вниз по разрезу в субаэральном режиме и, достигая первой сотни метров, криогенная толща начинает испытывать уже тепловое влияние газовой залежи.

Перспективное развитие основ концепции приведет к объяснению многих острых вопросов теории возникновения мерзлоты на суше и ее деградации в периоды трансгрессий Полярного бассейна.

Литература

- Авилов В.И.** Информационная система аквагеоэкологии / В.И. Авилов, С.Д. Авилова. М., Прима-Пресс, 2009, 142 с.
Avilov, V.I., Avilova, S.D., 2009. Informational System of Aquatic Geoeology. Prima-Press, Moscow, 142 pp. (in Russian)
- Авилов В.И., Авилова С.Д.** Концепция хемолитоавтотрофного образования нефти и газа // Геология морей и океанов: Материалы XIX науч. конф. (школы) по морской геологии. М., ГЕОС, 2011, т. II, с. 4–8.
Avilov, V.I., Avilova, S.D., 2011. The concept of hemolithoautotrophic formation of oil and gas, in: Geology of seas and oceans: Proceed. of the 19th International Scientific Conference (School) on Marine Geology. Vol. II. GEOS, Moscow, pp. 4–8. (in Russian)
- Баду Ю.Б.** Криолитогенез в условиях севера Западно-Сибирской плиты: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1978, 24 с.
Badu, Yu.B., 1978. Cryolithogenesis in the conditions of the North of West-Siberian plate. Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation. Moscow, 24 pp.
- Баду Ю.Б.** Криолитологическое строение грунтовой толщи // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: В 3 т. Т. 1. Харасавейское газоконденсатное месторождение. Тюмень, ООО “ТюменНИИгипрогаз”; СПб., Недра, 2006, с. 85–101.
Badu, Yu.B., 2006. Cryolithologic structure of the frozen ground, in: Cryosphere of oil and gas condensate fields on the Yamal peninsula, in 3 volumes. Vol. 1. Kharasaveyskoye gas condensate field. TyumenNIIGiprogaz, ООО; Nedra, Saint Petersburg, pp. 85–101. (in Russian)
- Баду Ю.Б.** Криолитология / Ю.Б. Баду. М., КД “Университет”, 2010, 528 с.
Badu, Yu.B., 2010. Cryolithology. Knizhny dom “Universitet”, Moscow, 528 pp. (in Russian)
- Баду Ю.Б.** Кривоаномалии в мерзлых толщах газоносных структур севера Западной Сибири // Сб. науч. тр. ООО “ТюменНИИгипрогаз”. Тюмень, Изд-во “Флат”, 2011, с. 27–30.
Badu, Yu.B., 2011. Cryoanomalies in the permafrost strata of gas-bearing structures in the north of Western Siberia, in: Scientific works collection of “TyumenNIIGiprogaz” ООО, Izd-vo “Flat”, Tyumen, pp. 27–30. (in Russian)
- Баду Ю.Б.** Криогенная толща газоносных структур севера Западной Сибири // Десятая Междунар. конф. по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире / Под ред. В.П. Мельникова. Тюмень, Печатник, 2012, т. 3, с. 25–30.
Badu, Yu.B., 2012. Permafrost strata of gas-bearing structures in the north of Western Siberia, in: Xth International Conference on Permafrost (TICOP): Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World. Pechatnik, Tyumen, Vol. 3: Papers in the Russian language, pp. 25–30.

- Баду Ю.Б.** Криолитологическое строение мерзлой толщи // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М., ООО "Газпром Экспо", 2013, с. 185–209.
- Badu, Yu.B., 2013. Cryolithologic structure of the frozen strata, in: Badu, Yu.B., Gafarov, N.A., Podborny, E.E. (Eds.). Cryosphere of Oil and Gas Condensate Fields of the Yamal Peninsula, in 3 volumes. Vol 2. Cryosphere of the Bovanenkovskoye oil and gas condensate field. ООО Gazprom Ekspo, Moscow, pp. 185–209. (in Russian)
- Баду Ю.Б.** Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи Ямала // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 11–22.
- Badu, Yu.B., 2014. The influence of gas-bearing structures on the cryogenic strata thickness in Yamal area. Earth's Cryosphere, XVIII (3), 11–22. (in Russian)
- Баду Ю.Б.** Льдистость пород криогенной толщи газоносных структур северного Ямала // Криосфера Земли, 2015а, т. XIX, № 3, с. 10–19.
- Badu, Yu.B., 2015a. Ice content of the cryogenic strata (permafrost interval) of gas-bearing structures, northern Yamal. Earth's Cryosphere, XIX (3), 10–19. (in Russian)
- Баду Ю.Б.** Классификация синкриогенных грунтовых толщ // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана) [Электрон. журн.], 2015б, № 7 (14), с. 26–29.
- Badu, Yu.B., 2015b. Classification of syncryogenic soil masses. Nauka i obrazovanie (Bauman Moscow State Technical University) (electronic journal), No. 7 (14), 26–29.
- Баду Ю.Б.** Криосистемный анализ газоносных структур Ямала // Академ. журн. Западной Сибири, 2016, т. 12, № 2 (63), с. 8–12.
- Badu, Yu.B., 2016. Cryosystem analysis of the gas-bearing structures of Yamal. Akademicheskii zhurnal Zapadnoi Sibiri, vol. 12, No. 2 (63), 8–12.
- Баду Ю.Б.** Газопроявления и природа криолитогебеза морских отложений полуострова Ямал // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 5, с. 42–54.
- Badu, Yu.B., 2017. Gas shows and the nature of cryolithogenesis in marine sediments of the Yamal Peninsula. Earth's Cryosphere, XXI (5), 42–54. (in Russian)
- Баду Ю.Б., Подборный Е.Е.** Особенности криосферы Бованенковского НГКМ // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М., ООО "Газпром Экспо", 2013, с. 391–411.
- Badu, Yu.B., Podborny, E.E., 2013. Specific features of the cryosphere of the Bovanenkovskovo OGCF, in: Badu, Yu.B., Gafarov, N.A., Podborny, E.E. (Eds.). Cryosphere of Oil and Gas Condensate Fields of the Yamal Peninsula. Vol. 2. The cryosphere of the Bovanenkovskovo oil-gas-condensate field. ООО Gazprom Ekspo, Moscow, pp. 391–411. (in Russian)
- Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А.** Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 7, с. 587–598.
- Bondarev, V.N., Rokos, S.I., Kostin, D.A., Dlugach, A.G., Polyakova, N.A., 2002. Subpermafrost gas accumulations in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora Sea. Geologia i Geofizika, 43 (7), 587–598.
- Великоцкий М.А.** Дислокации и пластовые льды в четвертичных отложениях полуострова Ямал // Криогенные процессы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1987, с. 48–61.
- Velikotskii, M.A., 1987. Dislocations and massive ice beds in Quaternary sediments on the Yamal peninsula, in: Cryogenic Processes. MGU, Moscow, pp. 48–61. (in Russian)
- Великоцкий М.А.** Происхождение дислокаций в мерзлых отложениях Ямала // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1992, № 5, с. 38–44.
- Velikotskii, M.A., 1992. Origin of dislocations in frozen deposits on the Yamal peninsula. Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, geography, No. 5, 38–44.
- Великоцкий М.А.** Подводные оползни на арктическом шельфе и их геологическое значение // Проблемы общей и прикладной геологии Севера. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, с. 134–148.
- Velikotskii, M.A., 2001. Subaqueous slumping processes on Arctic shelf and their geocological significance, in: General and Applied Problems of Geocology of the North, Collection of papers. Moscow University Press, Moscow, pp. 134–148. (in Russian)
- Маслов А.Д.** Криодиогенез в условиях субаквального осадконакопления // Проблемы геокриологии. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, с. 234–243.
- Maslov, A.D., 1988. Cryogenic diagenesis in the Subaquatic Depositional Environments, in: Problems of Geocryology. Moscow University Press, Moscow, pp. 234–243. (in Russian)
- Маслов А.Д.** Криосинерезис и его роль в преобразовании морских осадков на стадии диогенеза // Инж. геология, 1992, № 1, с. 40–49.
- Maslov, A.D., 1992. Cryosyneresis and its role in diagenetic transformations of marine sediments. Inzhenernaya geologia, No. 1, 40–49.
- Маслов А.Д.** Особенности криодиогенеза морских осадков арктического шельфа // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 3–13.
- Maslov, A.D., 2008. Some features of cryogenic diagenesis of the marine sediment on Arctic shelf. Earth's Cryosphere, XII (4), 3–13. (in Russian)
- Мельников В.П.** Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей / В.П. Мельников, В.И. Спесивцев. Новосибирск, Наука, 1995, 198 с.
- Melnikov, V.P., Spesivtsev, V.I., 1995. Geotechnical and Geocryological Conditions of the Barents and Kara Seas Shelves. Nauka, Novosibirsk, 198 pp. (in Russian)
- Мельников В.П., Федоров К.М., Вольф А.А., Спесивцев В.И.** Анализ возможного сценария образования придонных ледяных бугров на шельфе Печорского моря // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 4, с. 51–57.
- Melnikov, V.P., Fedorov, K.M., Volf, A.A., Spesivtsev, V.I., 1998. Analysis of a potential scenario of the formation of bottom ice mounds on the Pechora Sea shelf. Earth's Cryosphere, II (4), 51–57. (in Russian)
- Попов А.И.** О пликтивных дислокациях и криолитогенезе в плейстоценовых отложениях Северной Евразии // Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое. М., Наука, 1985, с. 90–101.
- Popov, A.I., 1985. On plicative deformations and cryolithogenesis in Pleistocene deposits of Northern Eurasia, in: Permafrost development in Eurasia in the upper Cenozoic. Nauka, Moscow, pp. 90–101. (in Russian)
- Попов А.И.** О субмаринном типе криодиогенеза // Инж. геология, 1991, № 6, с. 49–55.
- Popov, A.I., 1991. On submarine type of cryogenic diagenesis. Inzhenernaya geologia, No. 6, 49–55.
- Попов А.И.** Избр. тр. и о нем. К 100-летию со дня рождения / А.И. Попов. Сост.: Н.А. Шполянская, О.И. Алабян, Ю.Б. Баду, В.В. Рогов. М., Науч. мир, 2013, 513 с.

- Popov, A.I., 2013. Selected works and biography. To the 100th Anniversary. Shpolyanskaya, N.A., Alabyan, O.I., Badu, Yu.B., Rogov, V.V. (Comp.). Nauchny Mir, Moscow, 513 pp. (in Russian)
- Рокос С.И.** Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и южной части Карского морей // Инж. геология, 2008, № 12, с. 22–28.
Rokos, S.I., 2008. Geotechnical aspects of the near-surface areas of anomalously high formation pressure in the Pechora Sea shelf and southern Kara Sea areas. Inzh. Geologia, No. 12, 22–28.
- Рокос С.И., Тарасов Г.А.** Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода, 2007, № 67, с. 66–75.
Rokos, S.I., Tarasov, G.A., 2007. Gas-saturated sediments of inlets and bays of the southern part of the Kara Sea, in: Subcommission on Quaternary stratigraphy, Bulletin, No. 67, 66–75.
- Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Дубиков Г.И.** Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, 247 с.
Trofimov, V.T., Badu, Yu.B., Dubikov, G.I., 1980. The cryogenic structure and ice content of perennially frozen ground of the West Siberian plate. Izd-vo Mosk. un-ta, Moscow, 247 pp. (in Russian)
- Шполянская Н.А.** Конвективная природа дислокаций в отложениях с пластовыми льдами на севере Западной Сибири // Геоэкология (инж. геология, гидрогеология, геокриология), 1993, № 1, с. 94–103.
Shpolyanskaya, N.A., 1993. Convective nature of dislocations in sediments with ground ice in the northern West Siberia. Geoeekologia (geoengineering, hydrogeology, geocryology), No. 1, 94–103.
- Шполянская Н.А.** Криогенное строение дислоцированных толщ с пластовыми льдами как показатель их генезиса (север Западной Сибири) // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 4, с. 61–70.
Shpolyanskaya, N.A., 1999. Cryogenic structure of dislocated sequences with massive ice beds as an indication of their genesis. Earth's Cryosphere, III (4), 61–70. (in Russian)
- Шполянская Н.А.** Особенности криолитозоны Западного сектора Арктики в системе шельф–суша // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2010, № 6, с. 58–65.
Shpolyanskaya, N.A., 2010. Features of the Arctic western sector permafrost in the shelf-land system. Vestnik Mosk. un-ta, Ser. 5. Geografia, No. 6, 58–65.
- Шполянская Н.А., Стрелецкая И.Д., Сурков А.В.** Криолитолизис в пределах арктического шельфа (современного и древнего) // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 3, с. 49–60.
Shpolyanskaya, N.A., Streletskaya, I.D., Surkov, A.V., 2006. Cryolithogenesis in Arctic shelf (recent and relict). Earth's Cryosphere, X (3), 49–60. (in Russian)
- Якушев В.С.** Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне / В.С. Якушев. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
Yakushev, V.S., 2009. Natural Gas and Gas Hydrates in the Cryogenic Zone. VNIIGAZ, Moscow, 192 pp. (in Russian)
- Якушев В.С.** Генетические типы углеводородных газов в многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 3, с. 71–76.
Yakushev, V.S., 2015. Genetic types of hydrocarbon gases in the permafrost strata. Earth's Cryosphere, XIX (3), 71–76. (in Russian)

*Поступила в редакцию
7 февраля 2017 г.*