

ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯ И ПРИРОДА КРИОЛИТОГЕНЕЗА МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

Ю.Б. Баду

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

Определены основные условия, при которых газопроявления в породах криогенной толщи связаны с их составом, генезисом и строением. Показаны стадии развития субаквального криолитогенеза морских отложений в неоплейстоцене, особенности его развития в последовательном изменении фациальных обстановок седиментации и промерзания донных осадков шельфа.

Газонасыщенность, породы криогенной толщи, типы криолитогенеза, фациальные обстановки седиментации и промерзания, механизмы промерзания донных пород

GAS SHOWS AND THE NATURE OF CRYOLITHOGENESIS IN MARINE SEDIMENTS OF THE YAMAL PENINSULA

Yu.B. Badu

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cryolithology and Glaciology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; yubadu@mail.ru

The basic conditions in which gas shows in frozen rocks of cryogenic strata are related to their composition, genesis and structure are defined. The stages of development of submarine cryolithogenesis in marine deposits in the Pleistocene, peculiarities of its development under a sequential change in facial conditions of sedimentation and freezing of bottom sediments of the shelf are shown.

Gas saturation, frozen rocks of cryogenic strata, facies environments of sedimentation and freezing, freezing mechanisms of offshore rocks

ВВЕДЕНИЕ

Газонасыщенность – главная региональная особенность пород криогенной толщи севера Западной Сибири, как на суше, так и в придонном слое шельфовых отложений, через которые происходит миграция природного газа в гидросферу и далее в атмосферу. Сведения о физико-химических основах формирования различных состояний природного газа в криолитосфере и основные закономерности генезиса, миграции, аккумуляции и фазовых превращений природного газа обобщены в работах [Чувилин и др., 1999; Якушев и др., 2003; Якушев, 2009].

Тем не менее некоторые исследователи [Друщиц, Садчикова, 2015] полагают, что анализ распределения мест эмиссии метана в толще квартера позволит выявить его возможный источник и причину выброса или просачивания. По их мнению, формирование мерзлой толщи, обладающей специфическими характеристиками, привело к образованию особых форм рельефа, осадков с отрицательной температурой и содержащих лед, к захоронению и консервации огромных масс органического вещества; сейчас же многолетнемерзлые породы часто служат препятствием на пути природного газа к поверхности шельфовых от-

жений и далее в атмосферу. Осадки квартера, завершая разрез осадочного чехла, представляют собой матрицу покрывок, ловушек и сквозных “окон” для газов разной природы, мигрирующих в осадочном чехле, в том числе для метана, а его значительные выбросы могут быть связаны с миграцией свободного природного газа через сквозные талики и зоны тектонических нарушений в многолетнемерзлых породах.

Газопроявления в осадках шельфа, поверхностных отложениях подруловых и подозерных таликов, водах озер, в породах деятельного слоя и криогенной толщи

Присутствие газа в порах пород четвертичного возраста существенно повлияло на характер проявления криолитогенеза в промерзающих и уже мерзлых отложениях различной фациальной принадлежности, а распределение ареалов газопроявления указывает на выходы газа к поверхности дна шельфа, в накапливающиеся породы, в воды акваторий моря, озер, эстуариев, а также на дневную поверхность в атмосферу.

Метан в осадках шельфа. На поверхности дна шельфа места разгрузки метана в донных от-

ложениях, связанные с новообразованием мерзлоты, отмечены в работах С.И. Рокоса [2008], С.И. Рокоса и Г.А. Тарасова [2007], В.Н. Бондарева с соавт. [2002], Д.А. Костина и С.И. Рокоса [2004] и др., в которых показано, что газонасыщение донных осадков в акваториях Печорского и Карского морей приводит к их последующему промерзанию. С.И. Рокос подчеркивал, что донные осадки верхней части разреза (в изобатах от 0 до -70 м) практически повсеместно насыщены свободным газом. По данным Д.А. Костина и С.И. Рокоса, на участках развития диапироподобных поднятий биогенный газ в виде заземленных пузырьков заполнял небольшие полости под ближайшей покровной дисперсных грунтов. При диагенетическом уплотнении таких осадков газовые скопления выжимались вместе с поровой жидкостью в эти полости.

Эмиссия метана с поверхности почвенно-растительного покрова, из озер, пород деятельного слоя, подрусовых и подозерных таликов. Измерения в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (ГКМ) показали, что поток метана с поверхности естественных ландшафтов составляет от 0 до 100 мл/(м²·ч) [Ривкин, 1996, 1998, 2003]. В термокарстовых понижениях на поверхности террас и в ложбинах стока он составляет в среднем 8–50 мл/(м²·ч). Абсолютный максимум эмиссии метана зафиксирован в русловой части рек, в глубоких приустьевых частях русел их притоков и в подрусовых таликах, что связано с формированием изолированной анаэробной обстановки под руслами небольших рек и ручьев, которая может существовать в течение нескольких лет. При вскрытии таликов на таких участках обнаруживались довольно интенсивные газопроявления (до 1200 мл/(м²·ч)), а на глубине 0.2 м ниже подрусового талика был зафиксирован интенсивный поток метана из скважины – более 9000 мл/ч.

Минимальные значения потоков метана (0.3 мл/(м²·ч)) на Бованенковском ГКМ отмечены для плоских участков и склонов морских террас, сложенных пылеватыми песками и супесями, с редким растительным покровом или лишенным его. Здесь образующийся у поверхности метан полностью потребляется метанотрофными бактериями.

Дегазация в озерах Ямала была отмечена автором при полевых работах 1977 г., а позднее аналогичные факты появились в публикациях И.Л. Кузина [1990, 1992, 1999], Л.Н. Крицук [2010].

По мнению Б.М. Валяева [1997, 1999, 2007], скорость эмиссии метана оказалась самой высокой из рек и озер, что необъяснимо с точки зрения биогенной природы этого потока, но становится понятным, если учесть, что практически все реки

и большинство крупных озер маркируют тектонические нарушения, т. е. каналы глубинной дегазации Земли.

О.С. Сизовым [2015] выделено три типа поверхностных газопоявлений: 1) постепенные – происходят в течение длительного времени из донных отложений озер и русловой части рек с постоянным стоком; 2) активные – возникают на эрозийных склонах с нарушенным верхним слоем, например, при образовании небольших озер с активными оползневыми берегами, а также в русловой части рек и на дне озер; 3) внезапные – происходят в основном при критическом росте давления в ядре бугров пучения и выражаются в виде небольших конических воронок правильной формы с крутыми стенками и валом выброшенного наружу грунта по периферии.

Метан в породах криогенной толщи. Ф.М. Ривкин показал [1998, 2003], что в породах с высокой степенью заполнения пор льдом и высокой влажностью миграция газа может быть полностью исключена. Но при этом наибольшее содержание метана характерно для краевых участков озерных котловин, хасыреев, подозерных таликов (до 22.5 мл/кг). Столь высокая концентрация метана имеет вторичный характер, обусловлена протаиванием этих участков в голоцене и последующим эпигенетическим промерзанием или консервацией таликов, что способствовало формированию анаэробных условий.

Здесь уместно упомянуть представления В.С. Якушева [2009] о том, что в промерзающем разрезе газ активно выделяется из формирующегося порового льда и мигрирует в проницаемые пропластки пород мерзлой толщи, где и аккумулируется. В результате генерация, миграция и аккумуляция биохимического газа внутри мерзлой толщи в значительной мере подавляются дальнейшим промерзанием отложений, а газонасыщенные пропластки запечатываются слабопроницаемыми дисперсными и льдистыми породами. Но мерзлая толща в целом проницаема для скоплений глубинного газа, мигрирующего снизу через литологические неоднородности и неотектонические разломы. А главное, обнаруженные залежи глубинного газа в криогенной толще сформировались до промерзания разреза и их формирование не отличается от такового в талом разрезе.

Существующие материалы обобщены и проанализированы с точки зрения их использования для оценки содержания гидратов природного газа в надсеноманских отложениях севера Западной Сибири [Агалаков, 1997; Агалаков, Курчиков, 2004]. Авторами выделяются три интервала криолитогазогидратных зон.

Первый интервал связан с газоносными сеноманскими и туронскими отложениями, которые на севере Западной Сибири находятся в благопри-

ятных для гидратообразования термобарических условиях.

Второй интервал включает подмерзлотные отложения сеноманского и палеогенового возраста, в которых возможно существование газогидратных экранов, а также наличие нетрадиционных коллекторов – алевритистых опоковидных глин и трещиноватых кремнистых аргиллитов.

В третьем интервале отрицательно-температурные толщи состоят из наиболее не выдержанных по составу пород, поры которых содержат флюиды в газообразном, жидком и твердом состоянии. Здесь возможны ловушки с криогидратным экранированием.

Во втором интервале наличие углеводородов фиксируется по многочисленным газопроявлениям при бурении скважин на разведочных площадях, расположенных на обширной территории криолитозоны Западной Сибири – от Семаковской площади на севере до Самотлорского месторождения на юге, от Тазовской площади на востоке до Ярудейской – на западе. При проходке скважин возникали неуправляемые газовые фонтаны с абсолютно свободным дебитом 10–20 тыс. м³/сут, не затухающие длительное время.

С.Е. Агалаков подчеркивал, что скопление углеводородов в третьем интервале (в интервале криолитозоны) фиксируется при бурении скважин по многочисленным газопроявлениям, отмеченным на глубинах от 40 до 170 м в виде кратковременных выбросов. Так, на Харасавэйской площади интенсивные газопроявления приводили к необходимости бурения нового ствола, а на Бованенковской площади при бурении выбрасывало раствор на высоту 10 м. Известны случаи длительного, около трех месяцев, газирования с дебитом 500–1000 м³/сут с появлением газовых грифонов в оттаявших мерзлых породах вокруг устья скважины.

По мнению С.Е. Агалакова, интервал многолетнемерзлых пород очень слабо изучен, а еще менее изучены по газопроявлениям рельефообразующие четвертичные отложения по всему северу

Таблица 1. Встречаемость, средние интервалы залегания и мощность слоев газоводосодержащих пород в генетических комплексах отложений криогенной толщи Бованенковской газоносной структуры [Подборный, 2013]

Геолого-генетический комплекс	Встречаемость среди всех газоводосодержащих слоев, %	Интервал залегания, м	Мощность слоя, м
m, рп III ₁	6.5	25.9–29.3	3.4
mg II ₂₋₄	80.6	81.6–89.8	8.2
m I ₂ –II ₁	8.1	124.7–130.4	5.7
mg I ₁	4.8	181.8–189.3	7.5

Западной Сибири. Скопления газа в них рассматриваются лишь как фактор, создающий аварийную обстановку при бурении и эксплуатации скважин. Однако с проблемой газопроявления из приповерхностных отложений постоянно сталкиваются и изыскатели при бурении неглубоких (до 10–20 м) разведочных скважин.

К настоящему времени известно [Нежданов и др., 2011], что газопроявления той или иной интенсивности в верхней части разреза осадочного чехла (палеоген-четвертичные отложения) установлены практически на всех газовых месторождениях Ямала, а газоносность четвертичных отложений изучена достаточно детально на Бованенковском месторождении.

Главные интервалы газонасыщенности пород криогенной толщи. Толща пород надсеноманских отложений в интервале глубин 10–450 м содержит скопления газа, а в зоне благоприятных термодинамических условий гидратообразования и особенно в криогенной части разреза – газовые гидраты. Наличие последних доказано В.С. Якушевым [1989], который показал, что реликтовые внутримерзлотные метастабильные газогидраты – важнейший результат криолитогенеза в неоплейстоцене на Ямале. Он же впервые подчеркивал, что выходы глубинного газа приурочены к сквозным таликам над разломами в осадочном чехле.

Судя по материалам бурения параметрических и добывающих скважин в ярусе мерзлых пород криогенной толщи Харасавэйской и Бованенковской газоносных структур [Баулин, 1985; Клейменов и др., 1998; Буданцева, 2006; Кондаков и др., 2006а; Баду, 2011а,б; Черепанов и др., 2011; Подборный, 2012; Баду, Подборный, 2013], установлено, что интервалы газопроявлений (табл. 1) расположены в отложениях верхнего, среднего и нижнего неоплейстоцена на глубинах 15–220 м от поверхности [Подборный, 2012, 2013].

Более 80 % интервалов газопроявлений встречаются в отложениях салехардской свиты (mg II₂₋₄) среднего неоплейстоцена, чаще всего в суглинках с включениями линз или прослоев песка. Наиболее часто газопроявления встречаются на участках сокращения мощности мерзлой толщи: под руслами низовьев рек Мордыяха и Сеяха и на участках распространения крупных хасыреев и озер.

Слабые притоки газа (50–100 м³/сут) получены из отложений казанцевской свиты (m, рп III₁) в интервале глубин 28–33 м (твердомерзлая часть яруса мерзлых пород), казымской свиты в интервале 100–150 м (пластично-мерзлая часть яруса мерзлых пород) и полуйской свиты в интервале 166–210 м яруса охлажденных пород криогенной толщи. Дебиты до 800 м³/сут зафиксированы в твердомерзлой части разреза с абсолютными отметками –35...–85 м [Подборный, 2013].

Мощные притоки газа получены из пластов (с дебитом 1000 м³/сут и более) в интервале абсолютных отметок глубин –60...–115 м (пластично-мерзлая часть разреза). Ниже в пластично-мерзлой и охлажденной частях разреза выявлены пласты с максимальными дебитами до 14 000 м³/сут [Подборный, 2013].

В палеогеновых отложениях, слагающих ярус охлажденных пород криогенной толщи, газонасыщенные пласты пока не выявлены. Вполне вероятно, что газ либо выветрился в неогене, либо не входил в зону гидратообразования до неогена.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Из приведенных данных следует, что в льдистых породах на территории Бованенковского ГКМ в интервале от 0 до 20–30 м, составляющих твердомерзлую часть криогенной толщи, сосредоточено около 7 % газосодержащих слоев со слабым притоком газа при вскрытии. В мерзлых породах салехардской свиты среднего неоплейстоцена сосредоточено более 80 % газосодержащих слоев с мощными дебитами притоков газа при вскрытии. В породах пластично-мерзлой части разреза (казымской и полуйской свит) вскрыты 13 % газопроявлений со слабыми притоками, но мощнейшими дебитами. Отдельные прослои коллекторов в охлажденных породах насыщены газогидратами и водой до глубин 260–280 м. Газопроявления чаще всего обнаруживаются ближе к крутым крыльям купола газовой залежи, но очень редко над вытянутыми и пологими, а зоны глубинных газопроявлений связаны с грабенами в покрывке продуктивной толщи, но не с пликативами и ступенчатыми сбросами [Подборный, 2013].

Но так как аналогичное распределение наблюдается и над группой газоносных структур в прилегающей к Ямалу части шельфа, то следует принимать во внимание положение о том, что донные осадки шельфа могут промерзнуть при адиабатическом расширении мигрирующего вверх газа на локализованных участках, расположенных над неотектоническими нарушениями мезозойской покрывки газовых куполов [Мельников, Спесивцев, 1995; Мельников и др., 1998]. Ранее считалось, что это происходит над крыльями складок пород кристаллического фундамента [Острый, 1962; Баулин, 1985].

С точки зрения особенностей проявления криолитогенеза в толще отложений морского генезиса полученные данные показывают, что газ всегда локально присутствует в породах криогенной толщи, он поступал и поступает вверх по трещинам и полостям в массиве пород, перекрывающих газовую залежь, либо под действием горного давления в немерзлой части криогенной толщи, либо под влиянием механизма сегрегационного

льдовыделения, вытесняющего газ из пор мерзлых или промерзающих пород. Это подтверждает, что промерзанием зафиксировано положение газовых скоплений, которое сложилось уже к концу среднего неоплейстоцена, а полный неоплейстоценовый цикл развития криогенной толщи характеризуется региональными особенностями [Баду, 2011б, 2014, 2015а,б].

Следует обратить внимание еще на одну важную особенность процесса седиментации различных фаций морских отложений. В свое время В.И. Вернадский [1933] и П.Н. Кропоткин [1986] утверждали, что газовое дыхание Земли происходит постоянно; это нашло подтверждение в работах геологов – газозаводчиков и нефтяников. Наличием термоградиентов обеспечивается мощный тепло-массоперенос и дегазация. Из мантии испаряется весь спектр летучего мантийного вещества на атомарном и молекулярном уровнях, в том числе и газы – Н, О, Не и др. В результате химических реакций возникают их соединения, которые мигрируют кверху под влиянием баро- и термоградиентов, газы конденсируются, образуя нефть, газоконденсат, метан, воду, заполняя проницаемые элементы земной коры – коллекторы. Вода заполняет все водоносные горизонты, внутри которых метан скапливается в антиклинальных складках-ловушках и мигрирует вверх, насыщая последовательно и метаморфизованные породы, и осадочные диагенетически измененные, и рыхлые уплотненные. Процесс газонасыщения пород идет эпихронно осадконакоплению, в уже сложившейся трещиноватой минеральной пористой структуре пород осадочного чехла, в том числе и пород криогенной толщи.

Механизмы перетока мигрирующих газов в поровом объеме пород доказаны В.И. Авиловым и С.Д. Авиловой [2009, 2011]. О перетоках по трещинам, сколам в системах разломов указано в работе А.А. Нежданова с соавт. [Нежданов и др., 2011]. Выводы В.И. Богоявленского [2014; Богоявленский и др., 2016], О.С. Сизова [2015] обобщают значение этого процесса в криолитогенезе.

В области аккумуляции газом насыщаются донные осадки еще не сложившейся структуры и текстуры, т. е. газонасыщение происходит синхронно осадконакоплению, и накопившийся осадок может промерзнуть в субаквальной обстановке тремя способами:

- за счет дополнительного теплосъема с донного грунта массивами поверхностных морских вод, охлажденных зимой до низкой отрицательной температуры [Шполянская, 2005, 2010];
- за счет поглощения тепла из вмещающих пород дроссельным эффектом расширения газа [Мельников, Спесивцев, 1995; Мельников и др., 1998; Рокос, 2008];

– за счет криосинерезисных процессов в породах, охлажденных ниже 0 °С [Попов, 1985, 1991; Маслов, 1988, 1992, 2008].

В области древней аккумуляции (морские и ледниково-морские равнины, морские террасы) газом насыщаются породы, прошедшие в субаэральной обстановке стадии диагенеза и криодиагенеза, в которых консервировались также скопления биогенного газа.

Но очевидно, что существует определенная хронологическая последовательность поэтапного формирования криогенной толщи над газовой залежью, так как в течение последовательных фаз неоплейстоцена, связанных с периодичностью трансгрессивно-регрессивных циклов Полярного бассейна, осадконакопление сопровождалось газонасыщением и субаквальным промерзанием, а при завершении и выходе на поверхность – промерзанием в субаэральной обстановке.

Хронологическая последовательность развития криолитогенеза.

Дочетвертичный этап – морские осадки палеогена насыщались мигрировавшим глубинным газом, который в континентальном неогене выветривался в атмосферу.

Раннечетвертичный этап – газонасыщение морских фаций осадков полуйской и казымской свит локализовалось только по крупным речным долинам над неотектоническими разломами на ранних периодах развития трансгрессии, но затем, по мере подъема уровня моря, начиналось и над теми газовыми залежами, которые оказались под этой акваторией.

Среднечетвертичный этап – газонасыщение осадков салехардской свиты, для которых характерны максимальная мощность и, соответственно, продолжительность седиментации и интенсивность газонасыщения.

Позднечетвертичный этап – процесс газонасыщения прибрежно-морских отложений казанцевской свиты и I–III морских террас локализуется и дифференцируется по литолого-фациальным обстановкам седиментации и промерзания – морской, лагунно-морской или эстуарно-дельтовой. Следует отметить, что промерзанием газ фиксируется в мерзлой породе до тех пор, пока не наступит стадия прибрежно-морского синкриолитогенеза [Бадю, 2010, 2015а,б], когда непротаявшая часть деятельного слоя мерзлой толщи в пределах лайды переходит в многолетнемерзлое состояние. В эти моменты газ выветривается из пород практически полностью процессами промерзания–оттаивания в деятельном слое. Вполне вероятно, что биогенный газ может консервироваться синхронно накоплению. Тем не менее у В.С. Якушева [2009] показано, что большинство проб внутримерзлотного газа, отобранного из разных свит на Ямале, – биогенного происхождения, и именно его

эмиссия фиксируется современными измерениями, что подтверждается значениями изотопного состава в сравнении с метаном из глубин.

Голоцен–современный этап – процесс газонасыщения донных осадков выражается на донной поверхности покмарками, плагмарками, сипом, а процесс промерзания газонасыщенных пород завершается уже в субаэральной обстановке и сопровождается взрывами гидролакколитов в хасырях, вложенных в морские отложения, без огненных взрывов – в хасырях на неморских породах. Известные и еще до сих пор не взорвавшиеся гидролакколиты на Тазовском полуострове извергаются газами и жидкой глиной [Нежданов и др., 2011], так как они расположены в более мягких геокриологических условиях, чем на Харасавэе и Бованенково. При более низкой среднегодовой температуре пород газонасыщенные льдистые глинистые породы ядра гидролакколитов непременно бы взрывались, как на Бованенково, в Антипаютинской тундре и других расположенных севернее территориях.

ОБСУЖДЕНИЕ

Авторские материалы о криогенной толще пород, разделенной на отдельные стратиграфические пачки с характеристиками литологического и гранулометрического состава, криотекстурного строения, палеонтологического материала [Бадю, 2006, 2011а,б, 2012], иллюстрируют точку зрения автора на вопросы формирования криогенной толщи в изученном регионе. Но существуют различные точки зрения на ее генезис. Так, С.Е. Агалаков [1997] считает, что мерзлота является горизонтом локального газонакопления в плейстоцене. В работах С.Е. Агалакова [1997], А.Р. Курчикова [1992, 2001], А.Р. Курчикова и С.Е. Агалакова [2004] приведены многочисленные данные о разгрузке углеводородов на отдельных участках узлов разломов океанического дна, приуроченных к диапировым структурам протыкания и даже к малозаметным локальным деформациям рыхлых осадков.

По мнению Р.М. Бембеля с соавт. [1997] и Б.М. Валяева [1997, 1999, 2007, 2010], “изверженные” газы типа азота или метана замораживают породы и создают мерзлоту над газовыми месторождениями севера Западной Сибири. Л.А. Жигарев [1988], Н.Ф. Григорьев [1987], Я.В. Неизвестнов с соавт. [2009] относили субаквальную мерзлоту к участкам деградации мерзлой толщи в периоды позднеоплейстоценовых трансгрессий. Известны и точки зрения В.С. Якушева [2009], А.Н. Дмитриевского и Б.М. Валяева [2002, 2010] и других, подтверждающих существование вертикальных перетоков углеводородов в надсенноманском разрезе вплоть до поверхности Земли.

Но никто до настоящего времени не писал о том, что субаквальная криогенная толща формируется в разрезе газоносных структур синхронно осадконакоплению¹. При этом:

1. Газом насыщаются донные осадки, и как только песчаный коллектор окажется под глинистым слоем, поступивший газ, адиабатически расширяясь, замораживает вышележащий глинистый грунт с льдовыделением². Так возникают узкокалиброванные участки мерзлоты.

2. Эти участки сливаются с площадями, промерзающими при охлаждении донных пород, на которых дополнительный теплосъем производится охлажденными зимой на поверхности моря массивами отрицательно-температурных вод.

3. Эти площади сливаются или граничат с участками, на которых массивы донных охлажденных ниже 0 °С пород подвергались оползанию и пликативному смятию.

4. Вновь образованная субаквальная криогенная толща могла возникнуть и на площади распространения реликтовой ранне- и среднелепесточеновой криогенной толщи, развивавшейся в периоды глубоких регрессий Полярного бассейна.

О природе криолитогеоза морских отложений. Автору представляется, что литогенез и диагенез в криолитосфере “превращаются” в криолитогенез, в его сложную систему триединого процесса [Баду, 2010]. В области аккумуляции развивается синкриолитогенез в различных литолого-фациальных модификациях [Баду, 2010, 2015а,б]. В области стабилизации – эпикриолитогенез, одновременно с ним протекает процесс криогенной консервации насыщенных газом пород. В этом процессе породы с газом в поровой влаге и поровых полостях охлаждаются ниже 0 °С, а поровое давление увеличивается из-за того, что в замерзающей влаге газ выделяется в воду из образующегося льда за счет изменения его растворимости во льду и в воде, и из пор газ вытесняется в газоносные слои и горизонты.

Отмечается двойственная природа субаквального криолитогеоза в зависимости от положения в разрезе промерзающей грунтовой толщи.

1. Приповерхностные отложения. Если промерзает донный грунт на участках активного газопроявления и близко (в пределах 10–15 м) к поверхности дна, то формируются слои с максимальной льдистостью или ледогрунт, составляющие объем диапироподобных образований (подобных гидралакколитам). Принимается во внимание ве-

роятность того, что при диффузном высачивании метан окисляется, и по реакции $\text{CH}_4 + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ практически дистиллированная вода разбавляет морскую воду, повышая температуру точки ее замерзания. И так происходит на участках площадных разгрузок в современных осадках шельфа Карского моря, а это участки смешивания пресных и морских вод – “зон маргинальных фильтров”: Тамбейский участок Обской губы, Харасавэйский участок западного побережья Ямала и Юрибейский участок Байдарацкой губы, где также фиксируется активность выделения метана с поверхности донных осадков. Этот процесс явно выражен на лайдах, мелководьях заливов, эстуариев и полузамкнутых лагун, где намываются штормовые выбросы органики и накапливаются тонкодисперсные осадки вдольбереговых озер, отчленяемых от моря подводными береговыми валами. На таких участках метанообразование идет так же активно, как и в фациях мелководий подводного берегового склона. Несомненно, что этот процесс происходил и при накоплении более древних осадков аналогичных фаций в позднем неоплейстоцене и голоцене. При этом, как показано в работе [Лейн и др., 2013], температура морской воды была постоянно низкой, не препятствующей сульфатредукции и метаногенезу.

2. Глубинные отложения. Если донные грунты промерзают глубоко от поверхности, то при малых градиентах отрицательной температуры (не более 0.3–0.5 °С/м) замерзание сопровождается выделением сегрегационного льда.

Аналогично процесс промерзания протекает и при пликативных деформациях слоев, приводящих к отжиму опресненной влаги из глинистых горизонтов в песчаные, где она замерзает, образуя массивную или шлировую криогенную текстуру.

Итак, в проявлениях субаквального криолитогеоза отчетливо выделяются их последовательность и стадийность, соответствующие фациальным обстановкам седиментации и промерзания.

Возможность субаквального криолитогеоза обсуждалась и развивалась А.И. Поповым, Е.М. Катасоновым, исследовалась А.Д. Масловым, М.А. Великоцким, И.Д. Даниловым, Ю.Б. Баду, Н.А. Шполянской, А.Н. Хименковым и другими (табл. 2).

Суть авторской модели в том, что основные концепции о возможных способах субаквального промерзания донных отложений шельфа Карского

¹ По устному замечанию д.г.-м.н. В.С. Якушева о том, что внутримерзлотный газ сингенетичен вмещающим породам мерзлой толщи [Аривьян и др., 1988], следует отметить: газ накапливался в процессе накопления осадков, а затем консервировался при эпигенетическом промерзании.

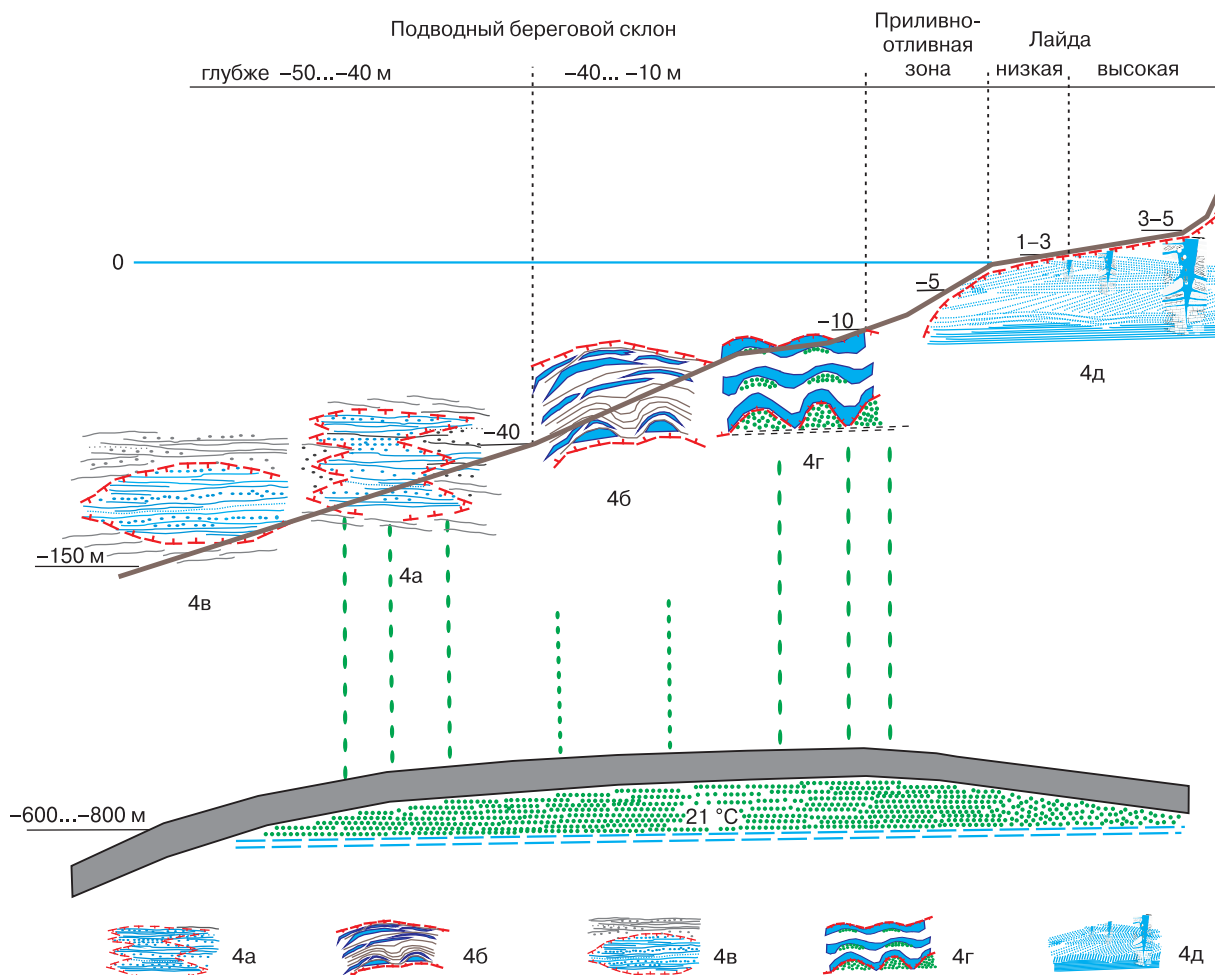
² Автор согласен с замечанием д.г.-м.н. В.С. Якушева о том, что реакция газа на резкую барическую смену обстановки в призабойной части скважины не похожа на таковую в придонном слое пород. Но все-таки очевидно и то, что при величинах термоградиента и бароградиента в придонном слое пород поступающий снизу газ достаточно теплый, чтобы охладить и проморозить вышележащий грунт.

Таблица 2. Типы криолитогенеза в основных концепциях субаквального промерзания в различных фациальных обстановках

Авторы концепций (типов субаквального криолитогенеза)	Типы криолитогенеза (названия даны авторами концепций)
1 – А.И. Попов, А.Д. Маслов	Субмаринный криодиагенез Седиментационный криодиагенез (активный криосинерезис)
2 – Н.А. Шполянская	Субмаринный синкриолитогенез
3а – В.П. Мельников, В.И. Спесивцев	Субмаринный диапирогенный криодиагенез
3б – С.И. Рокос, В.Н. Бондарев, Д.А. Костин, А.Г. Длугач	
4 – Ю.Б. Бадю	4а – эндогенно-диффузионный (3а) 4б – пликативный (1) 4в – субмаринный (2) 4г – субмаринный диапирогенный криодиагенез 4д – прибрежно-морской

моря выстроены в последовательность в зависимости от фациальных условий осадконакопления (см. рисунок)³ [Бадю, 2010; и др.].

1. Субмаринный криодиагенез. А.И. Попов, создавая концепцию субмаринного типа криодиагенеза (1 в табл. 2; 4б на рисунке), оконтурил сфе-



Типологическая схема последовательного и стадийного развития субаквального криолитогенеза в морских отложениях шельфа.

Типы субаквального криогенеза: 4а – эндогенно-диффузионный; 4б – субмаринный криодиагенез; 4в – субмаринный синкриолитогенез; 4г – субмаринный диапирогенный криодиагенез; 4д – прибрежно-морской синкриолитогенез.

³ Эти концепции разработаны на основе полевых работ, подтверждены современными методами исследований, теоретически обоснованы и доказаны.

ру его развития границами подводного оползнеобразования, утверждая [Попов, 1985, 1991], что процесс осадкообразования в отрицательно-температурной среде нередко сопровождается подводными оползновыми процессами и в донных отложениях возникают пликративные дислокации, сопровождающиеся льдовыделением в переувлажненных неуплотненных песчано-глинистых и пылеватых осадках, обладающих пльвунными и тиксотропными свойствами.

Но криогенное преобразование охлажденных морских донных осадков распространено значительно шире. Их консолидация происходит и за пределами развития оползневых процессов, но при непосредственном участии криосинерезиса, когда охлажденные донные осадки, уплотняясь и избирательно отжимая поровый раствор, принимают более устойчивое охлажденное состояние [Маслов, 1988, 1992, 2008]. Кроме того, А.Д. Маслов отмечал, что после перехода морских отложений, претерпевших различные стадии субмаринного криодиагенеза, в субаэральный режим развития охлажденные грунты промерзают, а ранее мерзлые слои увеличивают льдистость за счет понижения естественной температуры в толще. А.И. Попов и А.Д. Маслов утверждали, что при оползневых подвижках и деформировании охлажденных засоленных песчано-глинистых пачек отложений поровый раствор отжимается из прослойки глинистого грунта в песчаный и там, имея меньшую концентрацию, замерзает. То есть при диагенезе охлажденных морских осадков засоляется оставшаяся порода и опресняется выжатый раствор, газ же отжимается из промерзающих слоев песчаного грунта.

2. Субмаринный синкриолитогенез (2 в табл. 2; 4в на рисунке). Промерзание донных отложений возможно и при конвективном (вертикальном) переносе отрицательно-температурных водных масс, когда более холодные слои морской воды от контактов с подошвой морского льда становятся более плотными и погружаются на дно. Тогда сегрегационное льдовыделение в придонном слое осадков происходит при условии, что температура морской воды будет ниже температуры начала замерзания порового раствора осадков.

Такой механизм промерзания глубоководных морских осадков шельфа рассматривается в работах Н.А. Шполянской [2005, 2010]. По мере накопления осадков горизонт, в котором возникают условия для их промерзания, перемещается вверх, и осадки, насыщенные водой, промерзают синхронно их накоплению.

3. Эндогенно-диффузионный и субмаринный диапировый криодиагенез. По В.П. Мельникову и В.И. Спесивцеву [1995; Мельников и др., 1998] (3а в табл. 2; 4а на рисунке), участки повышенной льдистости в донных отложениях связаны с участ-

ками дегазации газовых залежей (по разломам, сдвигам, надвигам), сопровождаемой охлаждением пород при адиабатическом расширении газа. С.И. Рокос [2008], В.Н. Бондарев с соавт. [2002] (3б в табл. 2; 4г на рисунке) показали геологические и геокриологические условия этого процесса. В их работах было отмечено, что обычно газопроявления приурочены к прослоям и линзам песков в толще поздненеоплейстоценовых суглинков и глин придонной части разреза шельфовых отложений. Такие же слоистые пачки подвержены синкриолитогенезу по схеме А.Д. Маслова и А.И. Попова.

4. Прибрежно-морской синкриолитогенез. Классификация синкриолитогенеза [Бадю, 2010, 2015а,б] объединила все выделенные ранее схемы типов криолитогенеза (1–3б в табл. 2) и показала, что его развитие происходит в последовательной смене фациальных обстановок и условий седиментации морских осадков в отрицательно-температурной среде по мере уменьшения глубин моря от подводного берегового склона к приливно-отливной зоне, пляжу, низкой, а затем к высокой лайде (4в–4а–4б–4г–4д на рисунке и в табл. 2), где и завершается субаквальный процесс, и все его события фиксируются в криогенном строении толщи пород.

На глубинах моря более 40–50 м накапливаются, охлаждаются массивами зимних поверхностных вод до температуры ниже 0 °С и промерзают наиболее глубоководные осадки шельфа. На глубинах моря менее 40–50 м охлаждаемые таким же способом породы на участках пликративных оползневых деформаций так же промерзают, как и на участках, где проявляется эмиссия газов из донных осадков. В пределах приливно-отливной зоны промерзание в большей степени обеспечивается экзогенным охлаждением придонной воды и смерзанием ледового покрова с донными осадками. Завершается субаквальная стадия развития криолитологического процесса при выходе накапливающейся пачки осадков на уровень низкой лайды, а затем и высокой. С этого момента криогенная толща пород переходит в субаэральный режим развития, продолжая стадию прибрежно-морского синкриолитогенеза (4д на рисунке; 4д в табл. 2).

Стадийность развития типов криолитогенеза непосредственно связана с хронологическими этапами развития морского бассейна в среднем и позднем неоплейстоцене и в голоцене. Если полагать, что начальные моменты регрессий морского бассейна совпадали с максимумами похолоданий средне- и поздненеоплейстоценовых эпох, то это и были хронологические этапы проявлений криолитогенеза. И главная его особенность – по мере накопления отложений идет их насыщение газом. Под действием избыточного давления в газовой

залежи рассеянные потоки флюидов проникают в грунтовую толщу, запуская процесс первичной миграции [Авилов, Авилова, 2009, 2011]. Под избыточным давлением флюиды, распространяясь по породе, образуют в ней пузырьки, капли, каверны, которые либо создают новые рассеянные потоки, либо прорываются к разуплотнениям в виде трещин, включая и процессы вторичной миграции. Каверны схлопываются, затем наполняются и опять схлопываются, т. е. работают как циклический перекачивающий насос.

Газа в грунтовых порах, в полостях, трещинах, сколах больше там, где поровое пространство меньше занято льдом-цементом, что было подтверждено при анализе данных бурения на Харасавэйской газоносной структуре [Баду, 2006; Кондаков и др., 2006а,б]. Газ присутствует в водах подозерных и подрусловых таликов, в криопэгах, во льду гидролакколитов; но в ядрах миграционных бугров пучения его не может быть там, где нет газа в подстилающих отложениях и в водах таликов.

Газопроявления в донных осадках шельфа (как биогенного, так и мигрировавшего газа другого генезиса, а они всегда смешаны в грунтовой толще) указывают на возможность образования здесь локализованных участков мерзлых пород. В субаэральной обстановке сплошность и мощность мерзлой толщи резко возрастают, и участки газопроявлений оказываются законсервированными в мерзлой толще. Миграция газа приостанавливается, и с ненарушенной поверхности улавливается только эмиссионный поток из деятельного слоя.

ВЫВОДЫ

Данными по частоте встречаемости, интервалам залегания и мощности слоев газоводосодержащих прослоев и линз в генетических комплексах морских фаций пород криогенной толщи п-ова Ямал подтверждается следующее.

1. Природный газ – криолитологический компонент криогенной толщи в газоносной структуре, так как в криогенной толще эпихронным промерзанием зафиксирована та газонасыщенность пород, которая сложилась к началу криогенной литификации разреза независимо от генезиса газа.

2. Миграция газов продолжается миллионы лет, а промерзание пород в разрезе газоносной структуры, зафиксированное в ее криогенном строении, началось в конце среднего неоплейстоцена. По этой причине в морских отложениях, накопившихся за данный отрезок времени, газопроявления зафиксированы только в нижней части казанцевской свиты позднего неоплейстоцена, а верхняя (синкриогенная) толща сильнольдистых песков III–I морских террас позднего неоплейстоцена–голоцена образует мощный барьер – покрывку для миграции глубинного газа.

3. В более древних отложениях морских фаций пород п-ова Ямал миграция газов и газонесущих пластовых вод в песчаных породах приостановлена поздненеоплейстоценовым промерзанием, но продолжалась она только в самых крупных подрусловых и подозерных таликах, возникавших в голоцене после интенсивного термокарста по полигонально-жильным и пластовым залежам льда.

4. Газовые скопления в морских суглинках криогенной толщи образовались не только из местного органического материала микробактериальной переработкой. Фациальная принадлежность таких частей разреза не относится к подводному склону шельфа. Это не ледниково-морская, а мелководная лагунно-морская и прибрежно-морская фация, обогащенная перемытой и переотложенной органикой тундровой растительности и торфяников с мелкими кустарничками.

5. В разрезах газоносных структур, где газ поступал из газовой залежи в вышележащую толщу осадков через литологические неоднородности и неотектонические разломы, температура пород резко изменялась в сторону охлаждения, обеспечивая возможность локального субаквального льдовыделения в донных осадках морских фаций неоплейстоценовых и голоценовых отложений таким же способом, каким это зафиксировано в современных донных породах участков шельфа, прилегающих к побережью Ямала.

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. The Information System of Aquatic Geoecology. Prima-Press, Moscow, 142 p. (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., 2011, т. II, с. 4–8.
 Avilov, V.I., Avilova, S.D., 2011. The concept of chemolithoautotrophic formation of oil and gas, in: Geology of Sea and Oceans: Proceedings of the XIXth scientific conference (school) on marine geology. Tyumen; Moscow, p. 4–8.
- Агалаков С.Е.** Газовые гидраты в туронских отложениях на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа, 1997, № 3, с. 16–21.
 Agalakov, S.E., 1997. Gas hydrates in Turonian sediments in the north of Western Siberia. Geologiya Nefti i Gaza, No. 3, 16–21.
- Агалаков С.Е., Курчиков А.Р.** Ресурсы газа в зонах стабильности газогидратов на севере Западной Сибири // Наука и техника в газовой пром-ти, 2004, № 1–2, с. 26–35.
 Agalakov, S.E., Kurchikov, A.R., 2004. Resources of gas in the gas hydrate stability zones in the north of Western Siberia. Nauka i tekhnika v gazovoy prom-sti, No. 1–2, 26–35.
- Аривьян О.Х., Дегтярев Б.В., Мизулина Н.Б., Белан В.И.** Опыт проведения люминесцентно-битуминологических исследований в зоне многолетнемерзлых пород // Геология нефти и газа, 1988, № 5, с. 13–15.
 Arivyan, O.H., Degtyarev, B.V., Mizulina, N.B., Belan, V.I., 1988. The experience of conducting luminescent bitumen studies in the permafrost zone. Geologiya Nefti i Gaza, No. 5, 13–15.

- Бадю Ю.Б.** Криолитологическое строение грунтовой толщи // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: В 3 т. Т. 1. Харасавэйское газоконденсатное месторождение. СПб., Недра, 2006, с. 85–101.
- Badu, Yu.B., 2006. The cryolithic structure of the ground, in: The cryosphere of oil and gas condensate fields, Yamal Peninsula: in 3 volumes. Vol. 1. The Kharasavey Gas Condensate Field. Nedra, St. Petersburg, p. 85–111.
- Бадю Ю.Б.** Криолитология (учеб. пособие) / Ю.Б. Бадю. М., КДУ, 2010, 528 с.
- Badu, Yu.B., 2010. Cryolithology (a textbook). KDU, Moscow, 528 p. (in Russian)
- Бадю Ю.Б.** Криогенные толщи газоносных структур севера Западной Сибири // Материалы Четвертой конф. геокриологов России. М., Унив. кн., 2011а, т. 2, с. 9–15.
- Badu, Yu.B., 2011a. Cryogenic formations of the gas-bearing structures in the north of Western Siberia, in: Proceedings of the Fourth Conference of Geocryologists of Russia. Universitetskaya Kniga, Moscow, vol. 2, p. 9–15.
- Бадю Ю.Б.** Кривоаномалии в мерзлых толщах газоносных структур севера Западной Сибири // Сб. науч. тр. ООО “ТюменьНИИГипрогаз”. Тюмень, Флат, 2011б, с. 27–30.
- Badu, Yu.B., 2011b. Permafrost anomalies permafrost formation of the gas-bearing structures of the north of Western Siberia, in: Proceedings of Tyumen NIIgiprogas Ltd. Flat, Tyumen, p. 27–30.
- Бадю Ю.Б.** Криогенная толща газоносных структур севера Западной Сибири – взгляд из будущего // Десятая Междунар. конф. по мерзлотведению (ТИСОП): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире / Под ред. В.П. Мельникова. Тюмень, Печатник, 2012, с. 25–30.
- Badu, Yu.B., 2012. The permafrost formation of the gas-bearing structures of the north of Western Siberia – a glance from the future, in: The Tenth International Conference on Permafrost (ТИСОП): Proceedings of the X International Permafrost Conference: resources and risks of permafrost regions in the changing world. Ed. by Melnikov, V.P., Pechatnik, Tyumen, p. 25–30.
- Бадю 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 thickness of cryogenic strata of Yamal Peninsula. Earth's Cryosphere, XVIII (3), 11–22. (in Russian)
- Бадю Ю.Б.** Классификация синкриогенных грунтовых толщ // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана) [Электрон. журн.], 2015а, № 7 (14), с. 26–29.
- Badu, Yu.B., 2015a. Classification of syncryogenic ground formations. Nauka i Obrazovaniye, Bauman Technical University (electronic journal), No. 7 (14), 26–29.
- Бадю Ю.Б.** Льдистость пород криогенной толщи газоносных структур северного Ямала // Криосфера Земли, 2015б, т. XIX, № 3, с. 10–19.
- Badu, Yu.B., 2015b. Ice content of cryogenic strata in the gas-bearing structures of the Northern Yamal. Earth's Cryosphere, XIX (3), 10–19. (in Russian)
- Бадю Ю.Б., Подборный Е.Е.** Особенности криосферы Бованенковского НКМ // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. М., ООО “Газпром Экспо”, 2013, с. 391–411.
- Badu, Yu.B., Podborniy, E.E., 2013. The specific features of the cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field, in: The cryosphere of oil and gas condensate fields, Yamal Peninsula: in 3 volumes, Vol. 2. Gasprom Expo, Moscow, p. 391–411.
- Баулин В.В.** Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР / В.В. Баулин. М., Недра, 1985, 176 с.
- Baulin, V.V., 1985. Permafrost Ground of Oil and Gas-bearing regions of USSR. Nedra, Moscow, 176 p. (in Russian)
- Бембель Р.М., Бембель С.Р., Кашин А.Е., Ласковец Е.Б.** Связь очагов активного нефтегазоаккумуляции и глубинных криогенных источников // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Сб. науч. тр. Новосибирск, Наука, 1997, с. 193–199.
- Bembel, R.M., Bembel, S.R., Kashin, A.E., Laskovets, E.B., 1997. Connection between the centers of active oil and gas accumulation and in-depth permafrost sources. Collection of research works. The results of the fundamental research of the Earth's cryosphere in Arctic and in Subarctic. Nauka, Novosibirsk, p. 193–199. (in Russian)
- Богоявленский В.И.** Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Часть 1 // Бурение и нефть, 2014, № 9, с. 13–18.
- Bogoyavlensky, V.I., 2014. The threat of catastrophic outbursts of oil and gas from the permafrost zone of Arctic. Part 1. Burenije i Neft, No. 9, 13–18.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В., Никонов Р.А.** Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика, 2016, № 3 (23), с. 4–18.
- Bogoyavlensky, V.I., Sizov, O.S., Bogoyavlensky, I.V., Nikonov, R.A., 2016. Remote detection of the areas of ground gas shows and gas outbursts in Arctic: Yamal Peninsula. Arktika: Ekologiya i Ekonomika, 3 (23), 4–18.
- 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.R., Polyakova, N.A., 2002. Subpermafrost accumulation of gas in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora Sea. Geologiya i Geofizika, 43 (7), 587–598.
- Буданцева Н.А.** Газопроявления в мерзлых породах // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. СПб., Недра, 2006, т. 1, с. 235–247.
- Budantseva, N.A., 2006. Gas shows in permafrost, in: Cryosphere of the Oil and Gas Condensate Fields of the Yamal Peninsula. Nedra, St. Petersburg, vol. 1, p. 235–247. (in Russian)
- Валеев Б.М.** Углеродородная дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений // Геология нефти и газа, 1997, № 9, с. 30–37.
- Valyayev, B.M., 1997. Hydrocarbon degassing of the Earth and genesis of oil fields. Geologiya Nefti i Gaza, No. 9, 30–37.
- Валеев Б.М.** Тектонический контроль нефтегазоаккумуляции и углеводородной дегазации Земли // Тектонические и региональные проблемы геодинамики. М., Наука, 1999, с. 222–241.
- Valyayev, B.M., 1999. Tectonic Control over Oil and Gas Accumulation and of Hydrocarbon Degassing of the Earth, in: Tectonic and regional problems of geodynamics. Nauka, Moscow, p. 222–241. (in Russian)
- Валеев Б.М.** Приповерхностный интервал нефтегазоаккумуляции: специфика и масштабы утилизации углеводородных флюидов // Геология морей и океанов: Материалы XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М., ГЕОС, 2007, т. 1, с. 92–95.
- Valyayev, B.M., 2007. The near-surface interval of oil and gas accumulation: the specifics and the scale of utilization of hydrocarbon fluids, in: The geology of seas and oceans: Proceedings of the XVII scientific conference (school) on marine geology. GEOS, Moscow, vol. 1, p. 92–95.

Валяев Б.М. Нетрадиционные ресурсы и скопления углеводородов: природа и специфика процессов нефтегазоаккумуляции // *Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию со дня рождения акад. П.Н. Кропоткина "Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь"* (Москва, 18–22 окт. 2010 г.). М., ГЕОС, 2010, с. 85–89.

Valyayev, B.M., 2010. Unconventional resources and accumulations of hydrocarbons: the nature and the specifics of the processes of oil and gas accumulation, in: *Proceedings of the All-Russia conference with international participation, dedicated to centenary of Academician P.N. Kropotkin "Degassing of the Earth: Geotectonics, Geodynamics, Geofluids; Oil and Gas; Hydrocarbons and Life"* (Moscow, October 18–22, 2010). GEOS, Moscow, p. 85–89.

Вернадский В.И. Об областях охлаждения в земной коре / В.И. Вернадский, Л., Гидрометеоздат (зап. Гидрогеол. ин-та), 1933, т. 10, с. 5–16.

Vernadsky, V.I., 1933. On the Cooling Regions in the Earth's Crust. *Gidrometeoizdat, Leningrad*, vol. 10, p. 5–16. (in Russian)

Григорьев Н.Ф. Криолитозона прибрежной части Западного Ямала / Н.Ф. Григорьев. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1987, 112 с.

Grigoryev, N.F., 1987. The Permafrost Zone of the Littoral Part of Western Yamal Peninsula. *Yakutsk, Permafrost Institute, SB AS USSR*, 112 p. (in Russian)

Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Углеводородная дегазация через дно океана: локализованные проявления, масштабы, значимость // *Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений*. М., ГЕОС, 2002, с. 7–36.

Dmitriyevsky, A.N., Valyayev, B.M., 2002. Hydrocarbon degassing through the ocean bottom: localized shows, the scale of the phenomenon, significance, in: *Degassing of the Earth and the genesis of hydrocarbon fluids and fields*. GEOS, Moscow, p. 7–36. (in Russian)

Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Углеводородная дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений: развитие идей П.Н. Кропоткина // *Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию со дня рождения акад. П.Н. Кропоткина "Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь"* (Москва, 18–22 окт. 2010 г.). М., ГЕОС, 2010, с. 3–10.

Dmitriyevsky, A.N., Valyayev, B.M., 2010. Hydrocarbon degassing of the Earth and the genesis of oil and gas fields: development of the ideas of P.N. Kropotkin, in: *Proceedings of the All-Russia conference with international participation, dedicated to centenary of Academician P.N. Kropotkin "Degassing of the Earth: Geotectonics, Geodynamics, Geofluids; Oil and Gas; Hydrocarbons and Life"* (Moscow, October 18–22, 2010). GEOS, Moscow, p. 3–10.

Друшиц В.А., Садчикова Г.А. Эмиссия метана и четвертичный покров на шельфе Российской Арктики // *Фундаментальные проблемы квартара, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований*. Иркутск, Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015, с. 137–139.

Drushchits, V.A., Sadchikova, G.A., 2015. Emission of methane and the Quaternary cover on the shelf of the Russian Arctic, in: *Fundamental Issues of the Quaternary period, the results of studies and the main directions of further research*. Publishing House of the Geography Institute, SB RAS, p. 137–139. (in Russian)

Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. М., Изд-во Моск. ун-та, 1997, 318 с.

Zhigarev, L.A., 1997. Oceanic permafrost zone. *Moscow University Press, Moscow*, 318 p. (in Russian)

Клейменов В.Ф., Размышляев А.А., Плющев Д.В. Прогнозирование аварийных газопроявлений в скважинах, вскрывающих разрез многолетнемерзлых пород // *Геология, геохимия, геофизика и разработка нефти и газа*. М., ВНИГНИ, 1998, с. 149–162.

Kleimenov, V.F., Razmyshlyayev, A.A., Plushchev, D.V., 1998. Predicting disaster gas shows in the wells cutting open the permafrost cross section, in: *Geology, geochemistry, geophysics and oil and gas production*. VNIGNI, Moscow, p. 149–162.

Кондаков В.В., Язынин О.М., Ленденгольц В.А., Галевич А.Ш., Кондакова О.А., Кусова О.Ф. Геокриологический разрез по данным параметрического бурения скважин 79-П и 80-П, водно-физические и физико-механические свойства грунтов // *Криосфера Харасавэйского газоконденсатного месторождения*. СПб., Недра, 2006а, с. 301–324.

Kondakov, V.V., Yazynin, O.M., Lendengolts, V.A., Galyavich, A.Sh., Kondakova, O.A., Kusova, O.F., 2006a. The geocryological cross section according to the data of parametric drilling of wells 79-P and 80-P, aquatic-physical and physical-mechanical characteristics of ground, in: *the Cryosphere of the Kharasavey Gas Condensate Field*. Nedra, St. Petersburg, p. 301–324.

Кондаков В.В., Язынин О.М., Ленденгольц В.А., Галевич А.Ш. Характер внутримерзлотных газопоявлений в криолитозоне Ямала // *Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений*. Тюмень, ТюмГНУ, 2006б, т. 2, с. 106–108.

Kondakov, V.V., Yazynin, O.M., Lendengolts, V.A., Galyavich, A.Sh., 2006b. The character of internal permafrost gas shows in the permafrost zone of the Yamal Peninsula, in: *The Theory and Practice of Evaluating the condition of the Earth's Cryosphere and Prediction of its Changes*, vol. 2. TyumGNU, Tyumen, p. 106–108.

Костин Д.А., Рокос С.И. Многолетнемерзлые породы и свободный газ в донных осадках Печорского и юго-западной части Карского морей // *Материалы Междунар. конф. "Криосфера нефтегазоносных провинций"*. Тюмень, 2004, с. 109.

Kostin, D.A., Rokos, S.I., 2004. Permafrost and free gas in the benthic sediments of the Pechora Sea and in the south western part of the Kara Sea, in: *Proceedings of the International Conference "The Cryosphere of Oil and Gas-bearing Provinces"*, Tyumen, p. 109.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 352 с.

Kritsuk, L.N., 2010. *The Ground Ice of Western Siberia*. Nauchny Mir, Moscow, 352 p. (in Russian)

Кропоткин П.Н. Дегазация Земли и генезис углеводородов // *Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева*, 1986, т. XXXI, № 5, с. 540–545.

Kropotkin, P.N., 1986. Degassing of the Earth and the genesis of hydrocarbons. *Journal of the All-Union Chemical Society named after Dmitry Mendeleev*, vol. XXXI (5), p. 540–545.

Кузин И.Л. О приоритете в изучении поверхностных газопоявлений в Западной Сибири // *Геология и геофизика*, 1990, № 3, с. 142–144.

Kuzin, I.L., 1990. On the priority in the studies of land gas shows in Western Siberia. *Geologiya i Geofizika*, No. 3, 142–144.

Кузин И.Л. О природе аномальных озер – показателей углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // *Проблемы оценки новых зон нефтегазоаккумуляции в основных продуктивных толщах Западной Сибири*. СПб., ВНИГРИ, 1992, с. 129–137.

Kuzin, I.L., 1992. On the nature of anomalous lakes, the indicators of hydrocarbons in the deep horizons of the sedimentary

- cover, in: The issues of evaluating new zones of oil and gas accumulation in the main product formations of Western Siberia. VNIGRI, St. Petersburg, p. 129–137. (in Russian)
- Кузин И.Л.** Масштабы эмиссии природных газов в Западной Сибири // Изв. РГО, 1999, т. 131, вып. 5, с. 24–35.
Kuzin, I.L., 1999. The scale of natural gas emission in Western Siberia. Izvestiya RGO, vol. 131 (5), 24–35.
- Курчиков А.Р.** Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности / А.Р. Курчиков. М., Недра, 1992, 231 с.
Kurchikov, A.R., 1992. Hydrogeothermal Criteria of Oil and Gas Bearing. Nedra, Moscow, 231 p. (in Russian)
- Курчиков А.Р.** Гидрогеотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 11–12, с. 1846–1853.
Kurchikov, A.R., 2001. The hydrogeothermal regime of the hydrocarbon accumulations of Western Siberia. Geologiya i Geofizika, 42 (11–12), 1846–1853.
- Курчиков А.Р., Агалаков С.Е.** Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) и геотермический режим верхней части разреза севера Западной Сибири // Горные ведомости, 2004, № 4, с. 21–37.
Kurchikov, A.R., Agalakov, S.E., 2004. Permafrost thickness and the geothermal conditions in the upper part of the cross section of the north of Western Siberia. Gornye Vedomosti, No. 4, 21–37.
- Лейн А.Ю., Саввичев А.С., Русанов И.И., Иванов М.В.** Резервуар растворенного метана в водной толще морей Российской Арктики // Система Белого моря. М., Науч. мир, 2013, т. III, с. 346–360.
Lein, A.Yu., Savvichev, A.S., Rusanov, I.I., Ivanov, M.V., 2013. The reservoir of methane edissolved in the water of the seas of Russian Arctic, in: The System of the White Sea, Nauch. Mir, Moscow, vol. III, p. 346–360. (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. Cryodiogenesis under conditions of subaqueal sediment accumulation, in: Geocryology Issues. Moscow University Press, p. 234–243. (in Russian)
- Маслов А.Д.** Криосинерезис и его роль в преобразовании морских осадков на стадии диагенеза // Инж. геология, 1992, № 1, с. 40–49.
Maslov, A.D., 1992. Cryosineresis and its role in the marine sediment transformation at the diagenesis stage. Inzhenernaya Geologiya, 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. Marine sediment cryodiogenesis features of the Arctic shelf. Earth's Cryosphere, XII (4), 3–13. (in Russian)
- Мельников В.П., Спесивцев В.И.** Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск, Наука, 1995, 198 с.
Melnikov, V.P., Spesivtsev, V.I., 1995. Engineering, Geological and Geocryological Conditions of the Shelf of the Barents and Kara Seas. Nauka, Novosibirsk, 198 p. (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 the possible scenario of formation of benthic icing mounds on the Pechora Sea shelf. Earth's Cryosphere, II (4), 51–57. (in Russian)
- Нежданов А.А., Новопашин В.Ф., Огибенин В.В., Ахмедсафин С.К., Варягов С. А.** Грязевой вулканизм на севере Западной Сибири // Сб. науч. тр. ООО “ТюменНИИгипрогаз”. Тюмень, Флат, 2011, с. 74–79.
Nezhdanov, A.A., Novopashin, V.F., Ogibenin, V.V., Akhmedsafin, S.K., Varyagov, S.A., 2011. Mud volcanos in the north of Western Siberia, in: Proceedings of Tyumen NIIGiprogas Ltd. Flat, Tyumen, p. 74–79.
- Неизвестнов Я.В., Супруненко О.И., Боровик О.В., Колчина Н.Л., Куринный Н.А., Францева Т.Н.** Мерзлотно-геотермические проблемы освоения нефтегазовых ресурсов российской Арктики // Пробл. Арктики и Антарктики, 2009, № 2 (82), с. 50–59.
Neizvestnov, Ya.V., Suprunenko, O.I., Borovik, O.V., Kolchina, N.L., Kurinny, N.A., Frantseva, T.N., 2009. Permafrost and geothermal issues of developing oil and gas resources of Russian Arctic. Problemy Arktiki i Antarktiki, No. 2 (82), 50–59.
- Острый Г.Б.** Особенности залегания и формирования многолетнемерзлых пород в связи с геологическим строением территории (на примере Приенисейской части Западно-Сибирской низменности) // Тр. Ин-та мерзлотоведения АН СССР, 1962, т. 19, с. 19–24.
Ostry, G.B., 1962. The characteristic features of bedding and formation of permafrost due to the geological structure of the territory (the example of Yenissei West-Siberian plain), in: Proceedings of the Permafrost Institute, AS USSR, vol. 19, 19–24.
- Подборный Е.Е.** Газопроявления в криогенной толще Бованенковской газоносной структуры // Тр. X Междунар. конф. по мерзлотоведению: Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире / Под ред. В.П. Мельникова. Тюмень, Печатник, 2012, с. 417–421.
Podborny, E.E., 2012. Gas shows in the permafrost of Bovanenkovo gas-bearing structure. Proceedings of the X International Permafrost Conference: resources and risks of permafrost regions in the changing world. Ed. by Melnikov, V.P., Pechatnik, Tyumen, p. 417–421.
- Подборный Е.Е.** Газопроявления в толще мерзлых пород // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: В 3 т. М., ООО “Газпром Экспо”, 2013, т. 2, с. 261–283.
Podborny, E.E., 2013. Gas shows in permafrost formations, in: The cryosphere of the oil and gas condensate fields on Yamal Peninsula, 3 volumes. Gazprom Expo, Moscow, vol. 2, p. 261–283.
- Попов А.И.** О пликативных дислокациях и криолитоогенезе в плейстоценовых отложениях Северной Евразии // Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое. М., Наука, 1985, с. 90–101.
Popov, A.I., 1985. On Plicative Dislocations and on Cryolithogenesis in Pleistocene sediments of Northern Eurasia, in: Development of Permafrost Zone of Eurasia in the Upper Cainozoic. Nauka, Moscow, p. 90–101. (in Russian)
- Попов А.И.** О субмаринном типе криодиогенеза // Инж. геология, 1991, № 6, с. 49–55.
Popov, A.I., 1991. On the submarine type of cryodiogenesis. Inzhenernaya Geologiya, No. 6, 49–55.
- Ривкин Ф.М.** Метан в мерзлых породах и некоторые аспекты его эмиссии. Бованенковское ГКМ, п-ов Ямал // Материалы I конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, с. 273–278.
Rivkin, F.M., 1996. Methane in permafrost and some aspects of its emission. Bovanenkovo gas condensate field (Yamal Peninsula), in: Proceedings of the I conference of geocryologists of Russia. Moscow State University Press, Moscow, p. 273–278.

- Ривкин Ф.М.** Метан в мерзлых породах и прогноз его выделения при потеплении климата и техногенных нарушениях поверхности // Изв. РАН. Сер. геогр., 1998, № 2, с. 64–75.
Rivkin, F.M., 1998. Methane in permafrost and prediction of its emission in climate warming and anthropogenic violations of the ground. The Bulletin of RAS, geography series, No. 2, 64–75.
- Ривкин Ф.М.** Газосодержание в верхних горизонтах мерзлых пород // Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал) / Под ред. В.В. Баулина. М., ГЕОС, 2003, с. 133–146.
Rivkin, F.M., 2003. Gas content in the upper permafrost horizons. in: Geocryological conditions of the Kharasavey and Krusenstern gas condensate fields (Yamal Peninsula). Ed. by Baulin, V.V. GEOS, Moscow, p. 133–146. (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. The engineering and geological features of the near-surface zones of anomalously high formation pressure on the shelf of the Pechora Sea and in the southern part of the Kara Sea. Inzhenernaya Geologiya, 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 the bays and gulfs of the southern part of the Kara Sea. Bulletin of the Commission for Study of the Quaternary Period, No. 67, 66–75.
- Сизов О.С.** Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // GEOMATICS, 2015, № 1, с. 53–73.
Sizov, O.S., 2015. Remote analysis of the effects of land gas shows in the north of Western Siberia. GEOMATICS, No. 1, 53–73.
- Черепанов В.В., Меньшиков С.Н., Варягов С.А., Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю.** Природа межколонных газопроявлений на Бованенковском НГКМ // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2011, № 9, с. 48–54.
Cherepanov, V.V., Menshikov, S.N., Varyagov, S.A., Bondarev, V.L., Mirotvorsky, M.Yu., 2011. The nature of annular gas shows on Bovanenkovo gas condensate field. Geologiya, Geofizika i Razrabotka Neftyanykh i Gazovykh Mestorozhdeniy, No. 9, 48–54.
- Чувилин Е.М., Якушев В.С., Перлова Е.В., Кондаков В.В.** Газовая компонента толщ мерзлых пород в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (п-ов Ямал) // Докл. РАН, 1999, т. 369, № 4, с. 522–524.
Chuvilin, E.M., Yakushev, V.S., Perlova, E.V., Kondakov, V.V., 1999. The gas component of permafrost layers on Bovanenkovo gas condensate field (Yamal Peninsula). Dokl. RAS, 369 (4), 522–524.
- Шполянская Н.А.** Современные проблемы криолитозоны Арктического шельфа // Изв. РАН. Сер. геогр., 2005, № 1, с. 102–111.
Shpolyanskaya, N.A., 2005. Current issues of the permafrost zone of the Arctic shelf. The Bulletin of RAS, geography series, No. 1, 102–111.
- Шполянская Н.А.** Особенности криолитозоны Западного сектора Арктики в системе шельф–суша // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2010, № 6, с. 58–65.
Shpolyanskaya, N.A., 2010. Specific features of the permafrost zone of the western Arctic sector in the shelf-land system. Vestnik Mosk. Universiteta, series 5, geography, No. 6, 58–65.
- Якушев В.С.** Газовые гидраты в криолитозоне // Геология и геофизика, 1989, № 11, с. 100–105.
Yakushev, V.S., 1989. Gashydrates in the permafrost zone. Geologiya i Geofizika, No. 11, 100–105.
- 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 Permafrost Zone. VNIIGAZ, Moscow, 192 p. (in Russian)
- Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А.** Внутримерзлотные газовые и газогидратные скопления в Западной Сибири // Газовые ресурсы России в XXI веке: Сб. М., ВНИИГАЗ, 2003, с. 171–184.
Yakushev, V.S., Perlova, E.V., Makhonina, N.A., 2003. Internal permafrost gas and gas hydrate accumulations in Western Siberia, in: Gas Resources of Russia in the XXI century. VNIIGAZ, Moscow, p. 171–184.

Поступила в редакцию
7 февраля 2017 г.