

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Хименков А.Н., Кошурников А.В., Станиловская Ю.В. — Геосистемы газонасыщенных многолетнемёрзлых пород // Арктика и Антарктика. – 2020. – № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2020.2.32698 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=32698

Геосистемы газонасыщенных многолетнемёрзлых пород

Хименков Александр Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник, Институт геоэкологии РАН

101000, Россия, г. Москва, Уланский проезд, 13, стр. 2

✉ a_khimenkov@mail.ru



Кошурников Андрей Викторович

кандидат геолого-минералогических наук

Ведущий научный сотрудник, МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра геокриологии,

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ msu-geophysics@mail.ru



Станиловская Юлия Викторовна

Специалист по мёрзлым породам

92078, Франция, г. Париж, ул. Place Jean Millier, 2

✉ e-mailjulia.stanilovskaya@total.com



[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2020.2.32698

Дата направления статьи в редакцию:

30-04-2020

Аннотация.

Объектом исследования являются геосистемы газонасыщенных многолетнемёрзлых пород. В настоящее время теоретическая база изучения газовой составляющей в многолетнемёрзлых породах практически не разработана. В тоже время, теоретическая и практическая значимость данной проблемы в последние годы резко возросла. Это связано с выбросами газа при бурении скважин в мёрзлых породах, выявление значительной эмиссии парниковых газов в Арктике, обнаружение ранее неизвестных процессов в криолитозоне - образования воронок за счёт газового выброса. Основным

методом, используемым в данной публикации, является анализ материалов исследований. Синтез полученных результатов осуществлялся на базе геосистемного подхода. В предлагаемой публикации впервые показано, что газонасыщенные зоны в сезонно- и многолетнемёрзлых породах имеют все признаки геосистем: локализацию в пространстве, границы, морфологию, индивидуальное строение и свойства, историю развития, жизненный цикл, иерархию. Выделено 5 типов данных геосистем: деятельного слоя; генетического типа; приуроченных к геологическим структурам; вторичных, связанных с разложением газогидратов в естественных условиях; техногенных (за счёт теплового или механического воздействия на гидратонасыщенные и газонасыщенные мерзлые породы). Предложены перспективные направления в изучении газонасыщенных геосистем криолитозоны и наиболее перспективные методы исследования.

Ключевые слова: мёрзлые породы, разрывные деформации, пластические деформации, газовые каналы, фильтрация газа, флюиды, геосистема газонасыщенных пород, диссоциация газогидратов, напорная фильтрация газа, стадии развития

В части изучения криогенных геосистем в криолитозоне, работа выполнена в рамках Государственного задания: тема АААА-А19-119021190077-6

Введение

Газовая составляющая является наименее изученным компонентом многолетнемёрзлых пород. Тем не менее, данная тема научных исследований, еще недавно казавшаяся незначительной и имеющей только академический интерес, становится чрезвычайно важной, как в теоретическом, так и в практическом отношении. С началом интенсивного освоения Арктики и связанного с ним бурения скважин в многолетнемёрзлых породах, были отмечены многочисленные газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента и шлама, промывочной жидкости и т. д. Диапазон глубин, с которых происходит большинство выбросов, составляет от 10 до 100 м [1, 2, 3, 4, 5]. Резкое повышение температуры на Земле, связанное с растущей концентрацией в атмосфере парниковых газов, прежде всего углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4) которое может быть в значительной степени связано с эмиссией газов, содержащихся в криолитозоне. Исследования, проведенные в последние десятилетия показали, что территориям сложенным многолетнемёрзлыми породами отводится особая роль в современном цикле CH_4 , здесь сосредоточено более 30% всего органического углерода планеты, при этом подавляющая его часть законсервирована в мерзлоте. По оценкам Г. Н. Краева объемы CH_4 в верхних 25 м разреза ММП составляют 7,8-10,0 млрд. м^3 CH_4 . Прогнозируемые климатические изменения к 2100 г. по результатам моделирования глубины сезонного оттаивания в модели тепло- и влагопереноса в ММП (ИФА РАН), приведет к высвобождению из ММП 1,3-1,7 млрд. м^3 CH_4 [6]. В научной литературе существуют различные точки зрения на причины формирования газовой составляющей в многолетнемёрзлых породах. Многочисленными исследованиями различных авторов установлен бактериальный генезис углекислого газа и метана в мёрзлых отложениях и подземных льдах северных территорий и Арктического шельфа [7, 8, 9, 10, 11]. А.И. Обжиров, изучая распределение природных газов в дальневосточных морях пришёл к выводу, что биогенный метан, образующийся *in situ* в донных отложениях, формирует только региональный фон углеводородных газов, имеющий положительную корреляционную связь с количеством в осадках органического вещества. При этом

аномальные концентрации углеводородных газов, связаны или с их концентрацией в ходе эпигенетического промерзания осадков, или с поступлением из внешних источников за счёт миграции глубинного газа [12].

Перечислим некоторые основные условия концентрации газа в мерзлых породах.

Г. Н. Краевым и Е. М. Ривкиной выявлена динамика криогенной концентрации метана при неравномерном промерзании деятельного слоя и эпигенетического промерзания озёрных отложений [13]. В.С. Якушевым показано, что мощное влияние на накопление газа в форме газогидратов, в многолетнемёрзлых породах, оказало неравномерное эпигенетическое промерзание выходящих из субаквального положения морских осадков [4]. В работах С.Е. Агалакова [14], А.Р. Курчикова [15, 16] показано, что мёрзлая толща является зоной локального накопления в диапировых структурах глубинного газа, поступающего по разломам. По мнению Б.М. Валяева [17, 18], Р.М. Бембеля и др. [19], поднимающийся из глубин газ, сам является активным фактором, формирующим мерзлоту над газовыми месторождениями севера Западной Сибири, за счёт охлаждения при адиабатическом расширении.

В последние годы вышло ряд статей, посвящённых рассмотрению особенностей процессов связанных с миграцией газа в мёрзлых породах и льдах, в которых газонасыщенные зоны рассмотрены как газодинамические геосистемы [20, 21, 22], на основании лабораторного моделирования изучены процессы фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах [23, 24].

В предлагаемой статье авторы рассматривают газонасыщенные зоны в мёрзлых породах как самостоятельные геосистемы, входящие в состав более крупных геологических образований – криогенных геосистем [25].

Целью данной публикации является выявление закономерностей формирования газонасыщенных геосистем в многолетнемёрзлых породах.

1. Газонасыщенные геосистемы криолитозоны

Наличие газовых включений в талых породах в наибольшей мере обеспечивается жизнедеятельностью бактерий, перерабатывающих, содержащихся в них органическое вещество. В результате миграции, выделившийся газ удаляется или в перекрывающий водоём или в атмосферу. При промерзании талых осадков образуется газонепроницаемый экран, обуславливающий фиксацию и перераспределение газа в формирующихся мёрзлых породах. Таким образом, получают развитие автохтонные зоны повышенного содержания газа в мерзлых породах. Они распространены повсеместно, размеры таких зон будут зависеть в основном от количества органики и мощности осадков. Аллохтонные зоны повышенного содержания газа связаны, в основном, с поступлением газа из более глубоких горизонтов по тектоническим трещинам и наклонно залегающим пластам. Области, где формируются данные зоны, чаще всего соответствуют локальным газонасыщенным структурам. В зависимости от масштабов и интенсивности газонакопления в можно выделить три типа первичных газонасыщенных геосистем в мёрзлых породах: деятельного слоя, генетических типов отложений, тектонических структур.

1.1. Газонасыщенные геосисемы деятельного слоя

В сезонномёрзлом слое, несмотря на его незначительные вертикальные размеры и

кратковременность существования, формируются локальные зоны повышенного содержания газа. Г. Н. Краевым и Е.М. Ривкиной (2017) изучалась динамика изменения концентрации метана при промерзании деятельного слоя. Метан с первого дня промерзания равномерно накапливался в талых горизонтах почвы, перекрытых промерзшим слоем, со скоростью порядка $0,015 \text{ см}^3/\text{кг}\cdot\text{сут}$. В течение зимы в почвах Северо-Востока Сибири формируется $2\text{--}3 \text{ г}/\text{м}^2$ метана при мощности СТС $50\text{--}60 \text{ см}$ и около $1 \text{ г}/\text{м}^2$ в СТС мощностью 30 см . Авторы приходят к выводу, что средние значения концентрации метана у подошвы СТС – около $2 \text{ см}^3/\text{кг}$ могут формироваться лишь за счет локального продуцирования. Но наблюдаемые местами локальные максимумы, многократно превышающие эти значения, могут быть объяснены только при допущении возможности перераспределения газа по латерали. Это происходит при формировании неровностей фронта промерзания, обусловленных неоднородностями поверхностных условий, или различиями увлажнения и вещественного состава отложений. В вогнутых частях подошвы слоя сезонного промерзания формируются своеобразные газовые микроловушки. Например, для формирования концентрации $15 \text{ см}^3/\text{кг}$ ($24 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ в пределах 1 дм^2) на одном из изученных участков потребовался биогенный метан не только из промерзающего вышележащего модельного столбика почвы объемом 5 дм^3 , но еще из 11-12 соседних. Данные закономерности перераспределения газа при промерзании СТС не зависят от генезиса отложений. В естественных условиях содержание метана в нижней части сезонноталого слоя составляло в среднем $1,4 \text{ см}^3/\text{кг}$. В льдистом переходном слое, подстилающем деятельный слой и оттаивающий лишь в самые теплые летние сезоны, наблюдается повышенное содержание метана. Высокое льдосодержание переходного слоя связано, вероятно, с миграцией связанной воды из талой зоны в мёрзлую и движением в том же направлении газа (рис. 1) [13].

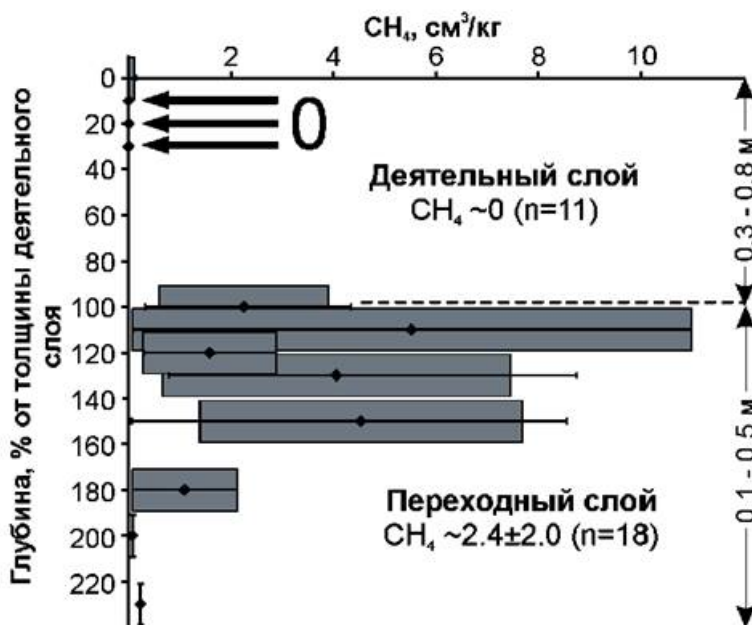


Рис. 1. Распределение средней концентрации метана по относительным глубинам в деятельном слое и периодически оттаивающем верхнем горизонте многолетней мерзлоты (переходном слое) в сводных разрезах почв Северо-Востока Сибири [13].

1.2. Газонасыщенные геосистемы, формирующиеся в различных генетических типах отложений

Газ, формирующийся в осадочных породах, связан своим происхождением с

органическим веществом (ОВ), которое присутствует почти во всех осадочных породах. По месту происхождения относительно бассейна седиментации ОВ может быть автохтонным и аллохтонным. Автохтонная часть ОВ - продукт разрушения организмов, обитавших в той же среде, в которой происходило осадконакопление. Аллохтонная часть ОВ поступает в осадок с территорий, прилегающих к бассейну седиментации, в виде остатков высшей растительности, гумуса или гуминовых растворов. Можно выделить участки, более благоприятные для накопления органического вещества и соответственно большего содержания газа в осадках. К ним относятся болота, озёра, дельтовые участки моря, лагуны, бухты, морские заливы. Здесь в условиях анаэробного и частично аэробного разложения происходит выделение газа. Способствует этому и жизнедеятельность бактерий, для которых органическое вещество является питательной средой.

В порах талых субаквальных осадков газ содержится в свободном (в виде пузырей), адсорбированном, защемленном и растворенном состоянии. Ориентировочные оценки свидетельствуют, что в глинистых грунтах содержание газа не превышает 5 %. В песчаных грунтах (в газовых карманах) оно может достигать значительно больших величин. В морских осадках газовая компонента представлена в основном метаном, углекислым газом, сероводородом, кислородом, азотом [26]. Концентрация газов в грунтах зависит, от региональных и локальных условий участка морского дна. Значимым содержанием углеводородных газов в грунте принято считать концентрации в 0,1 мл/л и выше [27]. Высоким содержанием метана (от 0,1 до 285 мл/кг) отличаются современные четвертичные глубоководные осадки Черного моря, в то время как, например, в море Лаптевых (материково-окраинный бассейн) содержание газов в осадках составляет 0,005-1,0 мл/кг. При этом максимальные значения концентрации метана зафиксированы в отложениях подводного продолжения дельты р. Лены [28]. Фоновые значения содержания метана в пробах донных осадков Карского моря составляют 0,001 мл/кг, а модальные значения содержания этого газа в пределах газовых аномалий (как правило, приуроченных к зонам разрывных нарушений), превышают фоновые более чем в 100 раз [29].

Рассеянные биогенные газы, выделяясь в придонную воду, формируют только региональный фон углеводородных газов в воде, а при подтоке газа из недр, в том числе из нефтегазовых залежей, формируются аномальные поля. По данным А. И. Обжирова содержание углеводородных газов в воде и донных отложениях является индикатором месторождений углеводородов, газовых гидратов в недрах. В дальневосточных морях в придонном слое воды над месторождениями нефти и газа существуют аномальные поля углеводородных газов, где содержание метана в 10-100 раз превышает фоновые значения (фоновые концентрации метана обычно составляют 0,00007- 0,00009 мл/л). В придонной воде над Лунской структурой (Охотское море) содержание метана в центральной части структуры 0,011 мл/л, что на два порядка превышает фон. Столь высокая аномалия связана с сильной нарушенностью структуры, большой мощностью продуктивной толщи (500 м), сравнительно небольшой глубиной ее залегания (1700 м) [30]. На присахалинском шельфе в придонной воде фоновыми являются концентрации метана 60-90 нл/л; в центральной части в районе распространения красных глин, содержание метана в придонной воде не превышало 10 нл/л. Эти примеры показывают, что биогенный метан, образующийся в донных отложениях, не создает аномалии в придонной воде. Аномальные концентрации углеводородных газов в придонных слоях возникают только в том случае, когда существует залежь, которая создает трещиноватые зоны в перекрывающих её породах и

подток углеводородов из залежи с высоким давлением газа. м. В этих районах содержание метана может превышать фоновый на порядки достигает значений 1100 - 12500 нл/л. В районе выхода газа на глубине в керне донных илистых осадков, были обнаружены пустоты, включения газогидратов [12]. Данные наблюдения отражают общие признаки выделения газонасыщенных зон. Для каждого генетического типа отложений существуют фоновые значения содержания газа в осадках и аномальные значения формирующиеся в результате различных процессов (криогенная концентрация, поступления глубинного газа по трещинам и различным зонам тектонических деформаций).

Исследование М.Ю Токаревым с соавторами осадков Кандалакшского залива Белого моря (глубина опробования до 3 м) показало наличие газонасыщенных зон размером от десятков в до сотен метров (иногда до нескольких километров). Локальные участки газонасыщенных осадков «газовых шапок» приурочены к понижениям кровли фундамента, где в условиях спокойной гидродинамической обстановки образовались послеледниковые осадки большой мощности в которых наблюдается активная жизнедеятельность микроорганизмов продуцирующих газ. Особенностью строения газонасыщенных осадков текстуры являются многочисленные газовые включения в виде трещинок и пузырьков. Данные компьютерной томографии кернов показали наличие в толще осадка многочисленных полых трещин субвертикальной ориентировки обусловленных дегазацией осадка (рис. 2). Осадок неструктурирован, газовые включения представлены изометричными, округлыми полостями диаметром около 1 мм и вытянутыми в субвертикальном направлении искривлёнными трещинами длиной до 5 мм и толщиной до 2 мм.

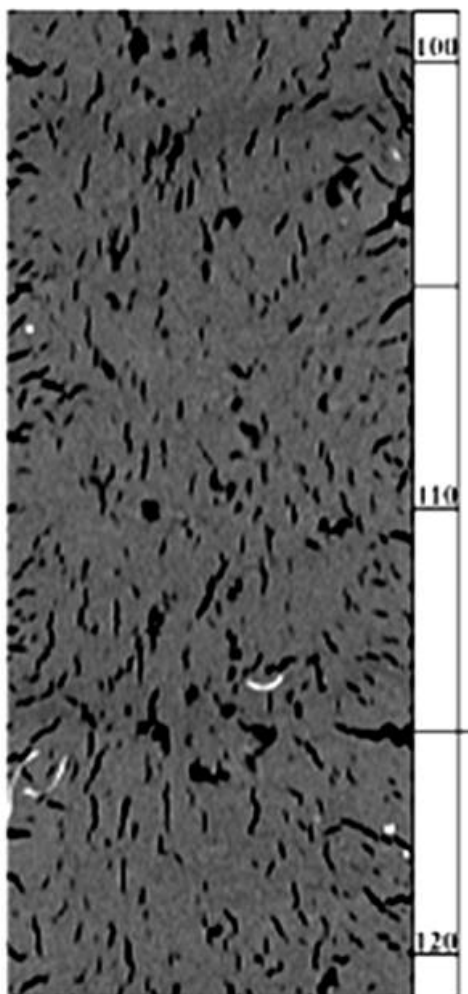


Рис. 2. Фрагмент рентгеноплостностного среза. Серое - осадок, чёрное – трещины, обусловленные дегазацией осадка (глубина 100-120 см) [\[31\]](#).

Анализ состава газовой фазы показал, что в ней преобладает метан. Его концентрация изменяется от нескольких микролитров до 779 мкл/л. Максимальные значения концентрации метана (более 15 000 мкл/л) наблюдаются в нижней части разреза на глубине более 150 см. В пределах верхней части разреза (до 70 см) значения концентрации не превышают 6000 мкл/л. Уменьшение концентрации метана и вообще углеводородов (УВ) можно объяснить уменьшением сорбционной способности осадков вверх по разрезу, уменьшением их плотности и увеличением способности к десорбции, а также значительными потерями УВ при извлечении керна. Отметим присутствие в газовой фазе тяжелых гомологов вплоть до пентана в малой концентрации. Присутствуют этан (максимально 1,5 мкл/л), этен (до 2,3 мкл/л); пропан (максимально 5,6 мкл/л), бутан (до 1,7 мкл/л), пентан (несколько микролитров на литр) [\[31\]](#).

Промерзание лагунных отложений с большим количеством органики сопровождается интенсивным перераспределением внутригрунтовых вод и содержащихся в них газов. В толще лагунных отложениях при промерзании формируются локальные зоны накопления углеводородных газов соединённых между собой каналами незамёрзшей минерализованной воды (криопэгами) обильно встречающихся в мерзлых лагунных осадках. Промерзание обводнённых насыщенных органикой осадков приводит не только к образованию газовых карманов, но и повышению давления в них, что в свою очередь может приводить к переходу части газа в клатратное состояние [\[32\]](#).

Промерзание, выходящих из-под уровня моря морских осадков, происходит на фоне значительной неоднородности поверхностных условий. В лагунах и в отчленившихся опреснённых озёрах продолжается субаквальное осадконакопление при положительных или близких к 0 °С отрицательных температурах. На окружающих водоёмы участках перешедших в субаэральное положение, в это время начинается интенсивное промерзание. Глубокое проникновение мёрзлой зоны на одних участках и отсутствие мерзлоты на других приводит к формированию криогенного напора и горизонтальному перераспределению грунтовых вод. При заполнении водоёма осадками последующем промерзании сверху под мёрзлыми глинистыми толщами с малой фильтрационной способностью грунтовые воды с содержащимися в них растворёнными газами оказываются запечатанными. Последующее промерзание формирует массивы подземных льдов и выделившихся при льдообразовании газов [\[33, 4\]](#).

Имеются единичные описания криогенных газонасыщенных геосистем генетического уровня. Для этого воспользуемся описанием газонасыщенной геосистемы осадков старичного озера в пределах Колымской низменности данным Г. Н. Краевым с соавторами (рис. 3). Разложение органики в озёрных осадках и породах талика при недостатке кислорода приводит к образованию и накоплению метана как в молодых озерных отложениях, Эпигенетическое промерзание озера началось после заполнения его осадками или осушении при дренировании. Промёрзание верхнего слоя осадков приводит к формированию газонепроницаемого слоя и повышению давления в талой зоне. Под слоем мерзлого грунта, в более глубоких слоях талых осадков, метаногенез продолжает развиваться. Продолжающееся промерзание вытесняет большую часть метана вниз в грубозернистые слои с значительным объёмом свободных пор, где он накапливается в свободном виде.

Исходя из полевых наблюдений, данных радиоуглеродного датирования и лабораторных

исследований авторы предполагают, что в зависимости от природных условий и динамики замерзания метан содержащийся в талых осадках может при их эпигенетическом промерзании сместиться вниз на десятки метров и накапливаться в литологических карманах [34]. Следует добавить, что карманами, в которых могут накапливаться отжимающиеся при промерзании талых осадков могут быть обусловлены не только литологией но и морфологией фронта промерзания. Кроме того, газ может накапливаться не токо в свободной форме но и в виде газогидратов, поскольку возникающие давления до 30 кг/см², большое количество воды и газа при отрицательных температурах создают для этого условия.

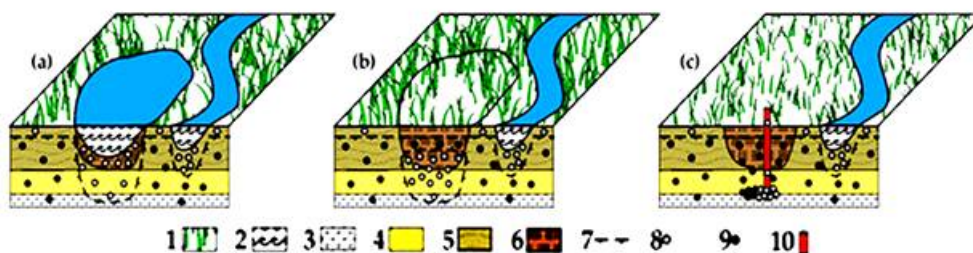


Рис. 3. Палеоэкологическая реконструкция участка на Колымской пойме а) талые осадки под пойменным озером с потенциальным образованием метана; б) промерзание обогащенных метаном осадков после осушения озера; (с) метан, захваченный в порах и полостях мёрзлой породы после полного замерзания талика. 1 - пойма; 2 - речные и озерные воды; 3 – русловой гравийный слой; 4, речной аллювий, слой песка; 5, пойменный аллювий, иловый слой; 6 - озерные отложения, торфяные илы; 7 - граница вечной мерзлоты; 8, свободный метан; 9 - захваченный метан; 10, скважина 3,4-07 глубиной 25 м [34].

Фоновые значения концентрации метана в эпигенетических мёрзлых породах различного генезиса приведены в таблице 1. Приведённые данные показывают значительный разброс значений содержания газа, даже в одном генетическом типе. Различия минимальных и максимальных значений может отличаться на порядок (для прибрежно-морских глин). Не малую роль в этом играет криогенная дифференция газов при промерзании.

Таблица 1. Концентрация метана (ppmV) в мёрзлых породах [10]

Возраст	МИС 1			МИС 2			МИС 2–3			МИС 5		
Генезис	Болотный, озерно-аллювиальный, эоловый			Озерно-аллювиальный			Прибрежно-морской			Морской, прибрежно-морской		
Состав	Пески (6)*			Пески, супеси (7)			Пески, супеси, суглинки (10)			Глины, суглинки (8)		
CH ₄	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.
Динамический метод	–	–	–	115	217	14	3329	5248	104	1682	2215	1148
Метод "head space"	68	212	18	186	460	15	1009	1969	97	2884	5515	585

Примечание. * В скобках количество образцов.

Выше были рассмотрены примеры газонасыщенных зон генетического уровня сформированных при эпигенетическом промерзании. В сингенетических многолетнемёрзлых породах содержание газа намного меньше. На рисунке 5 представлено содержание метана в едоме (синкриогенная полигенетическая толща на Северо-Востоке Сибири). Это связано с особенностями формирования данных многолетнемёрзлых пород. Газ, накапливающийся в сезонноталом слое, удаляется в

атмосферу. Приращение слоя многолетнемерзлых пород происходит за счёт слоя промерзающего снизу, при этом газ дополнительно отжимается из зоны льдообразования. Поэтому синкриогенные отложения, несмотря на большое количество органики, содержит незначительное количество метана. Покровный слой мощностью до 3 м, оттаявший в голоцене и промерзший затем эпигенетически, метана содержит гораздо больше (рис. 4). В этом случае газ вместе с рыхлосвязанной водой мигрирует к фронту промерзания и там накапливается.

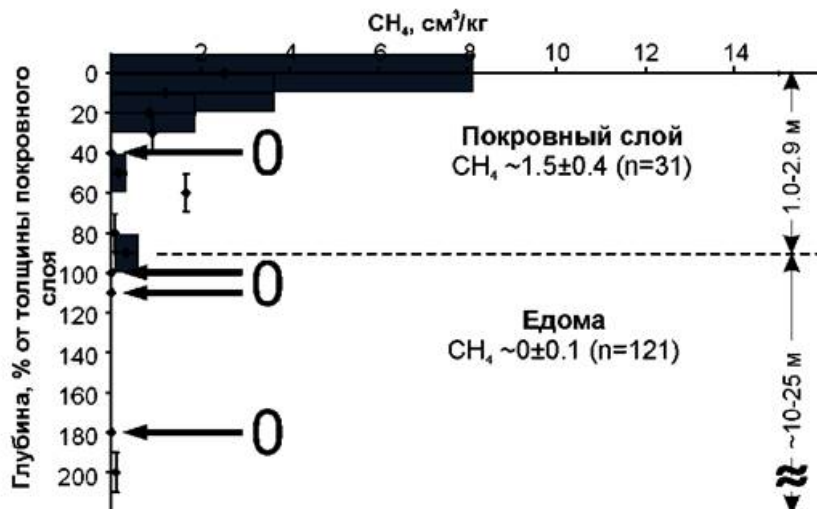


Рис. 4. Распределение средней концентрации метана по относительным глубинам в горизонте многолетнемерзлых пород, оттаивавшем в голоцене (покровном слое) в сводных разрезах почв Северо-Востока Сибири [13].

К газонасыщенным криогенным геосистемам следует отнести и многолетние бугры пучения (гидролакколитов). Размеры их изменяются в больших пределах: диаметр основания от 20 до 250 м, а высота — от 2 до 70 м. Кровля бугров обычно состоит из переслаивающихся льдистых суглинков и супесей мощностью 2-10 м, под которыми залегает ледяное ядро мощностью до десятков метров. Данные образования формируются при эпигенетическом промерзании озёрных отложений (чаще всего термокарстовых). В этих условиях промерзание происходит по типу «закрытых систем», характерными особенностями которых является возникновение криогенного напора. Он приводит к концентрации воды и растворённого газа в локальной зоне под растущим бугром.

Бугры вырастают в промерзающих озёрных котловинах постепенно, в течение длительного времени, поднимаясь со скоростью от едва заметной до превышающей 0,5 м в год. Апикальные части ледяных ядер бугров бывают обогащены крупными воздушными включениями, за счёт выделения воздуха при льдообразовании в результате чего здесь образуются обширные воздушные полости [35]. Перекрывающие газонасыщенные зоны низкотемпературные льдистые мерзлые породы не позволяют газам находящимся под давлением поступать в атмосферу. Растущие бугры подстилаются тальными водоносными горизонтами или водяными линзами мощностью до 2 м и обладающими гидравлическим напором (рис. 5). На рис. приводится типичная схема строения растущего многолетнего бугра пучения на Севере Аляски.

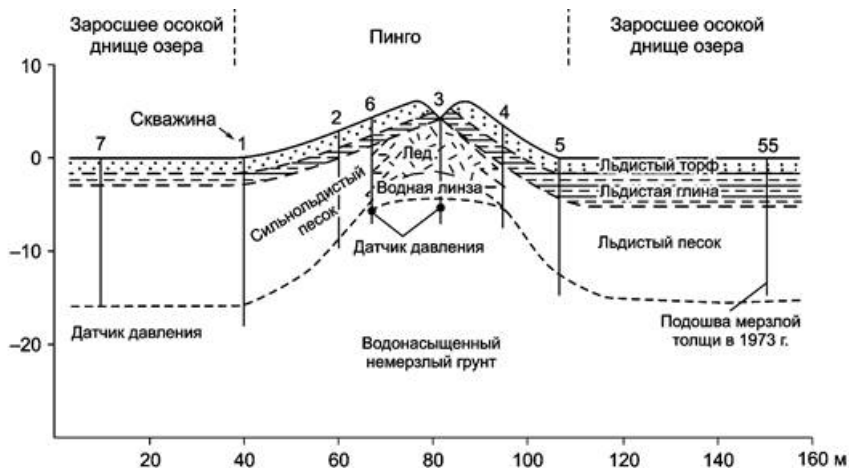


Рис. 5. Схема строения растущего пинго на Севере Аляски [36].

1.3. Газонасыщенные геосистемы тектонических структур (купола, валы)

Геофизические исследования арктического шельфа показало прямую пространственную связь местоположения газонасыщенных зон в то числе и в виде газогидратов с антиклинальными поднятиями в осадочном чехле. Сейсмоакустические исследования проведенные специалистами ОАО МАГЭ, на акватории Западно-Шпицбергенской континентальной окраины Баренцева моря показали прямую пространственную связь местоположения зоны газонасыщенных осадков (акустически прозрачное тело) с антиклинальными поднятиями (резкое прерывание корреляции отражающих горизонтов, куполообразные «вздутия» вышележащих горизонтов, наличие характерных помех, «мигрирующих» по пластам, вверх по склону, что дополнительно подтверждается результатами газогидрохимической съемки, и с зонами повышенной концентрации растворенных углеводородов [37].

Наибольшее содержание газа в многолетнемёрзлых породах севера Западной Сибири приурочено к приподнятым блокам в виде тектонических валов и сводов. В осадочном чехле севера Западной Сибири эти своды и мегавалы образуют структуры размерами в десятки и сотни километров и амплитудой в сотни метров (рис. 6). [38].

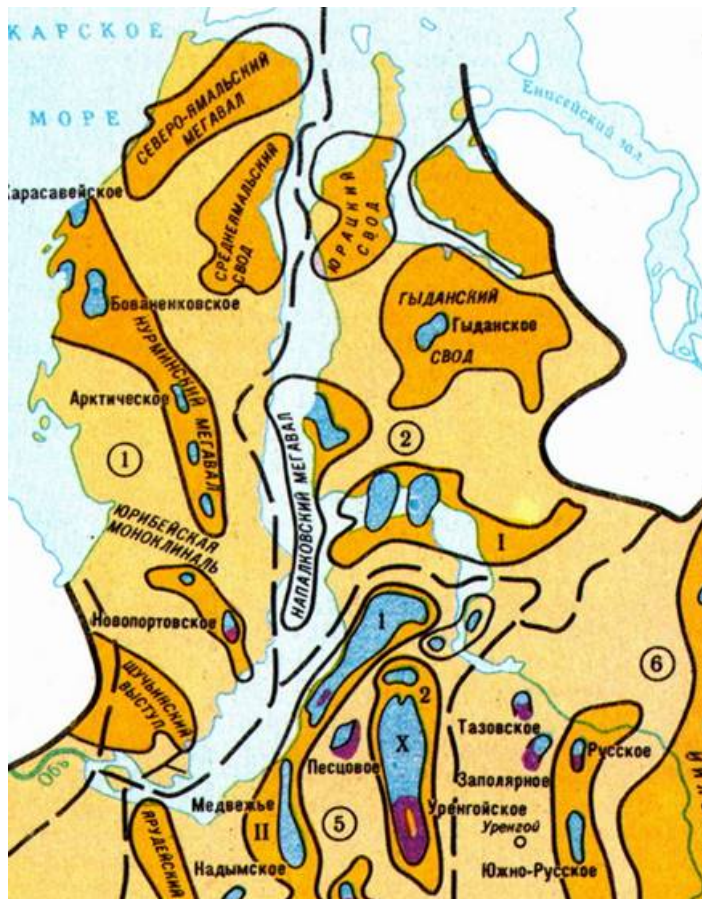


Рис. 6. Фрагмент карты «Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция» [39].

Перераспределение газа во много связано с движением подземных вод. Приуроченные к газонасыщенным структурам пластовые воды имеют повышенную газонасыщенность (табл. 2). По данным изучения разреза неокотских отложений на 39 площадях в северных районах Западно-Сибирского мегабассейна концентрация метана, в них колеблется от 78 до 98 %. В большинстве случаев газонасыщенность более 3 см³/см³ указывает на наличие в пластовых условиях свободной газовой фазы, что подтверждается получением фонтана газа с водой [40].

Таблица 2. Состав водорастворенных газов нефтегазовых месторождений севера Западной Сибири [40].

Площадь	Число определений	Состав газа (в среднем), %					Газонасыщение л/л
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂	
Берриас-валанжинские отложения							
Русская	6	97,58	0,64	0,31	0,24	0,65	2,61
Южно-Русская	4	86,51	2,87	1,93	0,37	2,45	1,52
Газовская	3	92,68	2,75	0,94	0,91	1,32	3,08
Заполярная	9	85,78	5,31	3,05	0,82	2,74	2,62
Юрхаровская	7	91,66	3,58	2,25	0,42	1,54	2,73
Ямсовейская	5	83,29	2,92	0,98	0,93	2,43	3,00
Уренгойская	21	91,12	3,57	1,36	0,74	1,23	3,01
Находкинская	2	93,76	2,64	0,85	0,57	2,31	2,16
Самбургская	7	90,34	90,34	2,89	1,53	1,85	2,49
Среднемессояхская	3	90,7	3,44	1,23	1,11	2,71	1,38
Паньковская	12	77,96	10,25	6,10	0,22	0,88	2,22

Паньодипская	12	97,90	10,25	0,45	0,55	0,00	2,25
Медвежья	11	92,32	3,57	1,25	0,17	1,84	2,8
Надымская	6	85,80	4,74	4,20	0,44	2,24	1,2
Песцовая	16	90,32	3,41	1,86	0,59	1,93	2,1
Среднеямальская	3	90,66	2,71	0,34	1,85	2,93	2,03
Новопортовская	6	90,31	3,06	1,08	0,53	1,69	3,00
Геофизическая	3	92,15	2,74	1,06	0,64	2,02	3,1
Малоямальская	2	96,15	1,36	0,67	0,78	1,01	2,53
Гыданская	4	90,85	2,34	0,76	1,28	2,36	1,4
Ярудейская	3	87,84	2,99	2,67	0,37	3,76	2,42
Етыпуровская	7	90,38	2,74	1,08	0,07	3,42	2,03
Южно-Часельская	2	95,68	1,08	Следы	0,59	2,54	1,74
Усть-Часельская	4	95,98	1,35	0,06	0,19	3,43	1,85
Готерив-барремские отложения							
Русская	2	98,43	0,41		0,28	0,62	2,39
Южно-Русская	2	87,96	2,45	1,48	0,29	3,14	1,44
Тазовская	9	94,75	2,83	0,71	0,19	1,28	2,33
Заполярная	24	91,78	4,26	2,83	0,38	2,06	2,41
Юрхаровская	10	02,98	3,25	1,74	0,31	1,38	2,43
Ямсовейская	1	84,02	2,87	0,84	0,99	2,57	1,6
Уренгойская	10	92,72	3,21	0,84	0,53	1,3	2,0
Находкинская	3	94,17	2,43	0,56	0,47	2,01	2,55
Самбургская	5	91,35	2,78	1,03	0,35	1,76	2,5
Песцовая	2	91,72	2,95	1,67	0,55	2,01	1,9
Харасавэйская	15	87,69	3,84	1,95	0,76	1,23	1,99
Южно-Тамбейская	2	85,72	5,67	2,00	0,98	0,87	2,58
Нейтинская	7	90,18	3,47	1,25	0,87	2,05	2,18
Среднеямальская	5	92,78	3,37	0,23	1,65	3,4	2,1
Крузенштернская	3	91,34	3,87	1,92	0,98	1,49	1,15
Бованенковская	15	92,93	3,15	0,91	0,76	1,05	2,03
Новопортовская	11	91,34	3,87	1,76	0,62	1,59	2,41
Геофизическая	13	94,3	2,5	1,08	0,65	1,94	1,92
Малыгинская	2	93,81	2,01	0,63	1,56	2,04	2,5
Арктическая	3	91,76	2,84	1,77	1,02	1,53	1,89
Малоямальская	1	96,31	1,18	0,43	0,62	0,82	2,17
Гыданская	4	95,34	1,01	0,37	1,02	2,07	1,08

При рассмотрении вопроса о масштабах генерации УВГ в глинистых осадках обязательно нужно принимать во внимание тот факт, что при малейшем нарушении горизонтального положения все флюиды, в первую очередь газовые, начинают мигрировать вверх по восстанию пластов. В результате на более приподнятых участках дна всегда обнаруживаются гораздо большее количество УВГ, особенно СН₄. При миграции УВГ вверх по восстанию пластов происходит их дифференциация и этим можно объяснить большое содержание СН₄ при очень малом количестве тяжёлых УВГ в приподнятых участках [41].

Перенос газов зачастую связан с подземными водами. Газы могут перераспределяться как в растворённом, так и свободном виде. Отжимающиеся в ходе диагенетического уплотнения грунтовые воды создают напор на контактах различных по литологии слоёв. В. Энгельгардт связывает с этим напором повышение давления воды сверх

гидростатического в песках, окруженных глинистыми осадками. Даже небольшой наклон песчаных пластов приводит к накоплению свободных объемов грунтовых вод, в количестве большем, чем это можно предположить, исходя из значений мощности подстилающих глин [42]. В данном случае речь идёт об отжати грунтовых вод вверх. При промерзании песков в прибрежно-морских отложениях будет задействован обратный механизм. Криогенный напор будет задавливать грунтовые воды под глинистые осадки.

Формирование криогенных газонасыщенных геосистем в морских отложениях на территориях развития тектонических структур процесс, растянутый во времени, проходящий несколько стадий и обусловленный взаимодействием различных факторов. Ю.Б. Бадю для этих условий предложена гипотеза стадийного формирования газовых скоплений в многолетнемёрзлых породах морского генезиса.

Первая стадия. Морские осадки формируются при отрицательных температурах. Вследствие диагенетических процессов выделяется опреснённая вода, которая замерзает. В результате формируется субаквальная толща осадков содержащих ледяные включения и имеющих площадное распространение. На локальных участках, поступающий из глубин газ, адиабатически расширяется, при этом вблизи выводящих каналов осадки промерзают. Подводные склоны подвержены оползевым процессам, в результате которых, при тиксотропном разуплотнении выделяются распреснённые воды. Их замерзание также формирует льдонасыщенные участки. Таким образом, на первой стадии получают распространение локальные участки льдосодержащих субаквальных осадков.

На второй стадии, также в субаквальных условиях, эти промёрзшие участки сливаются между собой. В это время начинают формироваться мерзлотные экраны и локальные газовые «ловушки». Особенно большое развитие они получают над глубинными скоплениями газа в диапировых структурах.

На третьей стадии, после того, как морские осадки переходят в субаэральное состояние, они подвергаются эпигенетическому промерзанию. При движении фронта промерзания газ фиксируется в локальных зонах, частично переходя в газогидраты. В последующем мерзлая толща становится непроницаемой для потоков газа поступающих снизу. Таким образом, формируется газонасыщенная криогенная толща, являющаяся частью газоносной структуры [43].

1.4.Связь крупных массивов подземных льдов с газонасыщенными многолетнемёрзлыми породами

Промерзание слоя воды или водонасыщенного песка приводит к комплексу процессов связанных с отжатием из зоны льдообразования (криогенная концентрация) растворённых газов и солей. В тектонических структурах наблюдаются значительные потоки газонасыщенных вод. При эпигенетическом промерзании эти условия являются наиболее благоприятными для формирования парагенетических комплексов массивных подземных льдов, горизонтов минерализованных вод (криопэггов), и газонасыщенных зон. При этом промерзающие водоносные горизонты обладают значительными гидравлическими напорами, которые могут превышать давление гидроразрыва. При мощности осадков около 20 м гидростатическое давление достаточное для развития гидроразрыва составляет немногим более 4 кг/см². Реальные давления, возникающие в водоносном горизонте при промерзании намного больше (табл. 3).

Таблица 3. Обобщённые характеристики криопэггов в пределах Харасавэйского и

Бованенковского ГКМ [\[44\]](#)

Геоморфологический уровень	Глубина Залегания (м)	Величина Напора (м)	Температура °С	Минерализация г/л
Лайда	1 - 15	0 - 10	-4 - -8	70 - 150
Пойма низовий рек	5 - 50	0 - 30	-3 - -6	40 - 110
I–III морские террасы	3 - 15	0 - 4	-1 - -3,5	20 - 70

Между глинистой толщей и водоносным песчаным горизонтом формируется слой воды, промерзание которого формирует пласт подземного льда. Ю. К. Васильчуком, в голоценовых отложениях первой лагунно-морской террасы и современной лагунно-морской лайды Обской губы, были обнаружены пластовые льды мощностью от 0.2 до 5.7 м в залегающие на глубине до 2 м. Изучение изотопного состава и палинологических остатков в пластовых льдах, позволили сделать вывод о комплексе сегрегационных и инъекционно-сегрегационных процессов при их формировании. [\[32\]](#) Более полное рассмотрение формирования мощных внутригрунтовых пластовых льдов в морских отложениях рассмотрено нами в ранее опубликованных работах [\[45, 46, 20\]](#). Таким образом, на глубинах (до 100 м) в промерзающих водонасыщенных осадках формируются зоны, где одновременно присутствуют газы (в основном метан и углекислый газ бактериального происхождения), вода (пресная или минерализованная) и создаются достаточно высокие давления, обеспечивающие возможность формирования газогидратов при эпигенетическом промерзании морских осадков. Если учесть, что песчаные горизонты играют значительную роль в формировании внутригрунтовых пластовых залежей подземного льда, то становится понятной парагенетическая связь залежей газогидратов, пластовых льдов и криопэгов [\[47\]](#).

На севере Западной Сибири распределение пластовых залежей подземных льдов (рис. 7) в целом совпадает с расположением тектонических структур (рис. 6). К этим структурам приурочены и зоны повышенного содержания водорастворенных газов в пластовых водах (табл. 2). Сопоставление средних содержаний метана в газовой компоненте во вмещающих отложениях и в пластовых льдах указывает на более высокие их концентрации в последних, (до 23352 ppmV) (табл. 1) [\[10\]](#)



Рис. 7. Распределение пластовых залежей подземного льда в северной части Западно Сибирской плиты. 1 – инъекционно-сегрегационные ПЗЛ в голоценовых и верхнеплейстоцен-голоценовых отложениях; 2 – инъекционно-сегрегационные ПЗЛ в средне- и верхнеплейстоценовых морских отложениях; 3 – инъекционные ПЗЛ в ядрах голоценовых бугров пучения; 4 – Инъекционные ПЗЛ в средне- и верхнеплейстоценовых морских и ледниково-морских отложениях; 5 – погребённые ПЗЛ в голоценовых аллювиальных отложениях; 6 – погребённые ПЗЛ в голоценовых и верхнеплейстоцен-голоценовых лагунно-морских и прибрежно-морских отложениях; 7 – погребённые ПЗЛ в среднеплейстоценовых ледово- и ледниково-морских отложениях; 8 – погребённые ПЗЛ в средне- и верхнеплейстоценовых ледниковых отложениях; 9 - пластовые льды неустановленного генезиса [\[48\]](#).

1.5. Формирование наиболее крупных газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых породах в субэаральных и субаквальных условиях Бованенковского НГКМ

Процессы формирования крупных газонасыщенных геосистем в многолетнемёрзлых породах на территориях разных нефтегазовых месторождений имеют много общего. Поэтому рассмотрим их на примере одного из наиболее изученных и крупных - Бованенковского НГКМ. Данное месторождение находится в центральной части п-ва Ямал и приурочено к Бованенковскому локальному поднятию (рис. 8).

Разрез мёрзлых пород представлен преимущественно глинистыми породами с песчаными горизонтами различной мощности. Для мёрзлых пород Бованенковского НГКМ характерно повсеместное распространение газопроявлений различной интенсивности и продолжительности. Практически все газовые проявления на Бованенковском ГКМ приурочены к оторфованным пылеватым пескам, встречающимся в разрезе мёрзлой толщи до глубин порядка 130 м. Газ находится в свободной форме или в виде газогидратов. По составу газ на 99% состоит из метана с незначительной примесью азота, диоксида углерода, этана, пропана, бутана, что делает его близким к составу апт – сеноманского горизонта. Многолетнемёрзлые породы представлены в основном глинами с песчаными прослоями различной толщины. Дебиты газовых выбросов колеблются от 50 до 14000 м³/сут. Объёмы газа достигают значительных размеров, В одной из скважин (64-П-2) в интервале 72-80 м запас газа был оценён в 490 тыс. м³, а

площадь газовой залежи в 80 тыс. м² [49].

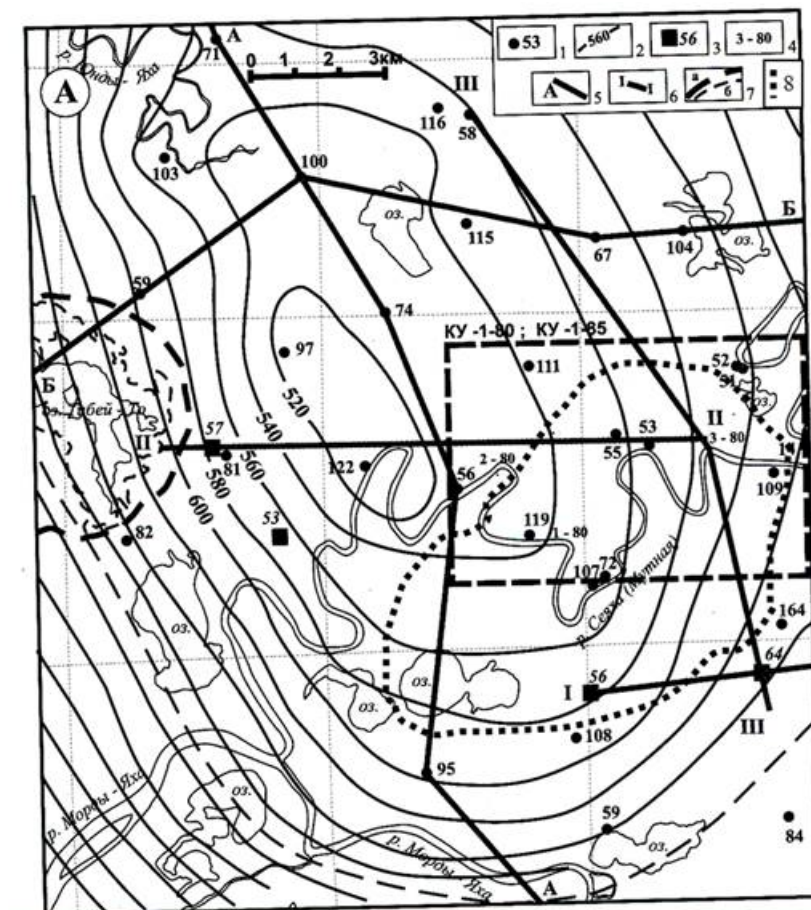


Рис. 8. Структурная схема южной части Бованенковского ГКМ

(по материалам Л.Н. Крицук с добавлением)

1 – разведочная скважина и её номер; 2 – изогипсы кровли сеноманской продуктивной толщи; 3 – куст промысловых скважин; 4 – номер обнажения пластового льда; 5 – линия структурно-геологического разреза; 6 – линия геокриологического разреза; 7 – граница: а – опытного участка ВСЕГТНГЕО. Б – хасырея озера Тибейто 8 – граница зоны области наибольших газопроявлений [50].

Более 85% газопроявлений в отложениях ямальской серии зафиксированы на глубинах порядка 60-80 м (рис. 11). Этот горизонт выдержанн на площади порядка 120 км². Наиболее масштабные газовые выбросы с дебитами до 10–15 тыс. м³/сут при средних значениях порядка 800–1000 м³/сут характерны для гидратонасыщенных горизонтов. Ниже них наблюдается увеличение общей засолённости мёрзлых пород или водоносных минерализованных слоёв (криопэгов) (рис. 9). Увеличение концентрации солей ниже опресненных гидратонасыщенных интервалов – типичная, ситуация для севера Западной Сибири, связанная с ожатием солей из зоны льдо- и гидратообразования. при промерзании водонасыщенных отложений. При этом обратный процесс, диссоциации газогидратов резко интенсифицируется в присутствии минерализованных растворов. [51]. Отдельные газопроявления зафиксированы непосредственно в пластовых льдах. При проходке ледяных тел фиксируется сильный запах газа. [5].

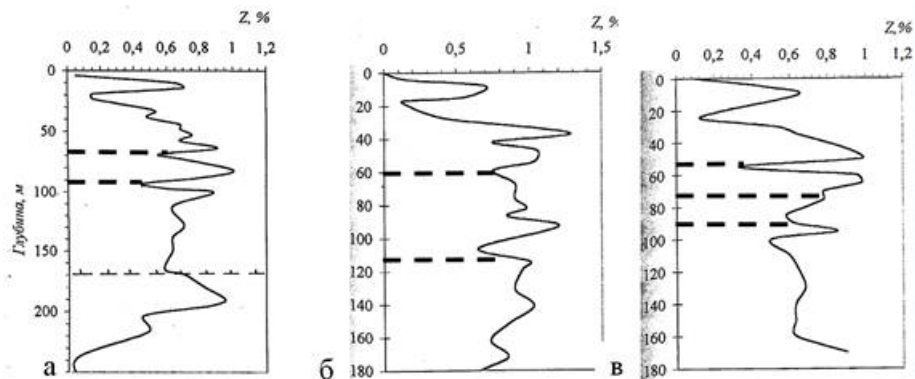


Рис. 9. Распределение общей засолённости (Z %) пород по глубине мёрзлой толщи а – скважина 610-П-2, б - скважина 52-П-1, в - скважина 610-П-3. Штриховые линии отмечают глубины газопроявлений [52].

В приведённых на рис. 9 скважинах наблюдались газопроявления, приуроченные к зонам пониженной, относительно соседних горизонтов, засолённости: в скважине 610-П-2 на глубине 63-67 м (дебит 500 м³/сут), 91-95 м (дебит 1000 м³/сут); в скважине 52-П-1 на глубине 60-70 м (дебит 100-150 м³/сут), 119-123 м (дебит 100-150 м³/сут); в скважине 610-П-3 на глубине 54-58 м (дебит 300 м³/сут), 71-76 м (дебит 200-300 м³/сут), 91-94 м (дебит 300-400 м³/сут) [52].

По данным В.Л. Бондарева с соавторами в мёрзлых породах Бованенковского НГКМ присутствуют следующие генетические типы газов:

- сингенетические газы, установленные в интервале глубин 16-150м), значение $\delta^{13}\text{CCH}_4$ – 70‰ и ниже характерное для газов биогенерации (встречаются пробы со значением $\delta^{13}\text{CCH}_4 = -59,2$ ‰), что указывает на присутствие в их составе некоторой доли эпигенетических (миграционных) газов;
- сингенетические, с некоторым содержанием эпигенетических (термокаталитических) газов, свойственны водорастворённым газам (интервал 10-252 м) в которых значения $\delta^{13}\text{CCH}_4$ изменяется от -61,0 до -67,7 ‰;
- смешанные газы (сингенетические и эпигенетические), сорбированные осадочными породами, в которых содержание $\delta^{13}\text{CCH}_4$ изменяется в пределах -43,5 - -76,4 ‰ (интервал мёрзлых пород 0 – 262 м и 202-350 палеоген-меловые отложения), что присуще газам биогенного происхождения [49].

Данные материалы свидетельствуют, что в формировании криогенных образований участвуют газы биогенного происхождения, часть сформировалась *in situ* и могла быть перераспределена криогенными процессами в ходе эпигенетического промерзания, а часть являются миграционными и привнесена из ниже залегающих горизонтов (палеоген-меловых отложений).

Характерной чертой строения многолетнемёрзлых пород Бованенковского НГКМ является наличие скопления мощных пластовых залежей подземных льдов, большая газонасыщенность в виде газогидратов, приуроченных к песчаным слоям, наличием криопэгов, приуроченных к тем же песчаным слоям. Прослеживается взаимосвязь данных структурных элементов, образующих взаимосвязанные парагенетические комплексы, включающие пластовые льды, газ в виде газогидратов или скопления свободного газа и

минерализованные воды (криопэги).

Пластовые льды в буровых профилях наиболее часто прослеживаются под останцами третьей и второй террас (с абсолютными отметками от 15–20 до 40 м), а также в пределах аллювиальной и озерно-аллювиальной поймы. Анализ данных по 3 тыс. скважин глубиной от 10 до 100 м, пробуренных в пределах территории Бованенковского скопления НГКМ, показал наличие в 260 из них пластовых льдов. Перекрывающие пластовые льды отложения представлены преимущественно суглинками мощностью от 2 до 12 м. Подстилаются песками, супесями, реже суглинками [53]. Об огромных объёмах ледяных массивов свидетельствуют материалы исследований С.Ю. Пармузина и С.Е. Суходольского. Они показали наличие ледяных тел протяженностью 1–2 км и более. На площадке площадью около 4 км² приуроченного к вершине газового купола (рис. 10), было пробурено более 50 скважин. Как отмечают исследователи объём льда на этом участке в виде единого ледяного тела или серии разобщённых тел, даже при осторожных подсчетах, превысил 4 млн м³ [54].

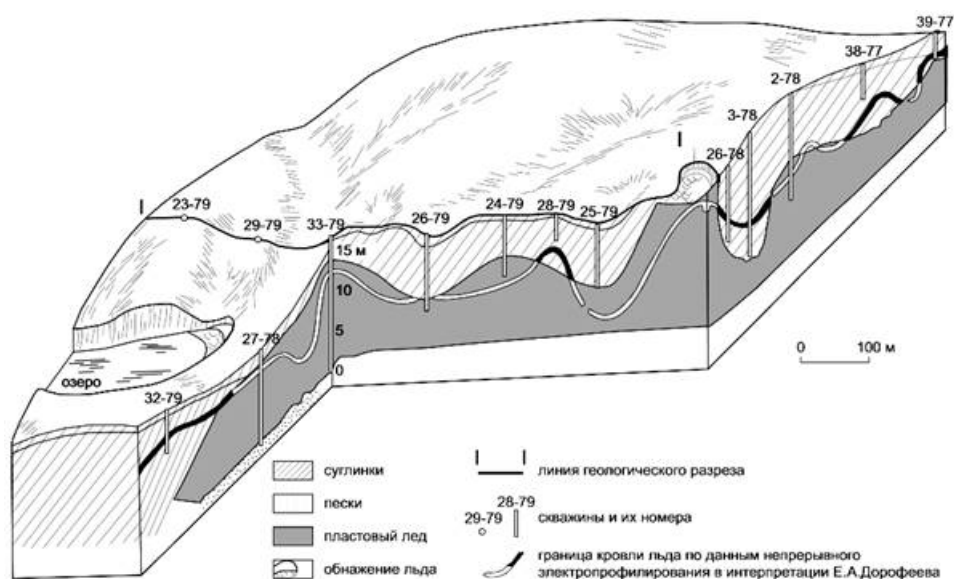


Рис. 10. Блок диаграмма останца третьей террасы на правом берегу реки Сеяха [54]

При бурении скважин в многолетнемерзлых породах были встречены многочисленные водопроявления, встречающиеся на глубинах 40–130 м (рис. 11). Минерализация криопэгов составляет 26 – 34 г/л [52]. Криопэги часто подстилают пластовые залежи (рис. 12).

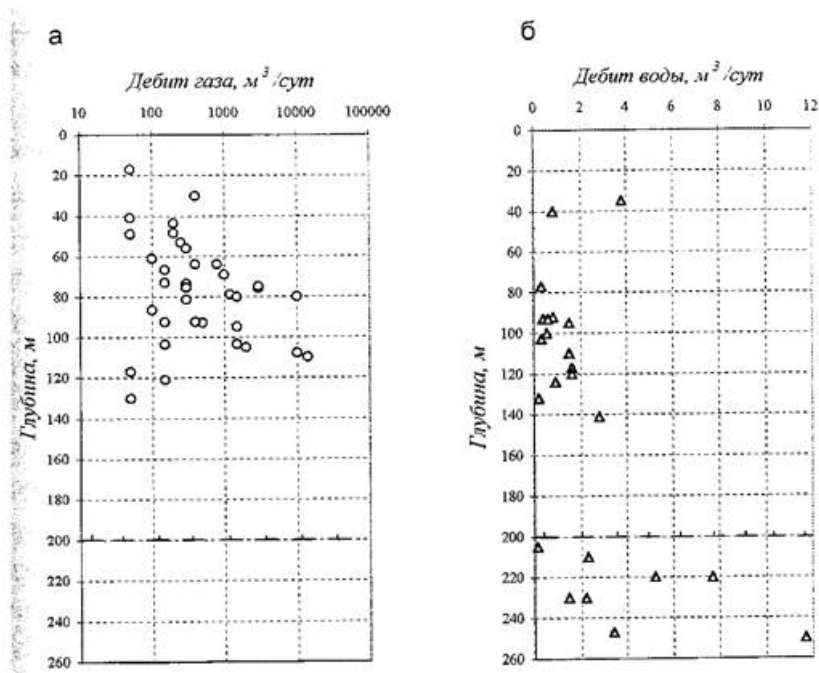


Рис. 11. Распределение газообразных (а) и жидких (б) флюидов по глубине мёрзлой толщи [52].

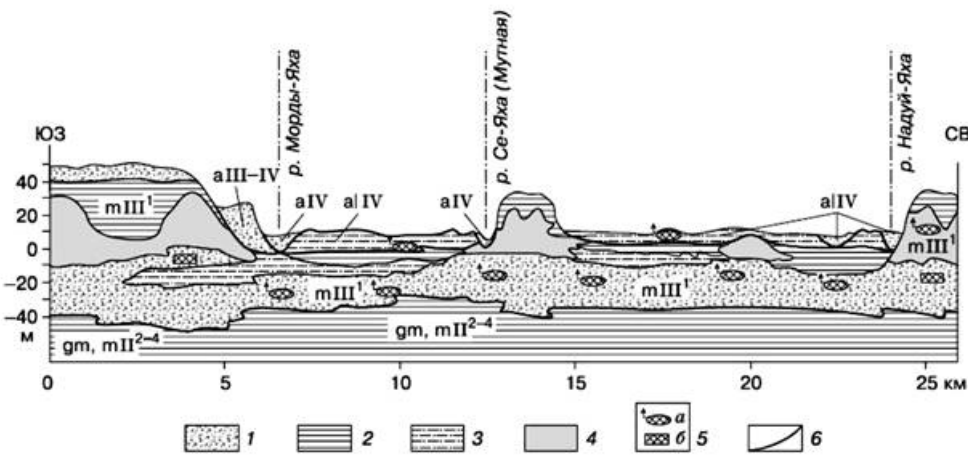


Рис. 12. Схематический разрез через Бованенковское месторождение [55]: 1 – пески; 2 – глины; 3 – переслаивание песков, суглинков и глин; 4 – пластовый лед; 5 – линзы криопэггов (а – установленные, б – предполагаемые); 6 – граница комплекса с пластовым льдом.

Рассмотрим условия, способствующие формированию газонасыщенной криогенной геосистемы Бованенковского ГКМ.

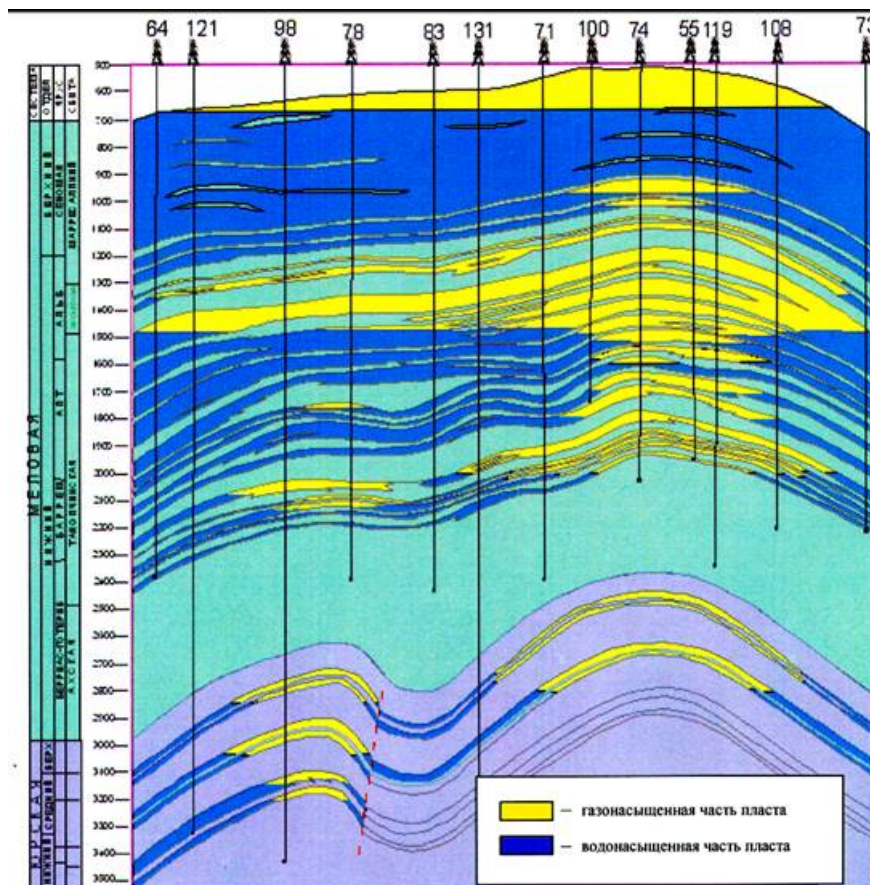


Рис. 13. Геологический разрез продуктивных толщ Бованенковского НГКМ (ВНИИГАЗ, 2003) Цитируется по [56]

По верхнему сеноманскому горизонту размеры месторождения 51x20,5 км [57] условно можно считать этой площадью водосбора. Высота горизонта около 150 м, с глубины 520 до 670 м (рис. 13). Водоносный апт-сеноманский горизонт составляют аргиллитоподобные глины с частыми прослойками песчаников, алевролитов и уплотненных песков. Кровля горизонта прослеживается на абсолютных отметках минус 500 – 1250 м. По химическому составу воды горизонта хлоридные натриевые с минерализацией от 4,6 до 23,8 г/дм³. Для вод горизонта характерна высокая газонасыщенность - от 1000 до 2300 см/дм³ (табл. 2). Преобладающим компонентом растворенных газов является метан (94-99%), биогенного происхождения. Верхняя часть разреза, куда подается под давлением вода из нижних горизонтов, представлена переслаивающимися песками и суглинками. Наиболее мощный песчаный горизонт (пористость 40%, коэффициент пористости – 0,67), залегает в отложениях казанцевской свиты на глубине 30-50 м. В подстилающей салехардской свите на глубинах 75-100 м (иногда с 60 м) залегает мореноподобный супесчаный слой (пористость 41%, коэффициент пористости – 0,70) [49]. Воды из нижних горизонтов, с растворенными в них газами по трещинам поступают в морские отложения, а затем и в морские воды. Эпигенетическое промерзание приводит: во-первых, к криогенной концентрации грунтовых вод; во-вторых, формирует экран препятствующий выходу воды и газов на поверхность.

В результате наложения многих факторов и взаимодействия многих процессов в толще многолетнемерзлых пород формируется сложная криогенная геосистема, включающая парагенетический комплекс криогенных образований: высокольдистые мерзлые отложения, пластовые залежи подземных льдов, криопэги, высокая газонасыщенность в виде многочисленных горизонтов газогидратов и газовых карманов.

В целом криогенная геосистема газонасыщенных многолетнемерзлых пород Бованенковского ГКМ в структурном отношении состоит из парагенеза более мелких криогенных подсистем, сформировавшихся в разное время и в различных природных обстановках.

Крупное скопление газонасыщенных мерзлых пород в субаквальных условиях

Значительные скопления газонасыщенных пород в сочетании с мощными массивами подземных льдов встречены на шельфе арктических морей. Наиболее мощные массивы льдов, газонасыщенных мерзлых пород и интенсивные выбросы газа обнаружены на объекте «Диапиры» (восточная часть Печорского моря, около 60-70 км к юго-западу от пролива Карские Ворота), расположенном в пределах газоносной структуры (рис. 14).

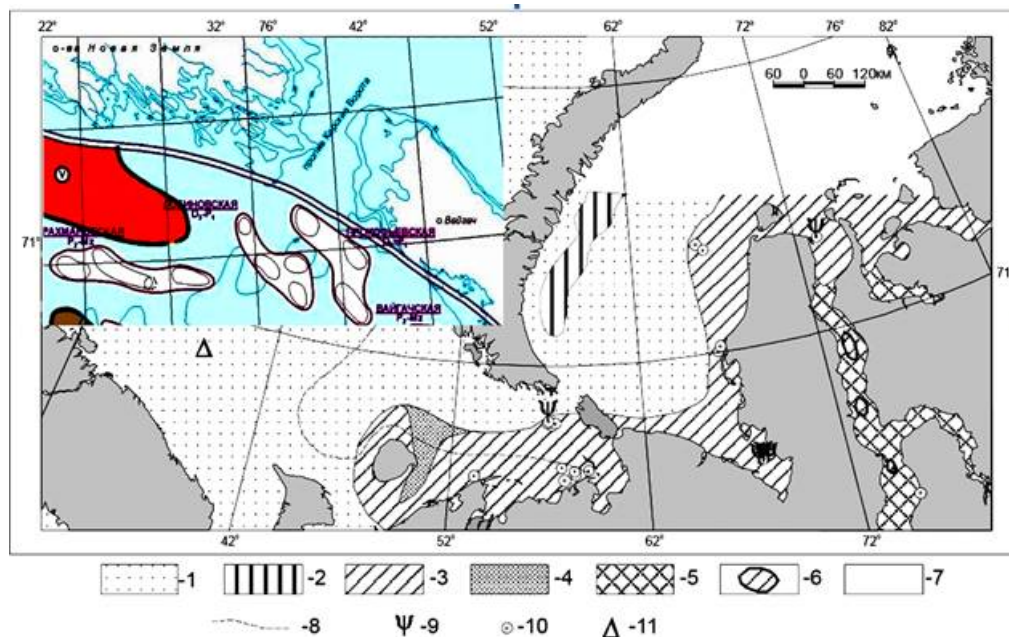


Рис. 14. Газонасыщенные осадки Баренцево-Карского шельфа [58]

(с добавлением фрагмента карто-схемы нефтегазоносных структур [59])

1 - глубины моря более 80-100 м, 2 - зона стабильности газогидратов метана, 3 - глубины моря менее 50-100 м, 4 - зона приколгуевского талика, 5 - губы и заливы, приуроченные к эстуариям крупных рек, 6 - акустические окна (переуглублённые впадины), 7 - отсутствие данных, 8 - изотерма 0 °С придонной воды, 9 - точки скважин, где имели место выбросы, 10 - точки скважин, вскрывших мерзлые грунты, 11 - точки скважин в которых отмечены нефтепроявления

В районе этого объекта на поверхности дна широко развиты изометричные в плане диапироподобные поднятия с относительным превышением до 30-50 м при ширине основания до 70-300 м (рис. 15). На сводах этих поднятий, при глубине менее 0.5 м ниже дна, бурением были вскрыты мерзлые льдистые грунты. Одна из скважин пробуренная в центре холма около 300 м в поперечнике и высотой около 12 м, под слоем суглинистого ила мощностью 0,3 м и до глубины 25 м был вскрыт чистый пресный лёд, мощность которого не установлена. Материалы бурения показали, что в верхней присводовой части поднятия объемная льдистость грунтов достигает 80-95 % и более (ледогрунт). Начиная с глубины 30 м ниже поверхности дна, объемное содержание льда не превышает 30 % и постепенно уменьшается вниз по разрезу. Наиболее глубокая, из пробуренных здесь скважин, вскрыла 100 метровую монотонную мерзлую толщу,

предположительно микулинских морских глин и суглинков.

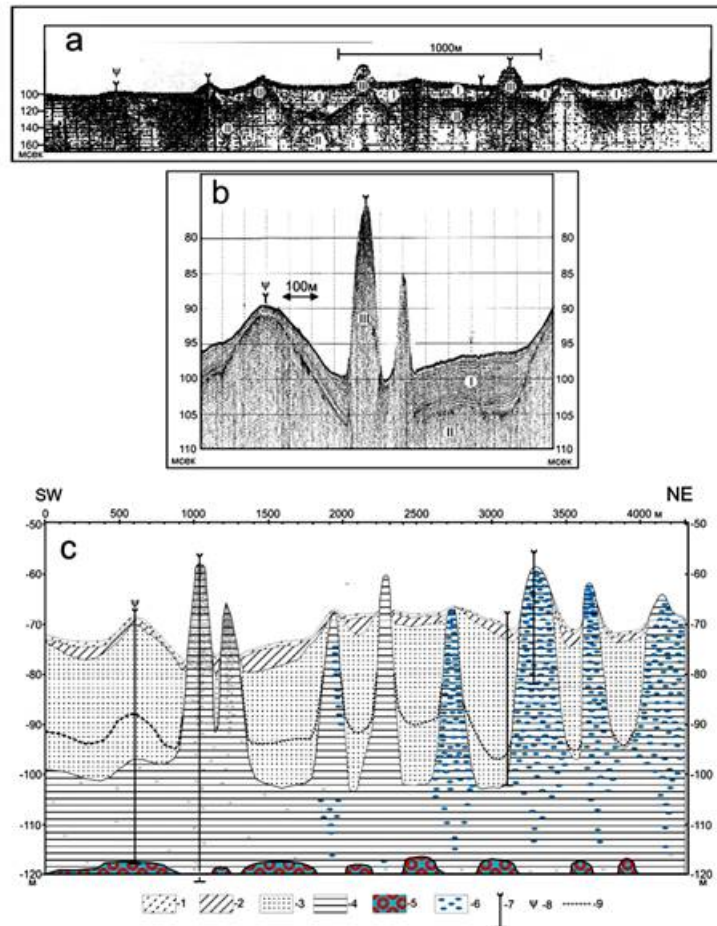


Рис. 15. Временные разрезы, полученные на объекте «Диапиры» и их интерпретация по данным бурения: а – временный разрез, полученный с помощью электроискрового источника (частоты 0,8-1,2 КГц), б – временной разрез импульсного профилографа (частота 3,5 КГц), с – интерпретация.

I – акустически слоистая проницаемая толща, II – акустически непроницаемая газонасыщенная и/или мёрзлая толща, III – диапироподобные поднятия.

1 – нижневалдайские аллювиальные пески, 2 – средневалдайские суглинки, 3 – микулинские глины, 4 – морские голоценовые супеси, 5 – пески насыщенные газом АПВД, 6 – сегрегационный лёд, 7 – инженерно-геологические скважины, 8 – скважины, в которых имел место выброс газа, 9 – кровля многолетнемерзлых пород [58].

Скважина, пробуренная на участке между диапироподобными поднятия вскрыла кровлю многолетнемерзлых пород, представленных микулинскими глинами, глубине 20,2 м ниже поверхности дна. В процессе дальнейшего бурения с глубины около 49,5 м ниже поверхности дна произошел мощный выброс газо-водяной смеси. Высота фонтана достигала более 10 м. Вероятнее всего причиной данного выброса явилось вскрытие скважиной приповерхностного кармана, содержащего большое количество газа под высоким давлением. По-видимому, этот карман приурочен к песчаной линзе, залегающей внутри или в основании толщи многолетнемерзлых микулинских глин. Мерзлые глины обладают высокой прочностью, соответственно внутри мерзлой толщи или под ее покровом могут создаваться относительно высокие давления. По-видимому, газ, скапливающийся в сводах антиклинальных изгибов подошвы каргинско-средневалдайской толщи, находится под значительным давлением. Когда это давление

достигает некоторого критического значения, вероятно сопоставимого с сопротивлением не дренированному сдвигу осадков данной толщи (около 5-30 КПа), происходит деформация.

Вопрос о генезисе диапировых структур на дне моря, содержащих пресные массивные льды и ледогрунты в сочетании с газово-водяными выбросами остаётся нерешённым. Предполагается, что формирование сводовых структур в местах тектонических поднятий приводит к деструкции горных пород и образованию дилатансионных трещин, являющихся каналами для миграции газов и опреснённых вод с глубоких горизонтов.

Сами диапировые структуры возникли в результате комплекса парагенетически связанных процессов:

- деформацией осадочной толщи под давлением поступающих снизу газово-водяных флюидов;
- формированием подводных гидролаколлитов за счёт замерзания привнесённых с глубины пресных напорных вод в зону отрицательных температур;
- дополнительного промораживания водонасыщенных морских осадков за счёт дроссельного эффекта при подъёме напорных газов из нижних горизонтов;
- деформации в осадочной толще и выжимание вмещающих отложений в латеральном направлении и вверх по разрезу. При этом, в первую очередь, мобилизуются наиболее льдистые и, соответственно, пластичные (при достаточно больших давлениях) разности. В результате таких деформаций и выжимания к поверхности дна высокольдистых образований формируются поднятия с ледогрунтовыми сводами;
- в результате возникновения anomalно высоких пластовых давлений за счёт диссоциации газогидратов [60, 61].

Кстати, последнее объясняет совместное нахождение пресной воды и большого количества свободного газа. Объект «Диапиры» располагается в зоне субаквального распространения газогидратов криогенного типа (рис. 16) [61].

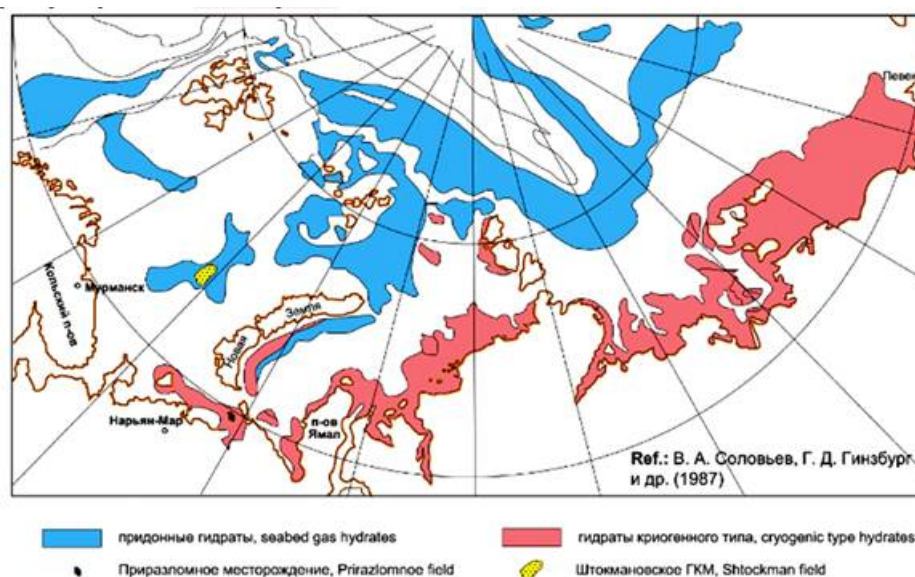


Рис. 16. Газогидраты и их распространение в Арктике [62]

Материалы по строению субаквальных диапировых структур показывает их близкое

строение с газонасыщенными многолетнемёрзлыми породами Бованенковского НГКМ. Близки и условия формирования. В обоих случаях наблюдается комплекс парагенетических процессов, в основе которых лежит формирование локальных тектонических поднятий, формирование куполов которые концентрируют потоки газовых, жидкостных и газожидкостных флюидов. Последующее криогенное воздействие или в виде эпигенетического промерзания или за счёт дроссельного эффекта фиксирует флюиды в виде комплекса парагенетических образований: массивов льдов, газогидратов, карманов сжатого свободного газа. Возможно, в пределах газоносных структур будет наблюдаться вторичные процессы перераспределения газов, связанное с разложением газогидратов. Вероятно, для субаквальных условий криогенная концентрация, характерная при субаэральном промерзании, будет играть меньшую роль.

1.6. Газонасыщенные геосистемы связанные с разложением газогидратов в многолетнемёрзлых породах

Отдельный тип газонасыщенных геосистем формируется при разложении газогидратов в естественных условиях. Данные геосистемы связаны с растеплением многолетнемёрзлых пород и последующим разложением газогидратов. Причиной растепления являются локальные изменения поверхностных условий (развитие поверхностных водоёмов, нарушение растительного покрова, увеличение толщины снежного покрова и др.), потепление климата, отепляющее действие глубинных газов. Сценарии развития процессов, сопровождающий разложение газовых гидратов многообразны. Один и тот же процесс диссоциации газовых гидратов в различных природных условиях приведёт к различным результатам [22].

При незначительном и кратковременном повышении температуры, диссоциация газогидратов может быстро закончиться в результате самоконсервации. В результате в ММП может сформироваться зона повышенной пористости за счёт небольших газовых полостей.

При достаточной глубине и ширине озера газ, выделившийся при диссоциации может не накапливаться в ММП, а поступать в подошёрный после чего в водоём и атмосферу. Это наблюдается на многих озёрах Ямала. Выделение газа происходит от нескольких месяцев до нескольких лет, без взрывов, в виде газовых струй, фиксируемых на водной поверхности.

Рост давления при диссоциации газовых гидратов может возрастать быстро. После того как давление в полости превысит прочность кровли происходит выброс, особенно если газогидратный слой залегает на небольшой глубине (20-30 м). При этом возможны различные варианты: от небольшого взрыва без образования бугра пучения до образования большого многолетнего бугра, предшествующего пневматическому выбросу мерзлой кровли.

В случаях, когда в промерзающих таликах содержится достаточно большое количества газа, то газонасыщенные зоны могут формироваться по типу гидролакколитов.

1.7. Техногенные газонасыщенные зоны

Техногенное воздействие на гасодержащие криогенные геосистемы (вне зависимости от формы нахождения газа в породе) следует разделить на две составляющие. Первая, связана с бурением скважин непосредственное проникновение в зону, где возможно образование области газа с повышенным давлением. Вторая связана с созданием условий на поверхности, при которых тепловыделение от инженерных сооружений или

техногенные нарушения растительности приводят к повышению температуры многолетнемёрзлых пород и нарушению их термодинамической устойчивости. Это, в свою очередь вызывает, вызывает повышение давления или за счёт диссоциации газогидратов или за счёт повышения давления газов в свободной форме, сконцентрированных в газовых «карманах».

Условием для газовых выбросов в скважину (физических взрывов, под действием сжатого газа) являются следующие факторы: наличие флюидов, в массиве породы которые могут поступать в скважину; наличие положительного перепада давления между породой и пространством скважины, достаточного для преодоления сопротивления движению флюида по пористому пространству в приствольной зоне; наличием проницаемых пород, обеспечивающих возможность миграции флюида под действием давления из толщи породы в скважину.

Бурение скважин вызывает резкий сброс давления, повышение температуры, увеличение проницаемости. При этом газ может прорываться с больших глубин (катагенетический газ), возникать при разложении газовых гидратов, освобождаться из зон накопления свободного газа (биохимический газ). Скважины в период бурения и последующей эксплуатации оказывают тепловое воздействие на вмещающие мёрзлые породы. Зону влияния скважины следует разделить на две подзоны. Зону оттаивания и зону нагрева. В первой подзоне происходит вытаивание льда, появление в грунте полостей, каверн. Порода теряет свою несущую способность, происходит возникновение оползней и обрушений. В подзоне нагрева мёрзлых пород температуры остаются отрицательными и сохраняются ледяные включения, при этом происходит потеря несущей способности, и также возможны оползни и обрушения. Кроме того при нагреве в гидратосодержащих мёрзлых породах происходит разложение газовых гидратов. При этом происходит выделение газов, находящихся под высоким давлением (до 2,5 МПа) и их напорная миграция. Криолитосфера месторождения искажается при образовании крупных техногенных таликов, пронизывающих мёрзлую толщу в пределах расположенных кустовых площадок эксплуатационных скважин. Здесь могут образоваться ореолы протаивания и высокотемпературных мёрзлых пород в которых может происходить диссоциация газовых гидратов на территории в 1x2 км². В таких зонах может высвобождаться огромные объёмы газов [51]. На территории Бованенковского ГКМ в результате нарушения герметичности при бурении газ по заколонному пространству начал поступать в проницаемые пласты и выходить на дневную поверхность за пределами участка скважины. В близлежащих ручьях и озёрах появились грифоны на расстоянии до 1 км от устья скважины [51].

При эксплуатации кустов газодобывающих скважин с положительной температурой оказывает значительное отепляющее воздействие на мёрзлую толщу. Результаты математического моделирования теплового взаимодействия эксплуатационных скважин Бованенковского НГКМ показали, что максимальная зона теплового влияния скважин на толщу ММП через 25 лет их эксплуатации может достигать 50 м и более [56].

И. А. Гарагашем рассмотрены термомеханические математические модели процессов, сопровождающих разложение газогидратов в многолетнемёрзлых породах с учётом их стадийности. При разложении газогидратов в массиве гидратосодержащих мёрзлых пород начинается активная структурная перестройка. Она обусловлена формированием избыточного давления в локальной зоне грунтового массива. Понижение внутривыводного давления в результате добычи газа в подгидратном слое приведет к уменьшению среднего давления, а газогидратная залежь попадет в зону растяжения.

Согласно кривой фазового превращения снижение горного давления в газогидратной залежи на 1.0–1.5 МПа эквивалентно увеличению температуры в пласте на 0.2–0.3 градуса [64]. После того как давление в этой зоне достигнет определённого предела. Начинается выделение свободного газа и деформирование, прилегающей к зоне повышенного давления области грунтового массива [63].

Вторая группа причин выброса подземного газа связана с повышением температуры многолетнемёрзлых грунтов под сооружениями. Прямое тепловое воздействие на массив ММП оказывают здания и сооружения, среди которых наиболее мощным источником теплоточков являются аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. На действующих газопромышленных объектах Ямбургского и Медвежьего месторождений кровля ММП в основании АВО газа понизилась до 7,5-8 м (рис. 17).

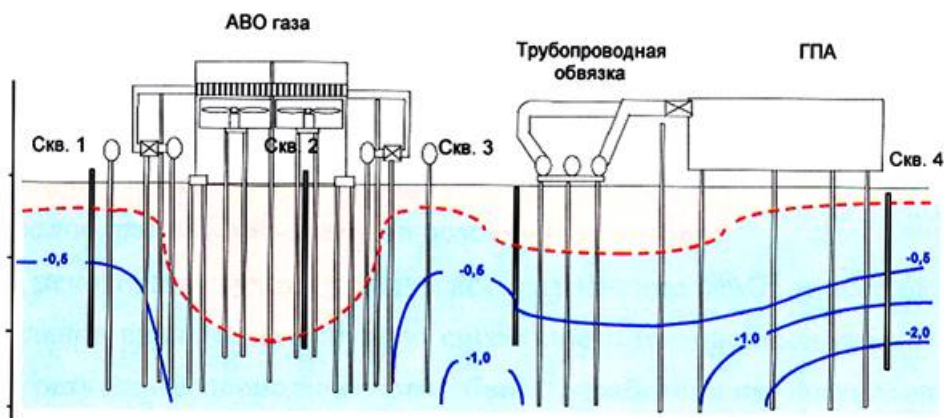


Рис. 17. Изменение температурного поля в основании сооружений Медвежьего газового месторождения: а) естественные условия (июнь 1978); б) техногенные талики после 5 лет эксплуатации август 1993) [56].

Значительное воздействие на температурный режим ММП оказывают подземные трубопроводы. Вокруг трубопроводов с положительной температурой транспортируемого продукта могут образовываться техногенные талики размером от 1-2 до 10 м (рис. 18). Под таликами будет располагаться более мощная зона высокотемпературных многолетнемёрзлых пород.

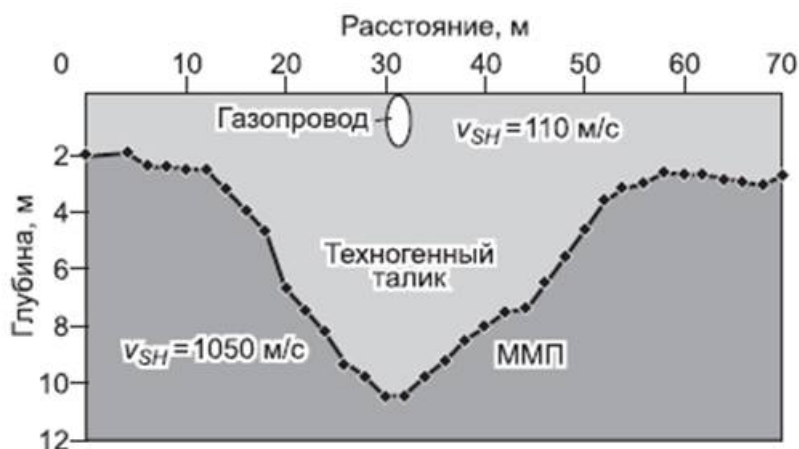


Рис. 18. Техногенный талик под действующим газопроводом Надым Пунга [65]

Важно понимать, что нагревание многолетнемёрзлых пород необязательно должно происходить до температур фазовых переходов и их оттаивания. Разные по гранулометрическому и минеральному составам многолетнемёрзлые породы по-разному

вливают на условия диссоциации газогидратов. В песчаных породах с низкой минерализацией поровых вод разложение гидратов имеет массовый характер при температурах вблизи $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. По мере увеличения дисперсности пород в ряду влажные песок-супесь-суглинков температура полного разложения реликтовых гидратов понижается вплоть до $-3\text{ — }-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наихудшие условия для гидратонакопления представляют собой консолидированные влажные глины, особенно засоленные. В них разложение реликтовых гидратов может происходить при разных температурах и даже небольшое (доли градуса) повышение температуры может приводить к массовому выделению газа из разлагающихся гидратов [66].

2. Обсуждение рассмотренных материалов

В настоящее время газовая составляющая многолетнемёрзлых пород, как структурный элемент мёрзлых пород практически не изучена. Есть лишь единичные работы, посвящённые данной теме. Прежде следует выделить работы Ю.Б. Баду, посвящённые изучению мерзлых пород газоносных структур севера Западной Сибири. Им выделяется особая криолитологическая система - «Криогенная толща в газоносной структуре» (рис. 19).

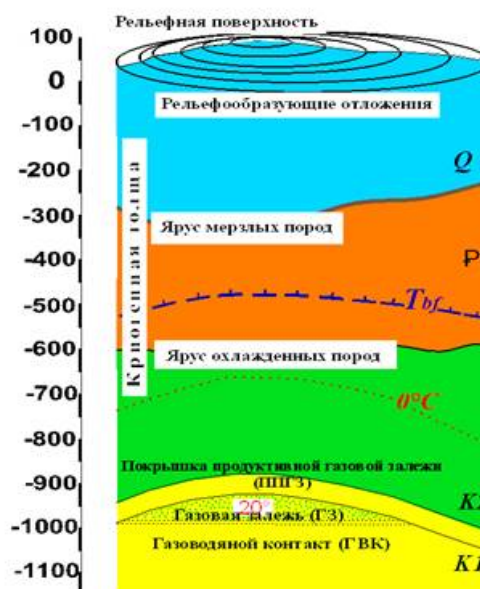


Рис. 19. Элементы газоносной структуры и криогенной толщи [43]

Криогенная толща определяется, как многокомпонентная и многофазная криолитологическая система в виде составной части газоносной структуры (ГС). Она состоит из яруса мерзлых пород и яруса охлажденных пород. Подошва криогенной толщи отбивается по положению нулевой изотермы, а подошва мерзлой – по изотерме температуры начала замерзания. В свою очередь газоносная структура, это неотектоническое образование в литосфере, в геологическом разрезе которого горизонт рыхлых пород кайнозойского возраста перекрывает толщу уплотненных пород позднего мела и покрывку продуктивной газовой залежи (ППГЗ) раннего мела. ГС является основным компонентом геокриологического районирования и самостоятельным объектом для криолитологического изучения. При выделении ГС предлагается учитывать: геотектоническое положение ГС, возраст и генезис отложений, геоморфологическое устройство поверхности, фациальная обстановка осадконакопления, вещественный состав мёрзлых пород, а также их распределение по разрезу, температуры, мощности, льдистости и газонасыщенности [67, 43]. В данной редакции формулировка газоносной

структуры полностью поглощает понятие криогенная толща. При этом в определении газоносной структуры основное внимание уделено литогенной основе. В приведённых и других работах автора рассмотрены многочисленные материалы о влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи полуострова Ямала. Тем не менее в выделяемой криолитологической системе - «Криогенная толща в газоносной структуре» газовая составляющая в виде структурной подсистемы не рассматривается.

Приведённые в предыдущих разделах материалы показывают, что в многолетнемёрзлых породах существуют локальные зоны с повышенным, относительно фоновых значений, содержанием газа. Причины обогащения пород газом различны, это и поступление свободного газа по трещинам и различным деформациям, глубинного газа, и движение растворённого газа по водоносным горизонтам, и криогенная концентрация при эпигенетическом промерзании. Газонасыщенные зоны имеют различные размеры от десятков сантиметров в слое сезонного промерзания, до нескольких километров над газовыми месторождениями. Они могут встречаться во всех генетических типах отложений. Газонасыщенные мерзлые породы отличаются по свойствам от вмещающих пород, что позволяет четко выделять их геофизическими методами. И, наконец, каждая из них имеет историю развития отличную от развития вмещающих пород даже одного генезиса. Таким образом, газонасыщенные зоны многолетнемёрзлых пород имеют все признаки геосистемы: локализацию в пространстве, границы, морфологию, индивидуальное строение, свойства, историю развития. **По нашим представлениям, криогенная газонасыщенная геосистема является структурным элементом криогенной геосистемы и представляет из себя локальную зону с повышенным, относительно фоновых значений, содержанием газа (в свободном виде или в виде газогидрата). Она имеет свои естественные границы, морфологию, определённое положение в пространстве, структуру, внутренние связи, свойства, историю развития. Структура газовой составляющей газонасыщенной геосистемы, парагенетически связанная со структурными элементами включающей её криогенной геосистемы, отражает историю накопления, и преобразования газа при переходе геологического объекта из немерзлого состояния в мёрзлое.**

Геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород отличаются большим разнообразием, сценариев развития, и комплексов процессов, обуславливающих их формирование, структуру и морфологию. Тем не менее, можно выделить некоторую общую последовательность стадий их развития. Каждая газонасыщенная геосистема в многолетнемёрзлых породах содержит 4 основных элемента: 1- зону генерации газа; 2 – зону транзита; 3 - зону накопления; 4 – зону пластических и разрывных деформаций, располагающаяся на контакте зоны накопления и вмещающих пород. Они могут иметь различные размеры и морфологию, выраженность, но присутствие каждой из них обязательно. Это составляет структурную основу газонасыщенной геосистемы. Например, зона накопления может быть выражена в виде газовых карманов различных размеров, а может проявляться в виде скопления локальных газогидратов слоёв или рассеянных мелких включений.

Выделенные зоны отражают стадийность формирования геосистем газонасыщенных мёрзлых пород (рис. 20).

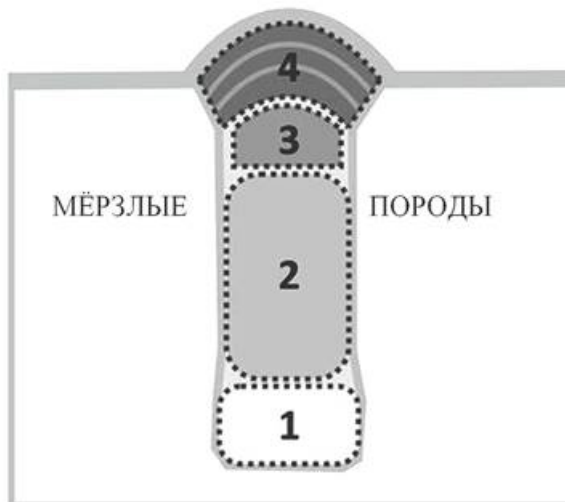


Рис. 20. Стадии развития геосистем газонасыщенных мёрзлых пород.

1 – стадия первичного накопления газа в определённых геологических условиях; 2 – стадия перераспределения газа по зонам транзита; 3 – стадия локализации и накопления газа в природных ловушках, формирование которых обусловлено литологическими или криогенными причинами; 4 – стадия пластических и разрывных деформаций вмещающих пород на контактах с зоной накопления газа.

На первой стадии происходит генерация и первичное накопление в тех или иных геологических условиях (сезонноталый слой, талики, область повышения температуры или снижения внешнего давления в гидратосодержащих породах, зоны разломов, связанные с газовыми флюидами из нижележащих горизонтов и др.).

Вторая стадия соответствует перераспределением газа из областей первичного накопления в смежные области. Данное перераспределение происходит под воздействием возникающего давления, обусловленного различными причинами (криогенная концентрация, перепадом давлений в различных частях порового пространства). Движение газа может происходить по пористым, трещиноватым, водонасыщенным горизонтам, и зонам таликов, повышенных тепловых потоков, аномально высоких давлений и высокотемпературных мёрзлых пород. Для таликов в многолетнемёрзлых породах при промерзании и возникновения криогенного напора зона транзита совпадает с областью первичного накопления газа.

На третьей стадии формируются зоны накопления газовых флюидов (газовые ловушки, газовые карманы, горизонты газогидратов). Эти зоны могут формироваться на небольшой глубине, под кровлей низкотемпературных или льдонасыщенных многолетнемёрзлых пород, являющихся экраном, препятствующим движению газовых флюидов. Кроме того, формирование газовых ловушек обусловлено литологическим фактором, наличием газонепроницаемых глинистых горизонтов. В зонах накопления газа находятся под повышенным давлением.

Четвертая стадия связана с возникновением пластических и разрывных деформаций на контакте области накопления газовых флюидов и вмещающих пород. В некоторых случаях деформации проявляются в виде бугров пучения. После того как давление преодолет прочность кровли могут наблюдаться взрывные процессы с выбросами мёрзлой породы.

Выделенные стадии иллюстрируют жизненный цикл геосистем газонасыщенных мёрзлых пород, и отражают общую последовательность смены формирующих их процессов.

Следует разделять первичные и вторичные газонасыщенные геосистемы в многолетнемёрзлых породах. Формирование первой группы обусловлено различными природными факторами (эпигенетическим промерзанием, перераспределение растворённых газов водными потоками, поступление с глубин по трещинам) и фиксации в виде гидратосодержащих мерзлых пород или локальных зон с повышенным содержанием свободного газа. В естественных условиях наибольшее содержание газа соответствует количеству органики в отложениях. По этому показателю следует выделить озёрные, старичные, лагунные, дельтовые, болотные осадки, слой сезонного оттаивания. Под воздействием анаэробных бактерий происходит процесс биологического разложения органики и выделение биогаза, со средним содержанием метана 90%. При этом формируются фоновые для данного генетического типа осадков значения содержания газа (излишки газа выносятся фильтрацией в водную среду или атмосферу). Аномалии содержания газа формируются в тех случаях, когда формируется газонепроницаемый экран или существует приток газа извне. Для мерзлых пород такие условия создаются при эпигенетическом промерзании осадков. Промерзание создаёт, и непреодолимый барьер для газа, и концентрирует его. Неоднородность поверхностных условий, различие состава и влажности отложений нижняя граница фронта промерзания всегда неоднородна. Газ от выступающих частей фронта промерзания начинает отжиматься в сторону вогнутых и там образуется очаг концентрации газа, т.е. формируется своеобразная ловушка, обусловленная не литологией, а сугубо криогенными причинами. Такому же процессу подвергаются и грунтовые воды вместе с растворёнными газами. При льдообразовании происходит дополнительное выделение газа. Таким образом, формируются геосистемы газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых породах. В организации криогенных газонасыщенных геосистем можно выделить три уровня:

- сезонномёрзлых пород;
- генетический, включающий совокупность фаций одного генетического типа;
- структурно-геологический, включающий парагенетические комплексы пород в пределах геоструктур.

Геосистемы газонасыщенных сезонномёрзлых пород распространены в тонком (десятки сантиметров), ежегодно промерзающем и оттаивающем верхнем слое литосферы. Отличительными особенностями деятельного слоя в пределах распространения многолетнемёрзлых пород является повышенная увлажнённость и большие градиенты температур при промерзании, значительная неоднородность температурного поля, обуславливающая неравномерность промерзания. Подстиляется он газо- и водонепроницаемым слоем многолетнемёрзлых пород. Все это приводит к тому, что во время сезонного промерзания в незначительном слое породы создаются условия для значительного перераспределения воды и газа. Процессы, происходящие при формировании сезонномёрзлого слоя являются моделью процессов реализующихся при эпигенетическом промерзании пород в больших объёмах и на больших площадях.

Г. Н. Краевым был поставлен лабораторный эксперимент по изучению миграции газа при одностороннем промерзании насыщенных метаном грунтов (рис. 21). В промерзшем песке аллаховской свиты в верхних трех срезах метан содержался в концентрации 0–0.5 мл/кг, а в нижнем заметно больше – 2.3 мл/кг. Концентрация CH₄ в суглинках в верхних 10 см составляла 3.8 ± 0.2 мл/кг. Ниже, у основания контейнера концентрация была заметно меньше – 2.5 ± 0.1 мл/кг. Результаты эксперимента показали, что в суглинках метан при промерзании сконцентрировался в верхней части разреза, в нижней части за счёт миграции влаги (и газа вместе с ней) к фронту промерзания

содержание газа даже уменьшилось. В песках наблюдалось отжатие его к газонепроницаемой подошве. Результаты эксперимента позволили автору сделать вывод о том, что распределение метана в эксперименте близко к наблюдаемому в природе распределению газа – результат миграции метана вместе с поровым раствором при промерзании сверху и отжима при промерзании снизу, со стороны мерзлых синкриогенных отложений [27].

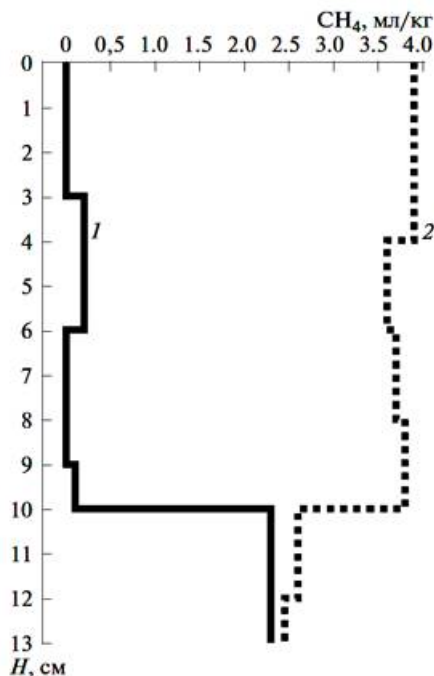


Рис. 21. Распределение метана в песках (1) и суглинках (2) в результате промораживания одинаково и однородно насыщенных талых грунтов [27]

Криогенные газонасыщенные геосистемы генетического типа формируются при эпигенетическом промерзании пород определённого генетического типа. Количество органики и соответственно содержание газа определяется фаціальными условиями, что позволяет оценить вероятность распределения газонасыщенных зон в пределах генетического типа.

С. Г. Миронюк и В. П. Отто, систематизируя данные об особенностях строения и распространения субаквальных газонасыщенных морских осадков указывают, что важнейшей геологической особенностью верхних горизонтов субмаринной части литосферы является широкое распространение газосодержащих грунтов [26].

Выделяются следующие элементы геосистемы системы газонасыщенные морские осадки:

- газ (биогенный, термогенный и биогенно-термогенный). В осадках (породах) он находится в виде пузырьков, окруженных водой (кристаллами льда, соли), в растворенном (в поровом пространстве) или в свободном виде, а также в твердом состоянии (газогидраты);
- осадки включающие минеральные и органические компоненты, а также соли и воду;
- газовыделяющие структуры (зоны генерации): поверхностные газогенерирующие осадки (биогенный газ), глубинные газогенерирующие породы (катагенный газ), гидратосодержащие породы;
- газовые потоки в осадочной толще (зоны танзита): газовые "трубы" ("столбы",

"колонны");

- газовые ловушки (зоны накопления газа), газогидратные толщи, газовые карманы, обширные скопления свободного газа в приповерхностных осадках под региональными флюидоупорами, в т. ч. под подводными реликтовыми многолетнемерзлыми породами, т. н. "газовые фронты"), дома (невысокие придонные купольные структуры), купола газового вспучивания, трещины растяжения;

- флюидопроводящие структуры (на донной поверхности): линейные (зоны тектонических разломов, трещины, борозды выплывания айсбергов (плугмарки) [\[68, 69, 70; 26\]](#).

Косвенно, о формировании газонасыщенных зон в отложениях различных генетических типов мёрзлых отложений, могут свидетельствовать газопроявления, связанные с выбросами метана при бурении даже неглубоких инженерно-геологических скважин. Эти явления повсеместно распространены в зоне распространения многолетнемерзлых пород в Арктике. Наиболее эффективным методом изучения подобных образований будет сочетание геофизических методов, позволяющих оценить морфологию, условия залегания газонасыщенной области, с бурением и отбором проб мерзлых пород, льда и газа. По оценкам Г. Н. Краева количество метана, выделяющегося при газопроявлениях, наблюдаемых при бурении, намного превышает количество газа, заключенного в объем вечной мерзлоты диаметром до 5 метров вокруг скважины [\[71\]](#). Это позволяет предполагать наличие в мерзлых породах системы сообщающихся каналов, трещин, ослабленных зон соединяющих пористые зоны с высоким содержанием свободного газа или участков с гидратосодержащими мёрзлыми породами. Такими каналами могут быть немёрзлые песчаные слои с минерализованными водами (криопэгами). В мёрзлых морских засоленных породах криопэги распространены широко с чем и связаны приуроченные к ним выбросы газа (рис.).

Криогенные газонасыщенные геосистемы структурно-геологического типа формируются при совместном взаимодействии нескольких факторов:

- тектонического, связанного с образованием локальных тектонических структур, обуславливающих движение газа к поверхности и накопление их в куполах;

- гидрологического, связанного с движением мощных потоков грунтовых газонасыщенных вод к поверхности;

- геологического, связанного с формированием мощной водонасыщенной, слоистой разновозрастной, полигенетической толщи;

- криогенного, обусловившего эпигенетическое промерзание литологически разнородной, водо- и газонасыщенной толщи, в результате чего формируется сложно построенный парагенез, криогенных образований, включающих пластовые льды, льдистые мёрзлые породы, криопэги, горизонты газогидратов и «карманы» напорных свободных газов.

В результате взаимодействия перечисленных и иных факторов формируются наиболее мощные криогенные газонасыщенные геосистемы. Основой их развития является уже не промерзание отдельных генетических типов отложений. Общая геологическая история, связанная с локальным тектоническим воздействием, и общая направленность криогенного воздействия обуславливает развитие комплекса парагенетически связанных друг с другом мерзлотно-геологических формаций. Скопления газа в виде свободного газа и газогидратов, являются элементом (подсистемой) этой закономерно

построенной геосистемы. При изучении зон повышенной газонасыщенности в мёрзлых породах их можно рассматривать, в виде самостоятельных криогенных геосистем [25]. Они имеют все признаки, позволяющие это делать: наличие естественных границ, морфологию, определённое положение в пространстве, пространственно-временную упорядоченность структуры, внутренние связи, свойства.

Вторичные газонасыщенные геосистемы формируются при растеплении мерзлых пород и диссоциации газогидратов в естественных условиях или в результате техногенных воздействий, а также резкого сброса давления при бурении скважин. При диссоциации газогидратов выделяется свободный газ, находящийся под давлением который начинает фильтроваться сквозь высокотемпературные мёрзлые породы в область меньших гидростатических и литостатических давлений [22]. В качестве примера формирования зоны растепления многолетнемёрзлых пород под поверхностным водоёмом рассмотрим строение температурного поля под озером при формировании несквозного талика. Данные были получены при исследовании озера Иллисарвик, расположенного в дельте р. Маккензи. Размер 300 x 600 с максимальной глубиной 4,5 метра. Среднегодовая температура мёрзлых пород в районе озера находится в диапазоне -8 - -10°C. Мощность мерзлоты 400 – 600 м. Граница талых пород под озером прослеживаются до глубины около 24 м, ниже залегают высокотемпературные мёрзлые породы, температура которых составляет от -1°C на глубине около 30 и до -3°C глубине около 90 м (рис. 22) [72]. Данное распределение температур отражает двучленное строение пород под водоёмами. Слой талых пород, подстилается более мощным слоем, зачастую намного превышающим мощность талика, высокотемпературных многолетнемёрзлых пород.

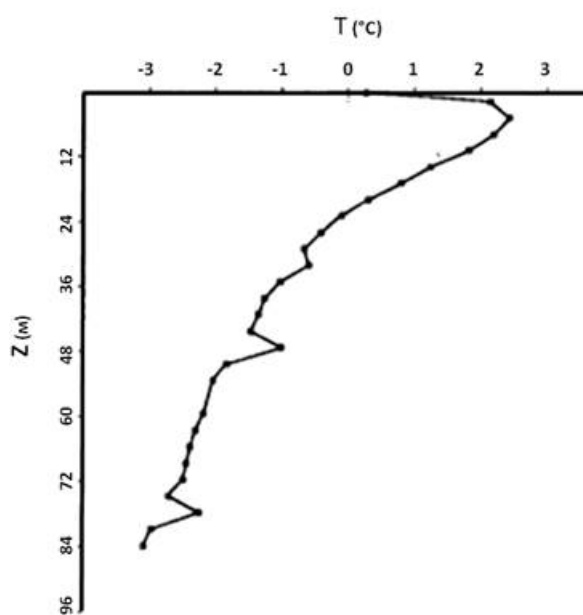


Рис. 22. Температурный профиль, в субаквальных осадках центральной, глубоководной части озера [72].

Поскольку обводнённость северных территорий значительна, заозёрность на Ямале достигает 70% и более, роль поверхностных водоёмов в повышение температуры многолетнемёрзлых пород значительна. Если в зону растепления многолетнемёрзлых пород попадают гидратонасыщенные мёрзлые породы, то в них могут начаться процессы диссоциации. Выделившийся газ под давлением будет фильтроваться сквозь высокотемпературные мёрзлые породы вверх. Большинство термокарстовых озёр Арктики

быстро дренируется или заполняется осадками, после чего они промерзают. При этом, формируется низкотемпературная газонепроницаемая мёрзлая кровля, для выделившихся из талых или растеплённых пород. Это создаёт условия для формирования геосистем вторичных газонасыщенных мёрзлых пород.

3. Методы исследования газонасыщенных геосистем

в многолетнемёрзлых породах

Газонасыщенные породы встречаются в различных природных условиях. Разнообразна они встречаются в виде газовых карманов, (безкорневые изометричные газонасыщенные образования), куполов газового вспучивания, газовых "труб" [26, 71]. Ни более перспективным направлением при изучении зон накопления газов в многолетнемёрзлых породах является использование геофизических методов, поскольку только они, позволяют определить местоположение, границы и морфологию этих образований. В настоящее время разработан комплекс методов, позволяющих успешно решать данные задачи (табл. 4).

Таблица 4. Определение местоположения, глубины залегания и формы локальных зон газонасыщенных мёрзлых пород геофизическими методами [73]

Задачи исследований	Геофизические методы	
	Основные	Вспомогательные
Зоны газонасыщенных мёрзлых пород	МОГТ , ЭП, ВЭЗ, ВЭЗ МДС, МПВ, георадиолокация, различные виды каротажа	ВЭЗ ВП; ДЭМП; ЧЭМЗ

Обозначения — ЭП — электропрофилирование; ВЭЗ — вертикальное электрическое зондирование; ВЭЗ МДС — вертикальное электрическое зондирование по методу двух составляющих; ЧЭМЗ — частотное электромагнитное зондирование; ЭП МДС —

электропрофилирование по методу двух составляющих; ДЭМП — дипольно-электромагнитное профилирование; ВЭЗ ВП — вертикальное электрическое зондирование вызванных потенциалов; МПВ — сейсморазведка методом преломленных волн

Наиболее распространённым методом является вертикальное сейсмоакустическое профилирование, которое позволяет выделять и чётко фиксировать газонасыщенные породы. Скопления «свободного» газа в многолетнемёрзлых породах отчетливо проявляются в волновом поле, контрастно отображаясь на сейсмоакустических разрезах в виде характерных амплитудных аномалий – «ярких пятен», сопровождающихся часто дифрагированными волнами на их границах, формированием акустически немых зон, инверсией фаз, проявлением затяжек времени регистрации отражений от нижележащих горизонтов, а также понижением частоты отраженных волн [74]. О наличии в грунтах свободного газа свидетельствуют пониженные скорости распространения упругих колебаний. Отражения от границ газосодержащих слоев отличаются очень высокой амплитудой сигнала, во много раз превышающей амплитуды отражений от границ раздела грунтов, не содержащих газа. Скорости распространения продольных волн в

разрезах, включающих мерзлые льдистые и газонасыщенные грунты (по данным вертикального сейсмического профилирования) изменяются от 800 до 2800 м/с. Использование высокочастотных профилографов позволяет установить в стратифицированном разрезе четвертичных осадков участки акустического осветления (blankings) толщи в виде субсогласных напластованию протяжённых объектов непосредственно над акустическим фундаментом, так и в виде ортогональных слоистости зон осветления. Наблюдаемое явление интерпретируется как процесс внутрислоевого распределения и межслоевой миграции газонасыщенных флюидов. Аномалии типа «ярких» и «плоских» пятен в верхней части разреза связаны, вероятно, со скоплениями газонасыщенных флюидов под флюидоупорами, которыми являются либо подошва газогидратов, либо многолетняя подводная мерзлота. Некоторые светлые пятна непосредственно приурочены к тектоническим нарушениям и имеют вид инъекционных субвертикальных структур (каналов). Такие каналы соединяют акустически прозрачные линзы, расположенные на разных гипсометрических уровнях и либо затухают в осадочной толще, либо прослеживаются до поверхности дна при наличии крупных разрывов [75].

Одним из наиболее актуальных направлений для решения геокриологических задач на глубинах 10-1000 м, а также частотных зондирований (ЧЗ) на глубинах 1-20 м. является ЭМ-зондирование методом ЗСБ. Метод основан на технологии ЭМ-зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) путем создания первичного ЭМ-поля в среде и измерении возникающего вторичного ЭМ-поля, которая зависит от удельного электрического сопротивления (УЭС). Измерение напряженности вторичного поля на разных периодах позволяет получить информацию о среде на разных глубинах (рис. 23).

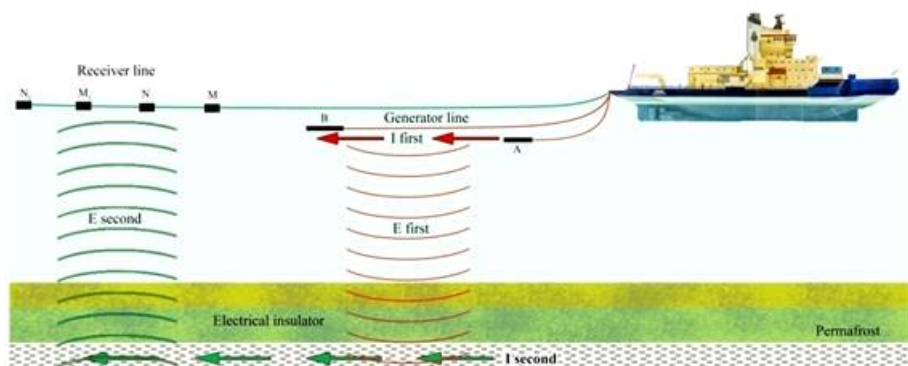


Рис. 23. Методика выполнения ЗСБ, ЧЗ на шельфе.

Разработка данного метода даст возможность использования ЭМ-зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты и выделения высокоомного слоя (слоев) газгидратов [76].

Заключение

Влияние газовой составляющей на свойства мёрзлых пород долгое время считалось незначительным. Резкое усиление хозяйственного освоения арктических территорий на фоне глобального потепления климата показали, что это не так. Наука оказалась не готова к новым вызовам. В настоящее время стало очевидным, что отсутствие теоретической базы значительно осложняет поиск и изучение газонасыщенных зон, процессов, связанных с миграцией и накоплением газа в промерзающих и мёрзлых и протаивающих породах.

Для каждого генетического типа отложений в мёрзлом состоянии, в зависимости от содержания газа выделяются две группы газонасыщения. Одна является фоновой, в ней содержание газа в осадках, соответствует средним значениям в талых породах. Во второй содержание газа достигает аномальных значений, значительно превышающих фоновые. Она формирующиеся в результате различных процессов (криогенная концентрация, поступления глубинного газа по трещинам и различным зонам тектонических деформаций).

Газонасыщенные зоны в мёрзлых породах представляют из себя самостоятельные геосистемы. Криогенная газонасыщенная геосистема является структурным элементом криогенной геосистемы, представляет из себя локальную зону с повышенным относительно фоновых значений содержанием газа (в свободном виде или в виде газогидрата), имеет свои естественные границы, морфологию, определённое положение в пространстве, структуру, внутренние связи, свойства, историю развития. Структура газовой составляющей газонасыщенной геосистемы, парагенетически связанная со структурными элементами включающей её криогенной геосистемы, отражает историю накопления, и преобразования газа при переходе геологического объекта из немерзлого состояния в мёрзлое.

Криогенные газонасыщенные геосистемы встречаются на всей территории криолитозоны, отличаясь между собой масштабами проявлений, которые зависят от геолого-тектонических и мерзлотных условий накопления газа.

Каждая газонасыщенная геосистема в многолетнемёрзлых породах содержит 4 основных элемента: 1- зону генерации газа; 2 – зону транзита; 3 - зону накопления; 4 – зону пластических и разрывных деформаций, располагающаяся на контакте зоны накопления и вмещающих пород.

Выделяются 5 типов криогенных газонасыщенных геосистем.

- Деятельного слоя. Газ концентрируется за счёт криогенного напора при неравномерном промерзании.
- Генетического типа (озёрные, лагунные, морские). Газ концентрируется за счёт криогенного напора при эпигенетическом промерзании или за счёт поступления с глубины
- Структурно-геологического типа. Приурочены к месторождениям углеводородов и связаны тектоническими структурами (купола, валы, разломы). Газ поступает с более глубоких горизонтов по системе трещин. Поступающий снизу газ смешивается с газом присущим генетическому типу, вследствие чего формируются смешанные криогенные газонасыщенные геосистемы.
- Вторичные газовые скопления связаны с разложением газогидратов в естественных условиях. Их формирование связано с растеплением многолетнемёрзлых пород, последующим разложением газогидратов и миграцией выделившегося газа из области диссоциации по зоне транзита в область накопления. Причиной растепления является изменение поверхностных условий (поверхностные водоёмы, смена растительности, увеличение толщины снежного покрова), или потепление климата.
- Техногенные, формирование которых обусловлено тепловым или механическим воздействием инженерных сооружений на газонасыщенные в виде свободного газа или газогидратов мерзлые породы.

В настоящее время ещё недостаточно знаний для построения единой теории образования таких сложных образований, какими являются газонасыщенные зоны в многолетнемерзлых породах. Потребуется нетривиальные и инновационные подходы, не укладывающиеся в русло традиционных представлений существующих в геокриологии.

Библиография

1. Мельников П.И., Мельников В.П., Царев В.П., Дегтярев Б.В., Мизулина Н.Б., Попов А.П., Березняков А.И., Свечников А.М. О генерации углеводородов в толщах многолетнемерзлых пород // Известия АН СССР, Серия геологическая, № 2, 1989. С.118-128.
2. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли, т. II, № 4, 1998, с. 42-50.
3. Чабан П.Д. О газовых гидратах в вечномёрзлых россыпях // Колыма. № 6. 1991. С.18-19.
4. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ. 2009. 192 с.
5. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т.2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения М.: ООО «Газпром Экспо, 2013. 424 с.
6. Краев Г. Н. Закономерности распространения метана в многолетнемерзлых породах на Северо-Востоке России и прогноз его поступления в атмосферу / Автореф. дисс. канд. геогр. наук. М.: ЦЭПЛ РАН. 2010. 20 с.
7. Leibman M.O., Hubberten H.W., Lein A.Yu., Streletskaya I.D., Vanshtein B.G. Tabular ground ice origin in the Arctic coastal zone: cryolithological and isotope geochemical reconstruction of conditions for its formation // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland). Lisse, Netherlands: A.A..Balkema Publishers, 2003. V.1. P..645–650.
8. Lein A.Yu., Savvichev A.S., Leibman M.O., Miller Yu.M., Pimenov N.V. Isotopic-biogeochemical peculiarities of tabular ground ice of Yugorsky and Yamal peninsula // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland). Lisse, Netherlands: A.A..Balkema Publishers, 2003. V..2. P..661-666.
9. Olefeldt D., Turetsky M.R., Crilland P.M., McGuire A.D. Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zones // Global Change Biology. 2012. V. 19. № 2. P. 589–603. doi: 10.1111/gcb.12071.
10. Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е. Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // ДАН. 2015. Т..465. № 5. С..604–607.
11. Стрелецкая И. Д., Ванштейн Б. Г., Васильев А. А., Облогов Г. Е. СОДЕРЖАНИЕ И ГЕНЕЗИС МЕТАНА В МЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДАХ НА ПОБЕРЕЖЬЕ И ШЕЛЬФЕ КАРСКОГО МОРЯ / // Научное сетевое издание Актуальные проблемы нефти и газа. Т. 4. Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина Институт проблем нефти и газа РАН Москва. 2018. С. 1–5.
12. Обжиров А. И., Телегин Ю.А., Окулов А.К. ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ В ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЯХ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2018. № 1(25). С. 66-74.
13. Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Vol. 17, № 3. С. 173–184.
14. Агалаков С.Е. Газовые гидраты в туронских отложениях на севере Западной Сибири

- // Геология нефти и газа. 1997. № 3. с. 16–21.
15. Курчиков А.Р. Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности. Недра. 1992. 231 с.
16. Курчиков А.Р. Гидрогеотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика, 2001. Т. 42. № 11–12. С. 1846–1853.
17. Валяев Б.М. Углеводородная дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений // Геология нефти и газа, 1997. № 9. С. 30–37.
18. Валяев Б.М. Приповерхностный интервал нефтегазонакопления: 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.
19. Бембель Р.М., Бембель С.Р., Кашин А.Е., Ласковец Е.Б. Связь очагов активного нефтегазонакопления и глубинных криогенных источников // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Сб. (табл. 1, рис. 5). науч. тр. Новосибирск. Наука. 1997. С. 193–199.
20. Хименков А.Н., Власов А.Н., Сергеев Д.О., Волков-Богородский Д.Б., Станиловская Ю.В. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. 1 ЧАСТЬ Криогидродинамические геосистемы. // Арктика и Антарктика. 2018а. № 2. С.1-19. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.2.26319. URL: http://e-notabene.ru/arctic/article_26319.html
21. Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В. - ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ ГЕОСИСТЕМЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ. 2 Часть Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы. // Арктика и Антарктика. 2018б. №2. С. 48-70. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.2.26377.
22. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера. // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 1-25. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27524.
23. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Гагарин В.Е., Соболев П.А. О фильтрации газов в многолетнемёрзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне. // Арктика и Антарктика. 2019а. № 3. С.16-38. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29627.
24. Хименков А. Н., Кошурников А. В., Соболев П. А. Лабораторное моделирование фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах // Арктика и Антарктика. 2019б. № 4. С. 52–73.
25. Хименков А. Н. Геосистемный подход в геокриологии // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 2. С. 74–82.
26. Миронюк С. Г., Отто В. П. Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений // Геориск. 2014. № 2. С. 8–18.
27. Hovland M., Gardner J.V., Judd A.G. The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards, *Geofluids* (2002) V. 2, pp. 127-136.
28. Разуваева Е. И., Зинченко А. Г. Новые данные о мезорельефе дна Кольского желоба // Геология морей и океанов: Материалы XVII Междун. Науч. конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. 2007. С. 155-157.
29. Портнов А. Д., Семенов П.Б., Рекант П. В. Комплекс высокочастотных сейсмоакустических исследований и морской газо-геохимической съемки как метод обнаружения и локализации углеводородов // Геология морей и океанов: Материалы

- XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. II. М.: 2011. С.97-100.
30. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
31. Токарев М.Ю., Полудеткина Е.Н., Старовойтов А.В., Пирогова А.С., Корост С.Р., Ошкин А.Н., Потемка А.К. ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ И ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ // ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 4: ГЕОЛОГИЯ 2019. № 1. С. 107-114.
32. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Подборный Е.Е., Суллина А.Н., Чижова Ю.Н. Голоценовые многоярусные пластовые льды в устье реки Сабеттаяха, полуостров Ямал // Криосфера Земли. 2015. т. XIX. № 4. С. 39–53.
33. Краев Г. Н., Шульце Э.Д., Ривкина Е. М. КРИОГЕНЕЗ КАК ФАКТОР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В ГОРИЗОНТАХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД // ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК. 2013. Т. 451, № 6. С. 684–687
34. Kraev G, Schulze E-D, Yurova A, Kholodov A, Chuvilin E, Rivkina E Cryogenic Displacement and Accumulation of Biogenic Methane in Frozen Soils // Atmosphere. 2017. 8 (6).
35. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 492с.
36. Mackay J.R. Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula Area Northwest Territories // Geogr. Phis. Quart. 1979. Vol. 33 N 1. P. 3 - 61.
37. Захаренко В.С., Шлыкова В.В., Тарасов Г.А. Особенности формирования газогидратов на континентальной окраине Западного Шпицбергена // Разведка и охрана недр. 2010. № 8 С. 6-9.
38. Курасов И. А., Ступакова А. В. Тектоническое строение северной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2014. № 4. С. 56–64.
39. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. Т.2. 575 с.
40. Беспалова С.Н. Оценка перспектив нефтегазоносности неоконских отложений севера Западной Сибири по геохимическим показателям. // Геология нефти и газа. 1984, №12, С. 22-26.
41. Жижченко В.П. Угледородные газы. М.: Недра 1984. 112 с.
42. Энгельгардт В. Поровые водяные растворы и катагенез пород. // Диагенез и катагенез осадочных образований. М., Мир. 1971. С. 443-459.
43. Бадю Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи М.: Научный мир. 2018. 232 с.
44. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Криопэги // Криосфера нефтегазокоденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 1. Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения. Т. 1. Тюмень-С.-Петербург, Изд. ООО ТюменьНИИгипрогаз - Изд-во Недра 2006. С. 230
45. Хименков А.Н. Формирование криогенного строения морских отложений / Автореф. дисс. к. г.-м. н. М. ПНИИИС Госстроя СССР. 1985. 24с.
46. Хименков А.Н., Брушков А.В. Океанический криолитогенез. М.: Наука, 2003. 335с.
47. Стрелецкая И. Д., Лейбман М. О., Кизяков А. И., Облогов Г. Е., Васильев А. А., Хомутов А. В., Дворников Ю. А. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестник Московского университета. Серия

- 5: География, 2017. Т. 1, № 2. С. 91–99.
48. Баду Ю.Б., Трофимов В.Т., Васильчук Ю.К. Основные закономерности распространения и типы пластовых залежей подземного льда в северной части Западно-Сибирской плиты // Пластовые льды криолитозоны. Якутск. 1982. С.13-24.
49. Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Зверева В.Б., Облеков Г.И., Шайдуллин Р.М., Гудзенко В.Т. Газохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал (на примере Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения). // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, №5, 2008. №5. С.22-34.
50. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир. 2010. 352 с.
51. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М.: ГЕОС. 2007. 137с.
52. Перлова Е. В. Особенности газосодержания многолетнемерзлых пород на примере Северо-Западной части п-ва Ямал / Автореф. дис. ... к. г.-м. н. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова. 2001. 26 с.
53. Васильчук Ю.К. Пластовые ледяные залежи в пределах Бованенковского ГКМ (Центральный Ямал) // Инженерная геология. 2010. № 3. С. 50-67.
54. Пармузин С.Ю., Суходольский С.Е. Пластовые льды Среднего Ямала и их роль в формировании рельефа // Пластовые льды криолитозоны. Якутск: Изд-во ИМ СО АН СССР, 1982. С. 51–61.
55. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэггов и вмещающих их отложений центрального Ямала // Криосфера Земли. Т. VI, № 3. 2002. С.15-24.
56. Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений Ямала. Томск. Изд-во ТГУ. 2005. 352 с.
57. Скоробогатов В.А., Строганов Л. В., Копеев В. Д. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. М.: ООО Недра-Бизнесцентр, 2003. 352 с.
58. Рокос С.И. Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и южной части Карского морей // Инженерная геология. 2008. № 4. С. 22-28.
59. Григоренко Ю. Н., Соболев В. С. Жукова Л. И. Особенности нефтегазонакопления в морских районах Западной Арктики (Российский сектор). // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. №4. С. 1-43. http://www.ngtp.ru/rub/5/37_2011.pdf
60. Мельников В.П., Спасивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск, Наука, 1995, 198 с.
61. Рокос С. И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа / Дис. канд. географ. наук Мурманск. 2009. 89 с.
62. Соловьёв В.А. Гинзбург Г.Д. и др. Криотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л. ПНО «Севморпуть». 1987. 150с.
63. Гарагаш И.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГАЗА В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ И ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОДАХ. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2012. С. 1-25. http://oilgasjournal.ru/vol_6/garagash.pdf
64. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра. 1992. 236 с.
65. Мельников В.П., Скворцов А.Г, Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Садуртдинов М. Р., Царев А.М., Дубровин В.А. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ С ПОМОЩЬЮ

- СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 1, с. 171-180.
66. Якушев В.С. ВЛИЯНИЕ ЛИТОЛОГИИ КРИОЛИТОЗОНЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЛИКТОВЫХ ГАЗОГИДРАТОВ В АРКТИКЕ Труды ИПНГ РАН (Москва): серия «Конференции». Вып. 2(1). 2017. С. 172-173.
67. Баду Ю. Б. Криосистемный анализ криосферы // Материалы Пятой конференции геокриологов России МГУ имени М.В. Ломоносова, 14-17 июня 2016 г. Т.2. М.: Университетская книга. 2016. С. 266-270.
68. Андреев В. М., Туголесов Д. Д., Хренов С. Н. Грязевые вулканы и нефтегазопроявления российского сектора Черного моря// Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 2. С.50-59.
69. Шахова Н. Е. Метан в морях Восточной Арктики / Автореф. дисс. д-ра геол.-мин. наук. М., ИО РАН. 2010. 44 с.
70. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Дмитриевский Н.Н., Либина Н.В., Семилетов И.П., Ананьев Р.А., Мелузов А.А., Росляков А.Г. О процессах газовыделения и деградации подводных многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 312-320.
71. Kraev G, Rivkina E, Vishnivetskaya T, Belonosov A, van Huissteden J, Kholodov A, Smirnov A, Kudryavtsev A, Teshebaeva K, Zamolodchikov D Methane in Gas Shows from Boreholes in Epigenetic Permafrost of Siberian Arctic // Geosciences. 2019. 9(2). pp. 67
72. Burges, M.; Judge, A.S.; Taylor, A.; Allen, D.V. Ground temperature studies of permafrost growth at a drained lake site, Mackenzie Delta (MD) // Proceedings of the 4th Canadian Permafrost Conferences, Calgary, AB, Canada, 2-6 March 1982; pp. 3-11.
73. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. 2000.
74. Безродных Ю. П., Делия С. В., Лисин В. П. Применение сейсмоакустических и сейсмических методов для изучения газоносных грунтов Северного Каспия // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2001. №5. С. 476-480.
75. Чамов Н.П., Соколов С.Ю., Зарайская Ю.А., Мороз Е.А. КАРТИРОВАНИЕ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ОСАДКОВ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА, СВЯЗАННЫХ С НИМИ ФОРМ РЕЛЬЕФА ДНА И ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ВОДНОЙ ТОЛЩИ В РОССИЙСКОМ СЕКТОРЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ. Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата //Тезисы Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. 2014. С. 101-102.
76. Кошурников А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Гунар А.Ю., Пушкарев П.Ю., Семилетов И.П. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых. //Доклады Академии наук, 2016, том 469, № 5, С. 616-620.