

В монографии 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 пять 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 мёрзлые породы). Наибольшее внимание уделено процессам перераспределения и локализации газов и формированию газонасыщенных мёрзлых пород. Приведены результаты лабораторного и математического моделирования фильтрации газа в мёрзлых породах. Показаны особенности протекания естественных и техногенных взрывных процессов в криолитозоне. Проанализированы закономерности строения и формирования воронок газового выброса. Рассмотрены методы изучения газонасыщенных геосистем в криолитозоне. Книга рассчитана на широкий круг специалистов разного профиля, чьи научные или практические интересы связаны с изучением криолитозоны, а также может быть полезна студентам геологических и географических факультетов высших учебных заведений.

ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ  
МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД

# ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД

А.Н. Хименков, А.Н. Власов, А.В. Брушков, А.В. Кошурников,  
Д.Б. Волков-Богородский, Д.О. Сергеев, В.Е. Гагарин, П.А. Соболев

Москва  
2021



А.Н. Хименков, А.Н. Власов, А.В. Брушков, А.В. Кошурников,  
Д.Б. Волков-Богородский, Д.О. Сергеев, В.Е. Гагарин, П.А. Соболев

# Геосистемы газонасыщенных многолетнемёрзлых пород

Москва,  
2021



УДК 551.340  
ББК 26.222.8  
Х46

**А.Н. Хименков, А.Н. Власов, А.В. Брушков, А.В. Кошурников,  
Д.Б. Волков-Богородский, Д.О. Сергеев, В.Е. Гагарин, П.А. Соболев**  
**Х46 Геосистемы газонасыщенных многолетнемёрзлых пород [Текст]:**  
науч. кол. моногр. / Ответственный редактор д. г.-м. н. Зыков Ю.Д.; – М.: Геоинфо,  
2021. – 288 с.

**ISBN 978-5-9908493-3-4**

В монографии 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 пять 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 мёрзлые породы). Наибольшее внимание уделено процессам перераспределения и локализации газов и формированию газонасыщенных мёрзлых пород. Приведены результаты лабораторного и математического моделирования фильтрации газа в мёрзлых породах. Показаны особенности протекания естественных и техногенных взрывных процессов в криолитозоне. Проанализированы закономерности строения и формирования воронок газового выброса. Рассмотрены методы изучения газонасыщенных геосистем в криолитозоне. Книга рассчитана на широкий круг специалистов разного профиля, чьи научные или практические интересы связаны с изучением криолитозоны, а также может быть полезна студентам геологических и географических факультетов высших учебных заведений.

**ISBN 978-5-9908493-3-4**

УДК 551.340  
ББК 26.222.8

© Хименков А.Н., Кошурников А.В.



**Рецензия на монографию Хименкова А. Н., Власова А. Н., Брушкова А. В.,  
Кошурникова А. В., Волкова-Богородского Д. Б., Соболева П. А. «Геосистемы  
газонасыщенных многолетнемёрзлых пород».**

Монография «Геосистемы газонасыщенных многолетнемёрзлых пород» посвящена актуальной теме влияния газов, содержащихся в многолетнемёрзлых породах на глобальные техногенные и природные процессы. Многочисленные взрывы, связанные с проведением буровых работ в области распространения мерзлых пород, колоссальные объёмы парниковых газов поступающих в атмосферу с территорий занятых криолитозоной, мощные естественные взрывные процессы, формирующие воронки газового выброса на северных территориях и Арктическом шельфе это не полный перечень процессов, связанных с газонасыщенными мёрзлыми породами. Данная монография является пионерной работой посвящённой данной тематике. Значительным успехом авторов монографии является использование геосистемного подхода. Любая область повышенного, по сравнению с фоновыми значениями, содержания газа в мёрзлых породах, представляет собой геосистему с присущими ей границами, структурой, свойствами, историей развития. Авторы не ограничиваются описанием геосистем газонасыщенных многолетнемёрзлых пород, но и рассматривают комплекс проблем связанных с ними, получивших отражение в структуре работы.

Работа состоит из Введения, 7 глав, Заключения и перечня использованной литературы.

В главе 1 рассматриваются особенности формирования геосистем газонасыщенных многолетнемёрзлых пород. Показаны источники газа в многолетнемёрзлых породах (биохимический, катагенетический, газовыделение при диссоциации газогидратов, содержащихся в многолетнемёрзлых породах). Рассмотрены первичные газодинамические геосистемы (геосисемы деятельного слоя, генетически обусловленные газодинамические геосистемы, газодинамические геосистемы тектонических структур). Предложено теоретическое обоснование выделения геосистем газонасыщенных мёрзлых пород.

Глава 2 посвящена рассмотрению особенностей формирования геосистем газонасыщенных мёрзлых пород на шельфе арктических морей. Показаны особенности газонасыщения в различных районах субаквальной криолитозоны в области первичного океанического криолитогеогенеза и зоне перехода от субаквальных к субаральных условиям. Рассмотрены флюидогеохимические геосистемы на шельфе арктических морей в современных условиях.

В главе 3 рассмотрены условия при которых возможна миграция газа в мёрзлых породах. Показана важность учёта миграции внутримёрзлотного газа: при оценке поступления парниковых газов из мёрзлых пород в атмосферу, расчёта возможности взрывных процессов при техногенных воздействиях на газонасыщенные мёрзлые породы, выяснении процессов формирования воронок газового выброса. Показана зависимость свойств многолетнемёрзлых пород и льдов от изменения температуры. Рассмотрены условия формирования растеплённых зон под поверхностными водоёмами. Приведены и проанализированы материалы по лабораторному моделированию миграции газа сквозь льды и мерзлые породы.

В главе 4 рассматриваются закономерности строения и формирования воронок газового выброса. Показано, что данные образования являются результатом локального разрушения геосистем газонасыщенных многолетнемёрзлых пород. Проанализированы существующие гипотезы формирования воронок газового выброса. Рассмотрены структурные элементы воронок газового выброса, связанные с историей их формирования. Проведён обзор работ по лабораторному моделированию процессов связанных с течением твёрдого материала. Предложены феноменологическая модель



формирования воронок газового выброса и сценарии развития формирования воронок газового выброса в криолитозоне в зависимости от природных условий.

В главе 5 раскрываются особенности протекания процессов естественные и техногенных взрывных процессов в криолитозоне за счёт выброса внутримёрзлотных газов. Рассматриваются особенности протекания взрывных процессов в различных геосистемах газонасыщенных мёрзлых пород: взрывы гидралакколитов, взрывы, формирующие воронки газового выброса, техногенные газовые выбросы.

Глава 6 посвящена математическому моделированию газодинамических процессов в многолетнемёрзлых породах при разложении газогидратов. Предложена структурная модель мёрзлого грунта и ее математическое описание. Приведены результаты моделирования напряжённо-деформированного состояния ледогрунтового массива в окрестности первичной полости избыточного давления, формирующейся на начальной стадии разложения газогидратов в многолетнемёрзлых породах. Проведён анализ результатов численного моделирования с использованием моделей Друкера-Прагера и Хоека-Брауна. Проведено математическое моделирование движения флюида в многолетнемёрзлых породах с использованием уравнений фильтрации Бринкмана. Предложены аналитические решения для системы трещин и цилиндрических каналов. Проведено усреднение нестационарных уравнений фильтрации вязкого флюида в недеформируемой пористой среде. Показана возможность многомасштабного усреднения уравнений переноса газовой фазы в пористой среде.

В главе 7 рассмотрены инженерно-геологические, геофизические и геохимические методы изучения газонасыщенных геосистем в криолитозоне.

По мнению рецензента в работу можно было бы дополнить разделом посвящённым свойствам газонасыщенных мёрзлых пород и материалами по их районированию. Но, к сожалению, в настоящее время, достаточного количества данных для обобщений нет.

Монография является значительным вкладом в новое научное направление, каким является изучение геосистем газонасыщенных многолетнемёрзлых пород.

Работа будет весьма интересна и полезна для геокриологов, геоэкологов, геологов и других специалистов, а также для всех интересующихся процессами, происходящими в криолитозоне.

Главный научный сотрудник  
Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
д.г.-м.н., профессор РАН



П.С. Микляев

02.02.2021

+79261359563  
peterm7@inbox.ru



# ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД

А.Н. Хименков, А.Н. Власов, А.В. Брушков,  
А.В. Кошурников, Д.Б. Волков-Богородский,  
Д.О. Сергеев, В.Е. Гагарин, П.А. Соболев

## Аннотация

В монографии 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 пять 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 мёрзлые породы). Наибольшее внимание уделено процессам перераспределения и локализации газов и формированию газонасыщенных мёрзлых пород. Приведены результаты лабораторного и математического моделирования фильтрации газа в мёрзлых породах. Показаны особенности протекания естественных и техногенных взрывных процессов в криолитозоне. Проанализированы закономерности строения и формирования воронок газового выброса. Рассмотрены методы изучения газонасыщенных геосистем в криолитозоне. Книга рассчитана на широкий круг специалистов разного профиля, чьи научные или практические интересы связаны с изучением криолитозоны, а также может быть полезна студентам геологических и географических факультетов высших учебных заведений.

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

## Abstract

In this monograph we proved that gas-saturated zones in seasonally and permafrost rocks have all the properties of geosystems: localization in space, boundaries, morphology, individual structure, development history, life cycle and hierarchy. Five types of geosystems have been identified: active layer type; genetic type; geology type (confined to geological structures); secondary, associated with the decomposition of gas hydrates in natural conditions; technogenic (due to thermal or mechanical impact on hydrate-saturated and gas-saturated frozen rocks). Special attention is paid to the processes of redistribution and localization of gases and the formation of gas-saturated frozen soil. The results of laboratory and mathematical modeling of gas filtration in frozen soils are presented. The properties of natural and man-made explosive processes in the cryolithozone are shown. The regularities of the structure and formation of gas emission funnels are analyzed. Methods for studying gas-saturated geosystems in permafrost are considered. The book is intended for a wide range of specialists in various fields, whose scientific or practical interests are related to the study of the permafrost zone, and may also be useful for students of geological and geographical faculties of higher educational institutions.



## **Авторы**

Хименков Александр Николаевич, к. г.-м. н., ИГЭ им. Е.М. Сергеева РАН.

Власов Александр Николаевич, д. т. н., ИПРИМ РАН.

Брушков Анатолий Викторович, д. г.-м. н., МГУ им. М.В. Ломоносова.

Кошурников Андрей Викторович, к. г.-м. н., МГУ им. М.В. Ломоносова.

Волков-Богородский Дмитрий Борисович, к.ф.-т.н., ИПРИМ РАН.

Сергеев Дмитрий Олегович, к. г.-м. н., ИГЭ им. Е.М. Сергеева РАН.

Гагарин Владимир Евгеньевич, к. г.-м. н., МГУ им. М.В. Ломоносова.

Соболев Пётр Алексеевич, МГУ им. М.В. Ломоносова.



# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	12
<b>Введение</b> .....	15

## ГЛАВА 1.

### ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ

<b>МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД</b> .....	17
--------------------------------------	----

<b>Введение</b> .....	17
-----------------------	----

1.1. Источники газа в многолетнемёрзлых породах .....	18
1.1.1. Биохимический (болотный) газ .....	18
1.1.2. Катагенический (термогенный) газ .....	19
1.1.3. Газ, выделяющийся при диссоциации газогидратов, содержащихся в многолетнемёрзлых породах .....	20
1.2. Формы проявления газонасыщенных мёрзлых пород .....	20
1.3. Процессы формирования газовых скоплений в мёрзлых породах .....	25
1.3.1. Формирование газонасыщенных зон в деятельном слое .....	25
1.3.2. Газонасыщенные зоны в различных генетических типах отложений .....	26
1.3.3. Газодинамические геосистемы тектонических структур (скопления газа в куполах) .....	31
1.3.4. Связь крупных массивов подземных льдов с газонасыщенными многолетнемёрзлыми породами .....	34
1.3.5. Формирование крупных газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых породах на примере Бованенковского НГКМ .....	35
1.4. Газонасыщенные геосистемы, связанные с разложением газогидратов в многолетнемёрзлых породах .....	43
1.5. Геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород .....	43
<b>Выводы</b> .....	50
<b>Библиография</b> .....	52

## ГЛАВА 2.

### ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ МЁРЗЛЫЕ ПОРОДЫ

<b>НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ</b> .....	57
--	----

<b>Введение</b> .....	57
-----------------------	----

2.1. Мёрзлые породы на шельфе арктических морей .....	57
2.2. Распределение газа на различных стадиях океанического криолитогенеза .....	61
2.3. Формирование крупных скоплений газонасыщенных льдистых мёрзлых пород в субаквальных условиях .....	69
2.4. Мёрзлые газонасыщенные льдистые бугры на арктическом шельфе .....	73
<b>Выводы</b> .....	76
<b>Библиография</b> .....	77

## ГЛАВА 3.

### МИГРАЦИЯ ГАЗОВ В МЁРЗЛЫХ ПОРОДАХ .....80

#### Введение .....80

#### 3.1. Состояние проблемы фильтрации газа в мёрзлых породах .....81

#### 3.2. Зависимость свойств многолетнемёрзлых пород и льдов от изменения температуры .....83

#### 3.3. Изменения температуры многолетнемёрзлых пород в субэкральных условиях как фактор влияния на газонасыщенные зоны .....87

#### 3.4. Формирование растеплённых зон под поверхностными водоёмами .....88

#### 3.5. Формирование зон аномально высокого давления газа в многолетнемёрзлых породах .....92

#### 3.6. Процессы миграции газов в мёрзлых породах .....94

#### 3.7. Лабораторное моделирование миграции газа сквозь льды и мёрзлые породы ....96

##### 3.7.1. Методика проведения исследований .....96

##### 3.7.2. Результаты лабораторного изучения фильтрации газа сквозь мёрзлые породы и льды .....98

##### 3.7.2.1. Лёд с минерализацией 20 г/кг .....98

##### 3.7.2.2. Лёд с минерализацией 5 г/кг .....100

##### 3.7.2.3. Пресный лёд .....104

##### 3.7.3. Исследование фильтрации газа в грунтовых образцах .....105

##### 3.7.4. Изучение динамики выделения газа из мёрзлых грунтов при изменении температуры и давления .....114

##### 3.7.5. Обсуждение результатов лабораторного моделирования миграции газа сквозь льды и мёрзлые породы .....115

#### Выводы .....120

#### Библиография .....122

## ГЛАВА 4.

### ВОРОНКИ ГАЗОВОГО ВЫБРОСА НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ

### СИБИРИ КАК ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА

### ГАЗОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ .....126

#### Введение .....126

#### 4.1. Воронки газового выброса в многолетнемёрзлых породах на севере Западной Сибири .....127

#### 4.2. Существующие гипотезы формирования воронок газового выброса .....147

#### 4.3. Стадийность развития воронок газового выброса .....153

##### 4.3.1. Геология .....154

##### 4.3.2. Структурные элементы воронок газового выброса, связанные с историей их формирования .....155

##### 4.3.3. Обзор работ по лабораторному моделированию процессов, связанных с течением твёрдого материала .....168

##### 4.3.4. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса ...173

#### 4.4. Сценарии развития формирования воронок газового выброса в криолитозоне в зависимости от природных условий и истории развития .....174

#### Выводы .....176

#### Библиография .....177



**ГЛАВА 5.****ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ВЗРЫВНЫЕ****ПРОЦЕССЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ .....181****Введение .....181**

## 5.1. Общие положения .....181

## 5.2. Взрывы гидролакколитов .....182

## 5.3. Формирование воронок газового выброса как результат взрывных процессов ...183

5.4. Различия процессов формирования гидролакколитов и воронок  
газового выброса .....193

## 5.5. Техногенные взрывы в криолитозоне .....194

5.5.1. Виды техногенных воздействий на газосодержащие  
многолетнемёрзлые породы .....1955.6. Выявление участков возможного развития взрывных процессов  
в районе расположения инженерных сооружений .....2035.7. Природные и техногенно обусловленные взрывы в криолитозоне  
как часть системы криогенных процессов .....204**Выводы .....208****Библиография .....209****ГЛАВА 6.****МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ****ПРОЦЕССОВ В МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОДАХ****ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ ГАЗОГИДРАТОВ .....212****Введение .....212**6.1. Основные элементы строения криогенной газодинамической геосистемы,  
сформировавшей Ямальский кратер .....212

## 6.2. Структурная модель мёрзлого грунта и её математическое описание .....215

6.3. Моделирование напряжённо-деформированного состояния ледогрунтового  
массива в окрестности первичной полости избыточного давления,  
формирующейся на начальной стадии разложения газогидратов  
в многолетнемёрзлых породах .....217

## 6.3.1. Идеально-упругопластическая модель Друкера–Прагера .....218

## 6.3.2. Модель Хоека–Брауна (модель НВ) .....219

## 6.3.4. Результаты численного моделирования и их анализ .....220

6.3.4. Вариант 1. Модель Хоека–Брауна и Друкера–Прагера,  $a = 20 \text{ m}$ ,  $b = 10 \text{ m}$  ..2216.3.5. Вариант 2. Модель Хоека–Брауна,  $a = 10 \text{ m}$ ,  $b = 20 \text{ m}$  .....2226.3.5. Вариант 3. Модель Хоека–Брауна,  $a = 10 \text{ m}$ ,  $b = 20 \text{ m}$  и  $a = b = 10 \text{ m}$ ,  
полость и избыточное давление появляются одновременно на этапе 2 ..2236.4. Математическое моделирование движения флюида в многолетнемёрзлых  
породах .....223

## 6.4.1. Усреднение уравнений фильтрации Бринкмана .....224

6.4.2. Аналитические решения для системы трещин  
и цилиндрических каналов .....231

6.5. Усреднение нестационарных уравнений фильтрации вязкого флюида в недеформируемой пористой среде .....	232
6.5.1. Выбор определяющих соотношений .....	234
6.5.2. Процедура двухмасштабного усреднения .....	236
6.5.3. Решение задачи на ячейке с цилиндрическими каналами (одномерный случай) .....	239
6.5.4. Результаты численно-аналитического решения задачи на ячейке (трёхмерный случай) .....	240
6.5.5. Исследование влияния нелинейностей на распределение давления и скорости .....	242
6.5.6. Результаты расчётов в случае зависимости вязкости, коэффициента трения и плотности от давления .....	243
6.6. Многомасштабное усреднение уравнений переноса газовой фазы в пористой среде .....	247
6.6.1. Постановка задачи и определяющие уравнения .....	247
6.6.2. Процедура усреднения .....	248
6.6.3. Результаты численного моделирования .....	251
<b>Выводы .....</b>	<b>259</b>
<b>Библиография .....</b>	<b>261</b>

## **ГЛАВА 7.**

### **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ В КРИОЛИТОЗОНЕ .....**

<b>Введение .....</b>	<b>264</b>
7.1. Геофизические методы изучения газонасыщенных зон в толще многолетнемёрзлых пород .....	264
7.1.1. Комплекс геофизических методов для изучения ореолов оттаивания и растепления мёрзлых пород вокруг скважин и на территории кустовых площадок .....	274
7.2. Исследование состава и свойств пород, слагающих газодинамические геосистемы .....	275
7.3. Изучение структурно-текстурных особенностей газодинамических геосистем в геологических обнажениях .....	276
7.4. Методы инженерно-геологических изысканий при изучении морфологии поверхностных субэкральных образований, связанных с динамическими процессами в многолетнемёрзлых породах (на примере изучения воронок газового выброса) .....	276
7.5. Геохимические исследования .....	277
<b>Выводы .....</b>	<b>280</b>
<b>Библиография .....</b>	<b>281</b>

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....**



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография «Геосистемы газонасыщенных многолетнемёрзлых пород» посвящена актуальной теме влияния газов, содержащихся в многолетнемёрзлых породах, на глобальные техногенные и природные процессы. Многочисленные взрывы, связанные с проведением буровых работ в области распространения мёрзлых пород, колоссальные объёмы парниковых газов, поступающих в атмосферу с территорий, занятых криолитозонной, мощные естественные взрывные процессы, формирующие воронки газового выброса на северных территориях и арктическом шельфе — это неполный перечень процессов, связанных с газонасыщенными мёрзлыми породами. Данная монография является пионерной работой, посвящённой указанной тематике. Любая область повышенного по сравнению с фоновыми значениями содержания газа в мёрзлых породах представляет собой геосистему с соответствующими границами, морфологией, структурой, свойствами, историей развития.

Разработка теоретических положений формирования и разрушения данных геосистем не может быть решена в рамках одной научной дисциплины и требует мультинаучного подхода на стыке геокриологии, флюидогеодинимики, климатологии, механики сплошных сред, исторической и динамической геологии. Исходные теоретические положения формирования и разрушения геосистем газонасыщенных мёрзлых пород следующие:

- 1) геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород реализуются в виде скоплений свободного газа различной морфологии и размеров или газогидратов в мёрзлых породах в виде разнообразных криогенных текстур;
- 2) основными причинами формирования геосистем газонасыщенных мёрзлых пород являются криогенная миграция растворённого и свободного газа при эпигенетическом промерзании осадков; движение растворённых или свободных газов с больших глубин;
- 3) необходимым условием возникновения геосистем газонасыщенных мёрзлых пород является наличие или образование газонепроницаемого экрана;
- 4) разрушение геосистем газонасыщенных мёрзлых пород связано с нарушением термодинамических условий, обеспечивающих их стабильное существование, с возрастанием давления до значений, превышающих прочность газонепроницаемого экрана;
- 5) формирование и разрушение геосистем газонасыщенных мёрзлых пород осуществляется путём последовательной смены стадий, каждая из которых представлена комплексом парагенетически связанных процессов и образований.

Целью настоящей монографии является разработка теоретических положений формирования и разрушения геосистем газонасыщенных мёрзлых пород в субэкральных и субквальных условиях, анализ процессов и явлений, с ними связанных, разработка математических моделей перераспределения газовых флюидов и подбор методов изучения данных геосистем.

Монография состоит из введения, семи глав, заключения, перечня использованной литературы.

Во введении показано, что в последние десятилетия интерес к изучению газонасыщенных пород в криолитозоне резко вырос. Связано это с активным освоением арктических территорий и шельфа Северного ледовитого океана и глобальным потеплением кли-

мата. Бурение многолетнемёрзлых пород приводит к многочисленным газовым выбросам. Глобальное потепление вызывает прогрессирующее поступление парниковых газов в атмосферу. В криолитозоне активизировались естественные взрывы, связанные с формированием воронок газового выброса. Все эти процессы связаны с газами, содержащимися в многолетнемёрзлых породах. Однако закономерности формирования газонасыщенных мёрзлых пород не выявлены, процессы, происходящие при их формировании и разрушении, не изучены. Сами породы как самостоятельный объект не выделены.

В главе 1 рассматриваются особенности формирования геосистем газонасыщенных многолетнемёрзлых пород. Показаны источники газа в многолетнемёрзлых породах (биохимический, катагенический, выделяющийся при диссоциации газогидратов, содержащихся в многолетнемёрзлых породах). Рассмотрены первичные газодинамические геосистемы (геосистемы деятельного слоя, генетически обусловленные газодинамические геосистемы, газодинамические геосистемы тектонических структур). Предложено теоретическое обоснование выделения геосистем газонасыщенных мёрзлых пород.

Глава 2 посвящена рассмотрению особенностей формирования геосистем газонасыщенных мёрзлых пород на шельфе арктических морей. Показаны особенности газонасыщения в различных районах субаквальной криолитозоны в области первичного океанического криолитогенеза и зоне перехода от субаквальных к субаэральным условиям. Рассмотрены флюидогеодинамические геосистемы на шельфе арктических морей в современных условиях.

В главе 3 рассмотрены условия, при которых возможна миграция газа в мёрзлых породах. Показана важность учёта миграции внутримёрзлотного газа при оценке поступления парниковых газов из мёрзлых пород в атмосферу, для расчёта возможности взрывных процессов при техногенных воздействиях на газонасыщенные мёрзлые породы, при выяснении процессов формирования воронок газового выброса. Представлена зависимость свойств многолетнемёрзлых пород и льдов от изменения температуры. Рассмотрены условия формирования растеплённых зон под поверхностными водоёмами. Приведены и проанализированы материалы по лабораторному моделированию миграции газа сквозь льды и мёрзлые породы.

В главе 4 рассматриваются закономерности строения и формирования воронок газового выброса. Показано, что данные образования являются результатом локального разрушения геосистем газонасыщенных многолетнемёрзлых пород. Проанализированы существующие гипотезы формирования воронок газового выброса. Рассмотрены структурные элементы воронок газового выброса, связанные с историей их формирования. Проведён обзор работ по лабораторному моделированию процессов, связанных с течением твёрдого материала. Предложены феноменологическая модель формирования воронок газового выброса и сценарии развития формирования воронок газового выброса в криолитозоне в зависимости от природных условий.

В главе 5 раскрываются особенности протекания естественных и техногенных взрывных процессов в криолитозоне за счёт выброса внутримёрзлотных газов. Рассматриваются особенности протекания взрывных процессов в различных геосистемах газонасыщенных мёрзлых пород: взрывы гидролакколитов, взрывы, формирующие воронки газового выброса, техногенные газовые выбросы.

Глава 6 посвящена математическому моделированию газодинамических процессов в многолетнемёрзлых породах при разложении газогидратов. Предложена структурная модель мёрзлого грунта и её математическое описание. Приведены результаты модели-



рования напряжённо-деформированного состояния ледогрунтового массива в окрестности первичной полости избыточного давления, формирующейся на начальной стадии разложения газогидратов в многолетнемёрзлых породах. Проведён анализ результатов численного моделирования с использованием моделей Друкера–Прагера и Хоека–Брауна. Проведено математическое моделирование движения флюида в многолетнемёрзлых породах с использованием уравнений фильтрации Бринкмана. Предложены аналитические решения для системы трещин и цилиндрических каналов. Проведено усреднение нестационарных уравнений фильтрации вязкого флюида в недеформируемой пористой среде. Показано решение задачи на ячейке с цилиндрическими каналами (одномерный случай). Приведены результаты численно-аналитического решения задачи на ячейке (трёхмерный случай). Проведено исследование влияния нелинейностей на распределение давления и скорости. Показана возможность многомасштабного усреднения уравнений переноса газовой фазы в пористой среде.

В главе 7 рассмотрены инженерно-геологические, геофизические и геохимические методы изучения газонасыщенных геосистем в криолитозоне.

Авторский коллектив включает в себя специалистов ведущих научных организаций РФ: Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Института прикладной механики РАН, геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия проблеме происхождения и распространения газов в мёрзлых породах уделяется большое внимание со стороны геокриологов, географов, климатологов и геологов. Это связано с аварийными ситуациями, вызванными выбросами газа при бурении, естественными взрывными процессами, формирующими воронки газового выброса, риском выделения парниковых газов из мёрзлых толщ. Однако со времени формирования геокриологии как научного направления свободный газ как составная часть мёрзлых пород привлекал наименьшее внимание исследователей. Газовая составляющая мёрзлой породы в твёрдом состоянии, в виде газогидратов, привлекала гораздо большее внимание. К концу 1990-х гг. в результате масштабного проведения буровых работ на территориях криолитозоны был получен огромный объём данных о содержании углеводородных газов. Оказалось, что газовая составляющая может играть значительную роль в многолетнемёрзлых породах: придаёт им определённые текстурно-морфологические и физико-химические особенности, несёт важную генетическую информацию. Размеры газонасыщенных зон здесь составляют от сотен метров до десятков километров, а выходы газа достигают десятков тысяч кубометров в сутки, что позволяет рассматривать их как потенциальные источники добычи. Несмотря на то что наблюдается острая практическая необходимость использования данных о газонасыщенных мёрзлых породах, их изученность явно недостаточна.

Предлагаемая работа посвящена рассмотрению закономерностей формирования и разрушения газонасыщенных зон в мёрзлых породах. В качестве основного методического приёма при этом будет использован геосистемный подход. Газонасыщенные зоны в мёрзлых породах имеют свои чётко выраженные границы, морфологию, структуру, свойства, отличающие их от вмещающих пород, а также иерархическую организацию и историю развития, что позволяет выделять их как геосистемы. Разрушение газонасыщенных мёрзлых пород происходит при локальном нарушении термодинамических условий, обеспечивающих их стабильное существование. При этом также формируются специфические геосистемы.

Отдельная глава посвящена геосистемам газонасыщенных мёрзлых пород на шельфе арктических морей. Данные геосистемы связаны с выходами струйных газов, взрывными процессами, ростом бугров на дне, что может представлять опасность при проведении работ и эксплуатации инженерных сооружений на шельфе. В последние годы выяснилось, что Арктический регион вносит существенный вклад в увеличение парниковых газов в атмосфере Земли. Более 80% площади внутреннего мелководного шельфа является источником метана в атмосферу.

Рассматриваемые в работе воронки газового выброса являются примером локального разрушения геосистем газонасыщенных мёрзлых пород. Рассмотрено строение наиболее изученных воронок, проанализированы гипотезы их происхождения и предложены различные сценарии развития. Отдельно будут рассмотрены естественные и техногенные взрывные процессы, являющиеся заключительной стадией некоторых сценариев разрушения геосистем газонасыщенных мёрзлых пород. Значительное внимание будет уделено фильтрации газа в мёрзлых породах как одному из ведущих процессов.

В настоящее время возможность фильтрации газа допускается только при естественном или техногенном оттаивании мёрзлых пород. В условиях усиливающегося техноген-



ного воздействия при интенсивном освоении северных территорий и арктического шельфа, а также ускоряющегося глобального потепления климата такой подход не позволяет адекватно оценивать процессы, происходящие в мёрзлых породах. Реально эти опасные процессы возникают раньше, чем принято считать. На современном этапе изучения фильтрации газа в льдистых мёрзлых породах наметился определённый рубеж, сдерживающий дальнейшее изучение этой важной в теоретическом и практическом отношении проблемы. Он заключается в постулировании положения о невозможности перераспределения газа в мёрзлых льдистых породах. Ошибочность такого подхода хорошо иллюстрируется взрывными процессами, связанными с воронками газового выброса, обнаруженными на севере Западной Сибири; многочисленными газовыми выбросами, связанными с бурением скважин; выходами углеводородных газов, обнаруженными на территории криолитозоны. В работе показаны направления исследований по преодолению этого рубежа путём поиска условий, при которых фильтрация становится возможной.

Изучение криогенных газодинамических геосистем невозможно без построения их математических моделей. Это обусловлено рядом обстоятельств. Геологические системы являются весьма сложными структурами, находящимися под влиянием многочисленных, трудно учитываемых факторов. Их практически невозможно изучать в реальных условиях, где мы наблюдаем лишь конечный результат взаимодействия сменяющих друг друга процессов. Математическая модель, базирующаяся на фундаментальных принципах, определяющих существование той или иной газодинамической геосистемы, позволяет избавляться от случайных и второстепенных показателей. Многообразие процессов, связанных с формированием и разрушением геосистем газонасыщенных мёрзлых пород, требует соответствующего комплексного изучения. В работе рассмотрен широкий круг инженерно-геологических методов исследования, сочетание которых позволит проводить наиболее эффективную оценку всех стадий развития выделяемых природных объектов.

## ГЛАВА 1.

# ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД

### Введение

По классическому определению, данному А.И. Поповым, «мёрзлые породы являются многофазными и многокомпонентными системами. По агрегатному состоянию в мёрзлых породах следует выделять твёрдую, жидкую и газообразную составляющие» [Попов, 1985. С. 11]. Из трёх названных основных составляющих мёрзлых пород газовая является наименее изученной. Считалось, что мерзлота непроницаема для газа, низкие температуры подавляют активность живого вещества, и поэтому накопление газа в криолитозоне невозможно. Данная тема научных исследований казалась незначительной и имеющей только академический интерес. С середины 50-х гг. прошлого века начинается интенсивное освоение нефтегазовых месторождений на севере Арктики. При бурении скважин в толще мёрзлых пород 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 [Мельников и др., 1989; Арэ, 1989; Чабан, 1991; Якушев, 2009; Криосфера..., 2013]. Таким образом, было установлено, что в мёрзлых породах могут формироваться локальные газонасыщенные зоны, оказывающие неблагоприятное воздействие на проведение буровых работ. Исследования, проведённые в последние десятилетия, показали, что территориям, сложенным многолетнемёрзлыми породами (ММП), отводится особая роль в современном цикле  $\text{CH}_4$ , здесь сосредоточено более 30% всего органического углерода планеты, при этом подавляющая его часть законсервирована в мерзлоте. Прогнозируемые климатические изменения к 2100 г. по результатам моделирования глубины сезонного оттаивания в модели тепло- и влагопереноса (ИФА РАН) приведут к высвобождению из многолетнемёрзлых пород 1,3–1,7 млрд  $\text{м}^3$   $\text{CH}_4$  [Краев, 2010]. Оттаивание мерзлоты ведёт к деградации содержащихся в ней газогидратов, что, в свою очередь, приводит к эмиссии метана из криогенных толщ. Эмиссия метана может приобрести массированный характер и достигать уровней, способных вызвать значительное и даже катастрофическое потепление нашей планеты [Сергиенко и др., 2012]. Таким образом, проблема формирования и накопления газа в мёрзлых породах становится чрезвычайно важной как в теоретическом, так и в практическом отношении.

К настоящему времени сформулированы положения о различных генетических типах газа в мёрзлых породах. Накоплен определённый объём данных по содержанию газа в деятельном слое, в мёрзлых породах различного генетического типа и различных тектонических структурах. Конкретизированы критерии выделения фоновых и повышенных значений газосодержания в породах. Разработан механизм криогенной концентрации газа и формирования газогидратов при эпигенетическом и сингенетическом промерзании пород. Выявлены условия и механизмы фильтрации газа в мёрзлых породах. Проведённая работа позволила лучше понять процессы образования газонасыщенных мёрзлых пород и их поведение при природных изменениях и техногенных воздействиях. Тем не менее изученность данных геологических образований, их свойств, понимание закономерностей распространения, истории развития, процессов, связанных с формированием и разрушением, явно недостаточны, принимая во внимание существующие хозяйственные и эколо-

гические проблемы. Связано это в первую очередь с тем, что газонасыщенные мёрзлые породы даже не выделены в отдельный тип. Они не являются целенаправленным объектом изучения ни одной из наук о Земле, включая геокриологию. Перечисленные выше результаты исследований относятся к отдельным показателям, характеризующим данный тип мёрзлых пород, а этого явно недостаточно. Газонасыщенные мёрзлые породы представляют собой геологические тела со своей историей развития, границами, местоположением, строением и свойствами, т. е. они являются геосистемами. Данные геосистемы широко распространены в криолитозоне, они встречаются как в сезонномёрзлых, так и в многолетнемёрзлых породах, могут быть обнаружены во всех генетических типах отложений и имеют размеры от десятков сантиметров до десятков и сотен километров. При всём разнообразии размеров и морфологии развитие всех данных образований связано с определённой последовательностью событий: формированием первичного газа, его перераспределением в толще пород и накоплением в локальных зонах.

### **1.1. Источники газа в многолетнемёрзлых породах**

Наличие газовых включений в талых породах в наибольшей мере обеспечивается жизнедеятельностью бактерий, перерабатывающих содержащееся в них органическое вещество. В результате миграции выделившийся газ удаляется в перекрывающий водоём или в атмосферу. В зависимости от масштабов и интенсивности газонакопления можно выделить три типа первичных газонасыщенных геосистем в мёрзлых породах: деятельного слоя, генетических типов отложений, тектонических структур.

#### **1.1.1. Биохимический (болотный) газ**

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. 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 мёрзлых породах. Они распространены повсеместно, размеры таких зон будут зависеть в основном от количества органики и мощности осадков. Аллохтонная часть ОВ поступает в осадок с территорий, прилегающих к бассейну седиментации, в виде остатков высшей растительности, гумуса или гуминовых растворов, а также из более глубоких горизонтов по тектоническим трещинам и наклонно залегающим пластам. 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. Газы биохимического происхождения образуются: а) за счёт разложения аэробными и анаэробными микроорганизмами отмерших растительных и животных остатков (например, болотный газ); б) за счёт биогенного окисления в зоне гипергенеза различных продуктов изменения захороненного органического вещества. В зависимости от состава исходного материала и условий среды (то и другое определяет и состав соответствующего биоценоза микроорганизмов) биохимические газы включают в различных со-



отношениях  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др. [Геологический словарь, 1978]. Распространение биохимического газа отмечалось в мёрзлых разрезах как эпигенетического типа промерзания, так и сингенетического. Основным компонентом биохимического газа является метан. Это связано с тем, что в *пресной воде* озёр и болот практически отсутствуют сульфаты, *процессы сульфатредукции* там крайне подавлены, и весь водород, образовавшийся при разложении органического вещества, расходуется на метанообразование. Процессы *микробальной* генерации метана с глубиной быстро затухают и на нескольких метрах прекращаются. Однако анализ изотопного состава углерода в метане, выделившемся при бурении более глубоких (до 500 м) скважин в районах распространения многолетнемёрзлых осадочных пород (север Западной Сибири, север Канады), показал, что биохимический метан имеет гораздо большую глубину распространения, чем глубина сезонноталого слоя (СТС) или слоя нулевых годовых колебаний температуры. Его концентрирование в отдельные скопления может происходить вследствие промерзания газосодержащих пород и «выдавливания» водогазовой смеси в проницаемые талые и мёрзлые пропластки или в трещины гидроразрыва, создаваемые давлением всестороннего промерзания. При объёмном промерзании внутри замкнутых «карманов» могут создаваться давления, превышающие давления гидратообразования, и происходить частичный переход газа в гидратное состояние. Формированию скоплений биохимического газа способствует засоленность пород криолитозоны, что повышает мобильность воды и создаёт более благоприятные условия для вытеснения её газом. Биохимический газ может залегать как в рассеянном состоянии, так и в виде достаточно крупных скоплений. Он распространён в промёрзших осадочных толщах на больших площадях и представляет угрозу внезапных выбросов при бурении скважин. Кроме того, он рассматривается как основной парниковый газ, который поступает в атмосферу в полярных областях [Якушев, 2015].

### 1.1.2. Катагенетический (термогенный) газ

Генерация катагенетического газа происходит в результате катагенетических превращений органического вещества при прогрессивном литогенезе отложений и по мере погружения глинистых нефтегазоматеринских пород в осадочном бассейне с различным темпом опускания и поднятия в тектонических зонах и очагах генерации и аккумуляции углеводородов. В криолитозоне скопления катагенетических газов могут иметь следующее происхождение: а) в результате эпигенетического промерзания массивов горных пород, содержащих обычные залежи нефти и газа; б) вследствие миграции газа снизу по проницаемым зонам (разломы, литологические окна, талики) и образования скоплений в проницаемых слоях ММП. Сформированные в предыдущие эпохи, обычные нефтегазоносные залежи или нефтегазоматеринские пласты подвергаются многолетнему эпигенетическому промерзанию. При этом в залежах со сложным составом углеводородов могут происходить процессы выпадения в жидкую фазу тяжёлых углеводородов и соответствующее облегчение состава собственно газовой фазы, в которой будет доминировать метан с небольшими примесями его гомологов [Якушев, 2015]. Другой механизм появления в пределах ММП глубинного, катагенетического газа — миграция по проницаемым зонам (разломам) или литологическим окнам. До формирования криолитозоны происходила локальная разгрузка глубинных газовых залежей в гидро- и атмосферу через субвертикальные зоны трещиноватости и перекрывающие их рыхлые четвертичные отложения. Развитие криолитозоны консервирует и останавливает восходящие потоки газа. В многолетнемёрзлых породах образуются полости, заполненные свободным газом или газогидратом. Эти полости кон-

центрируются вдоль очагов бывшей разгрузки, например в зоне разлома, сопряжённой с таликовой зоной [Арэ, 1998]. Миграция катагенетического газа из газовой «шапки» нефтяных залежей вдоль разломных зон приводит к его смешиванию с биохимическим газом, выделившимся при разложении органического вещества [Якушев, 2015].

### **1.1.3. Газ, выделяющийся при диссоциации газогидратов, содержащихся в многолетнемёрзлых породах**

Гидратосодержащие мёрзлые породы представляют собой особого рода газонасыщенные породы. В них газ содержится в виде твёрдых кристаллических соединений молекул газа и воды. При диссоциации 1 м<sup>3</sup> газовых гидратов выделяется до 180 м<sup>3</sup> газа и 0,8 м<sup>3</sup> воды. При этом давление газа может достигать 2,6 МПа [Истомин и др., 2018]. Они могут формировать геологические тела мощностью в сотни метров. Для гидратосодержащих пород характерны высокое насыщение газогидратом, от 20 до 100% порового пространства, и высокая чувствительность к потеплению [Сергиенко и др., 2012]. В случае нарушения термобарических условий, обеспечивающих их устойчивое состояние, может наблюдаться резкий рост давления за счёт выделения газа. Данные процессы наблюдаются при бурении скважин в гидратосодержащих многолетнемёрзлых породах [Якушев, 2009; и др.]. С этими очагами могут быть связаны потоки газовых и водных флюидов, фильтрующихся по направлению от зоны диссоциации в ослабленные зоны.

## **1.2. Формы проявления газонасыщенных мёрзлых пород**

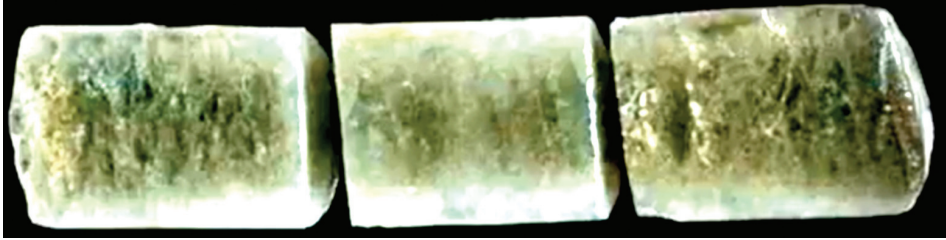
Прежде чем перейти к рассмотрению процессов формирования газонасыщенных мёрзлых пород, покажем формы их проявления в природе. К наиболее известным относятся льды многолетних бугров пучения (рис. 1.1).



**Рис. 1.1. Газонасыщенный лёд ядра многолетнего бугра пучения на севере Канады. Фото С. Дэллимора из книги Ю.К. Васильчука [Васильчук, 2014]**

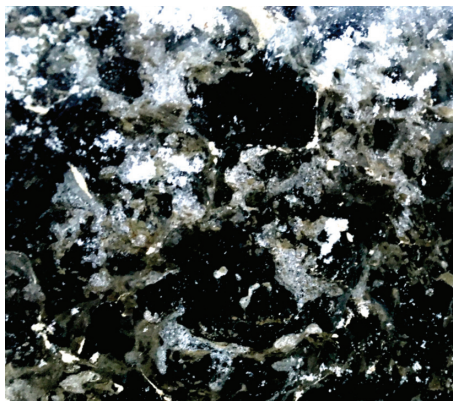
В этом случае газонасыщенные льды формируются при всестороннем промерзании линзы воды, залегающей в основании растущего бугра пучения.

Иногда газонасыщенные льдонасыщенные породы формируются при участии газа, поступающего из больших глубин. Ниже приведены материалы из доклада А.С. Смирнова «Поверхностные проявления флюидодинамических процессов Земли» на семинаре Сообщества молодых мерзловедов России (PYRNR), посвящённом воронкам газового выброса, состоявшемуся в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева (ИГЭ РАН) 28.11.2014 г. На рис. 1.2 показано строение ледяного ядра многолетнего бугра пучения на месторождении Песцовое Тазовского п-ва, сформированного газонасыщенным льдом из горизонта с аномально высоким содержанием водорода (глубина 16 м). В этом случае можно предположить наложение на типичное газонасыщение поступления глубинного газа.



**Рис. 1.2. Газонасыщенный лёд из горизонта с аномально высоким содержанием водорода (глубина 16 м) в многолетнем бугре пучения на месторождении Песцовое, Тазовский п-в**

Большое разнообразие газовых включений наблюдается в обнаруженных в 2014 г. воронках газовых выбросов в долине реки Еркутаяхи. На рис. 1.3 приведено строение газонасыщенного льда, разбитого трещинами на отдельные блоки. Газ распределён отдельными гроздьями мелких воздушных пузырьков. В этом случае наиболее вероятным процессом газонасыщения является поступление газа под напором в ранее сформировавшийся лёд.



**Рис. 1.3. Газовые скопления в виде гроздьев, лёд в стенке воронки газового выброса на реке Еркутаяхе (Южный Ямал). Фото Ю. Станиловской**

Скважиной, пробуренной вблизи Ямальского кратера (центральный Ямал), на глубине 5,8–6,3 м вскрыт слой плотного газонасыщенного (молочного) льда, разбитого вертикальными и горизонтальными трещинами (рис. 1.4).





**Рис. 1.4. Газонасыщенный (молочный) лёд вблизи воронки газового выброса, глубина 5,8–6,3 м (Ямальский кратер). Фото В. Хилимонюк [Buldovich et al., 2018]**

Глыбы льда, выброшенные из воронки, расположенной в районе реки Сеяхи на северо-востоке полуострова Ямал, состоят из чередующихся слоёв белого газонасыщенного льда и ледогрунта (рис. 1.5).



**Рис. 1.5. Глыбы газонасыщенного льда, выброшенного при образовании воронки газового выброса в районе реки Сеяхи (северо-восток п-ва Ямал). Фото А. Синицкого**

В отдельных глыбах видно ячеистое строение ледогрунта, по форме похожего на строение гидратосодержащих льдов (рис. 1.6, 1.7).



**Рис. 1.6. Обломок газонасыщенного пористого льда, выброшенного при образовании воронки газового выброса в районе реки Сеяхи (северо-восток п-ва Ямал). Фото А. Синицкого**



**Рис. 1.7. Фрагмент предыдущего рисунка (морфология поверхности пористого льда)**

Вокруг воронок газового выброса формируется газонасыщенный ледогрунтовый слой с субвертикальной слоистостью. Газовые включения здесь сильно деформированы и образуют плоские размазанные изометричные структуры (рис. 1.8). В стенках воронки газового выброса, получившей название Ямальский кратер, наблюдаются газовые включения разных размеров и морфологии, образующие вытянутые цепочки или изометричные скопления (рис. 1.9).



**Рис. 1.8. Кольцевая зона субвертикальной слоистости, обрамляющая Антипаютинскую воронку газового выброса. Фото М. Лапсуя**

Установлено, что приуроченные к газоносным структурам пластовые воды имеют повышенную газонасыщенность [Беспалова, 1984]. Промерзание огромных объёмов насыщенных газом пород сопровождается выделением растворённого газа и накоплением его в свободной форме в газовых карманах или в форме газогидратов. Массовый характер таких образований указывает на существование в криолитозоне условий для формирования газовых залежей достаточно крупных размеров. Например, на Бованенковском НГКМ одной из скважин (64-П-2) в интервале 72–80 м был вскрыт газовый пласт с оценёнными запасами



тервале глубин от 20 до 130 м<sup>3</sup> [Chuvilin et al., 2000; Yakushev, Chuvilin, Якушев, 2009].

Даже небольшой проведённый обзор строения газонасыщенных мёрзлых пород показывает большое разнообразие форм как отдельных газовых включений, так и газонасыщенных тел. Данное разнообразие определяется взаимодействием комплексов процессов, формирующих газонасыщенные мёрзлые толщи.

### 1.3. Процессы формирования газовых скоплений в мёрзлых породах

В научной литературе существуют различные точки зрения на причины формирования повышенного содержания газа в многолетнемёрзлых породах. Исследованиями различных авторов установлен бактериальный генезис углекислого газа и метана в мёрзлых отложениях и подземных льдах северных территорий и арктического шельфа [Leibman et al., 2010; Lein et al., 2003; Olefeldt et al., 2012; Васильев и др., 2015; Стрелецкая и др., 2018]. А.И. Обжиров, изучая распределение природных газов в осадках дальневосточных морей, 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 [Обжиров, 2018].

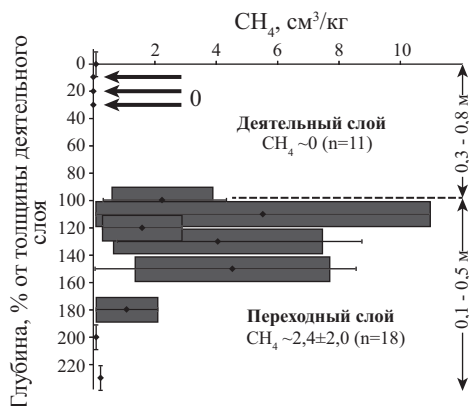
Г.Н. Краевым и Е.М. Ривкиной выявлена динамика криогенной концентрации метана при неравномерном промерзании деятельного слоя и эпигенетического промерзания озёрных отложений [Краев, Ривкина, 2017]. В.С. Якушевым показано, что мощное влияние на накопление газа в форме газогидратов в многолетнемёрзлых породах оказало неравномерное эпигенетическое промерзание выходящих из субаквального положения морских осадков [Якушев, 2009]. В работах С.Е. Агалакова, А.Р. Курчикова [Агалаков, 1997; Курчиков, 1992; Курчиков, 2001] показано, что мёрзлая толща является зоной локального накопления в диапировых структурах глубинного газа, поступающего по разломам. По мнению Б.М. Валяева, Р.М. Бембеля и др. [Валяев, 1997; Валяев, 2007; Бембель и др., 1997], 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 вышел ряд статей, посвящённых рассмотрению особенностей процессов, связанных с миграцией газа в мёрзлых породах и льдах, в которых газонасыщенные зоны рассмотрены как газодинамические геосистемы [Хименков и др., 2018а; Хименков и др., 2018б; Хименков, Станиловская, 2018], на основании лабораторного моделирования изучены процессы фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах [Хименков и др., 2019а; Хименков и др., 2019б].

#### 1.3.1. Формирование газонасыщенных зон в деятельном слое

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 промёрзшим слоем, со скоростью порядка 0,015 см<sup>3</sup>/кг·сут. В течение зимы в почвах северо-востока Сибири формируется 2–3 г/м<sup>2</sup> метана при мощности сезонноталого слоя (СТС) 50–60 см и около 1 г/м<sup>2</sup> в СТС мощностью 30 см. Авторы приходят к выводу, что средние значения концентрации метана у по-



дошвы СТС — около  $2 \text{ см}^3/\text{кг}$  — могут формироваться лишь за счёт 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  $1 \text{ дм}^2$ ) на одном из изученных участков потребовался биогенный метан не только из промерзающего вышележащего модельного столбика почвы объёмом  $5 \text{ дм}^3$ , но ещё 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 оттаивающем лишь в самые тёплые 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. 1.11) [Краев, Ривкина, 2017].

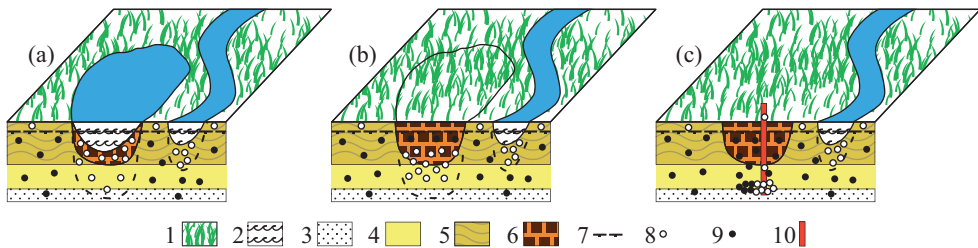


**Рис. 1.11. Распределение средней концентрации метана по относительным глубинам в деятельном слое и периодически оттаивающем верхнем горизонте многолетней мерзлоты (переходном слое) в сводных разрезах почв северо-востока Сибири [Краев, Ривкина, 2017]**

### 1.3.2. Газонасыщенные зоны в различных генетических типах отложений

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. 1.12). Разложение органики в озёрных осадках и породах талика при недостатке кислорода приводит к образованию и накоплению метана в молодых озёрных отложениях. Эпигенетическое промерзание озера начинается после заполнения его осадками или осушения при дренировании. Промерзание верхнего слоя осадков приводит к формированию газонепроницаемого слоя и повышению давления в талой зоне. Под слоем мёрзлого 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 смещаться вниз на десятки метров и накапливаться в литологических карманах [Kraev et al., 2017]. Следует добавить, что карманы, 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 только в свободной форме, но и в виде газогидратов, поскольку возникающие давления до  $30 \text{ кг/см}^2$ , большое количество воды и газа при отрицательных температурах создают для этого условия.



**Рис. 1.12. Палеоэкологическая реконструкция участка на Колымской пойме:**  
**а** — талые осадки под пойменным озером с потенциальным образованием метана; **б** — промерзание обогащённых метаном осадков после осушения озера; **с** — метан, захваченный в порах и полостях мёрзлой породы после полного замерзания талика;  
 1 — пойма; 2 — речные и озёрные воды; 3 — русловый 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 [Kraev et al., 2017]

Фоновые значения концентрации метана в эпигенетических мёрзлых породах различного генезиса приведены в табл. 1.1. Наблюдается значительный разброс значений содержания газа, даже в одном генетическом типе. Разница минимальных и максимальных значений может отличаться на порядок (для прибрежно-морских глин). Вероятно, основную роль в этом играет криогенная дифференциация газов при промерзании.

Выше были рассмотрены примеры газонасыщенных зон генетического уровня, сформированных при эпигенетическом промерзании. В сингенетических многолетнемёрзлых породах содержание газа намного меньше. Ледовый комплекс, или едома, широко распространен в вечной мерзлоте Центральной и Восточной Сибири. Он образовывался долинах главных рек и был сформирован в конце плейстоцена сингенетическим путём. Средняя мощность ледового комплекса — приблизительно 40 м. Исследования показали большой разброс концентрации метана в ледовом комплексе [Fukuda, 1999]. На глубине 0–10 м высокая — до  $10\,000 \text{ ppmv}$ . На глубине 10–20 м концентрация низкая —  $0,1\text{--}1 \text{ ppmv}$ . На рисунке 5 представлено содержание метана в едоме. Здесь прослеживается также закономерность. Это связано с особенностями формирования данных многолетнемёрзлых пород. Газ, накапливающийся в сезонноталом слое, удаляется в атмосферу.

Приращение слоя многолетнемёрзлых пород происходит за счёт слоя, промерзающего снизу, при этом газ дополнительно отжимается из зоны льдообразования. Поэтому синкриогенные отложения, несмотря на большое количество органики, содержат незначительное количество метана. Покровный слой мощностью до 3 м, оттаявший в голоцене и промерзший затем эпигенетически, метана содержит гораздо больше (рис. 1.13). В этом случае газ вместе с рыхлосвязанной водой мигрирует к фронту промерзания и там накапливается.

Таблица 1.1. Концентрация метана (ppmv) в мёрзлых породах [Васильев и др., 2015]

Возраст	МИС 1			МИС2			МИС 2-3			МИС5		
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 <sub>4</sub>	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

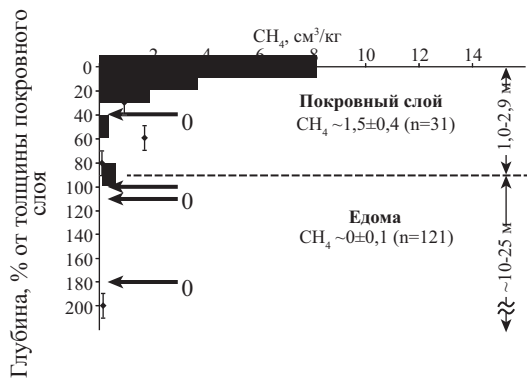
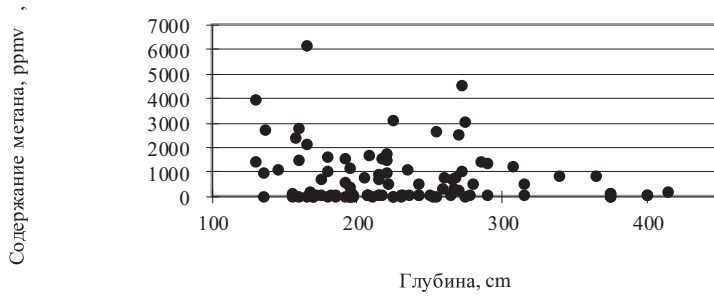
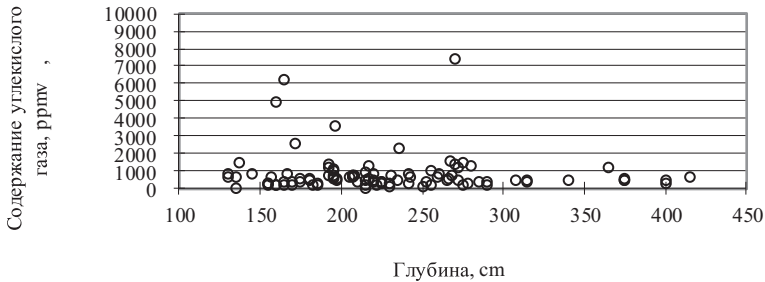


Рис. 1.13. Распределение средней концентрации метана по относительным глубинам в горизонте многолетнемёрзлых пород, оттаивавшем в голоцене (покровном слое) в сводных разрезах почв северо-востока Сибири [Краев, Ривкина, 2017]

Результаты измерений концентрации метана и углекислого газа в поровом пространстве мёрзлых пород на территории Якутии показаны на рис. 1.14, 1.15. Концентрации метана во многих образцах мёрзлых пород превышают 1000 ppmv. Максимальное значение — приблизительно 6000 ppmv. Обычно концентрации метана и углекислого газа находятся в обратно пропорциональной зависимости.



**Рис. 1.14. Содержание метана в мерзлоте Якутии**



**Рис. 1.15. Содержание углекислого газа в мерзлоте Якутии**

Результаты измерений концентрации метана и углекислого газа в ледяных жилах на территории Якутии (долины рек Нелегер, Алдан, Сырдах) показаны в табл. 1.2. Значения концентрации метана в ледяных жилах меньше, чем в мёрзлых породах.

К газонасыщенным криогенным геосистемам следует отнести и многолетние бугры пучения (гидролакколиты). 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», характерной особенностью 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 [Шумский, 1955]. Низкотемпературные льдистые мёрзлые породы, перекрывающие газонасыщенные зоны, не позволяют газам, находящимся под давлением, поступать в атмосферу. Растущие бугры подстилаются талыми водоносными горизонтами или водяными линзами мощностью до 2 м и обладающими гидравлическим напором. На рис. 1.16 приводится типичная схема строения растущего многолетнего бугра пучения на севере Аляски.



Таблица 1.2. Газы в ледяных жилах Центральной Якутии

Место отбора проб	Точка отбора	Глубина, см	Содержание метана, ppmv	Содержание углекислого газа, ppmv
Алдан	A-1	130	18,8	13103,0
	A-2	210	17,3	7785,4
	A-3	290	1,6	11128,7
	A-4	420	78,3	19312,2
	A-6		193,5	11650,1
	A-7		13,5	8615,8
Сырдах	S-1	200	12,6	23211,8
	S-2	700	12,9	0,0
Нелегер	Point 1-1	225	3118,1	401,0
		255	2681,4	246,8
		280	520,5	1336,8
		308	1232,6	461,0
	Point 1-2	192	1566,4	1416,4
		215	922,9	184,5
	Point 1-8	165	2134,5	373,3
		180	1608,6	453,3
		195	1172,9	791,3
		205	776,2	705,3
		220	933,7	472,8
		243	491,8	670,7
		266	711,7	595,0
		290	1371,3	394,4
	Point 2-7	182	36,5	197,0
	Point 2-11	175	28,6	397,8
		215	28,6	939,2
	Point 2-17	207	74,0	635,7

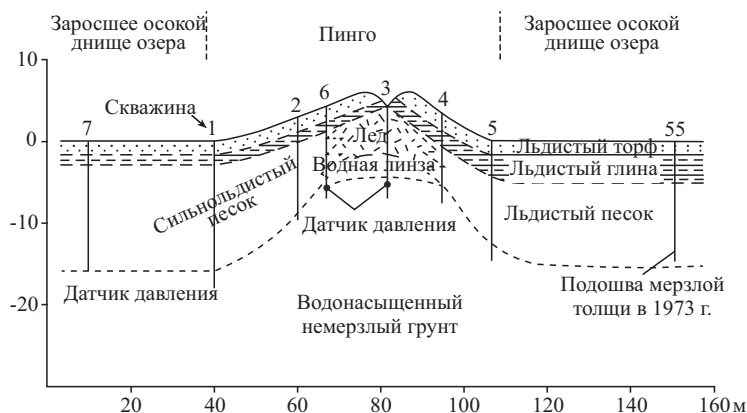


Рис. 1.16. Схема строения растущего пинго на севере Аляски [Maskay, 1979]

### 1.3.3. Газонасыщенные зоны тектонических структур (скопления газа в куполах)

Геофизические исследования арктического шельфа показали прямую пространственную связь местоположения газонасыщенных зон в том числе и в виде газогидратов с антиклинальными поднятиями в осадочном чехле. Сейсмоакустические исследования, проведённые 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 съёмки) и с зонами повышенной концентрации растворённых углеводородов [Захаренко и др., 2010].

Такая же закономерность распределения газонасыщенных мёрзлых пород прослеживается и в субазральных условиях. 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. 1.17) [Курасов, Ступакова, 2014].



**Рис. 1.17. Фрагмент карты «Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция» [Горная энциклопедия, 1986]**

Перераспределение газа во много связано с движением подземных вод. Приуроченные к газонасыщенным структурам пластовые воды имеют повышенную газонасыщенность (табл. 1.3). 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  $3 \text{ см}^3/\text{см}^3$  указывает на наличие в пластовых условиях свободной газовой фазы, что подтверждается получением фонтанов газа с водой [Беспалова, 1984].

**Таблица 1.3. Состав водорастворённых газов нефтегазовых месторождений севера Западной Сибири [Беспалова, 1984]**

Площадь	Число определений	Состав газа (в среднем), %					Газонасыщение, л/л
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
Берриас-валажинские 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
Тазовская	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
Пангодинская	12	77,96	10,25	6,49	0,33	0,88	2,23
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 углеводородных газов (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 всегда обнаруживается гораздо большее количество УВГ, особенно  $\text{CH}_4$ . При миграции УВГ вверх по восстанию пластов происходит их дифференциация, и этим можно объяснить большое содержание  $\text{CH}_4$  при очень малом количестве тяжёлых УВГ в приподнятых участках [Жижченко, 1984].

Перенос газов зачастую связан с подземными водами. Газы могут перераспределяться как в растворённом, так и в 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, окружённых глинистыми осадками. Даже небольшой наклон песчаных пластов приводит к накоплению свободных объёмов грунтовых вод в количестве большем, чем это можно предположить, исходя из значений мощности подстилающих глин [Энгельгардт, 1971]. В данном случае речь идёт об отжатии 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 [Бадю, 2018].

Первая стадия. Морские осадки образуются 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 оползневым 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 возникать 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 мёрзлая толща становится непроницаемой для потоков газа, поступающих снизу. Таким образом, формируется газонасыщенная криогенная толща, являющаяся частью газоносной структуры [Бадю, 2018].



### 1.3.4. Связь крупных массивов подземных льдов с газонасыщенными многолетнемёрзлыми породами

Промерзание слоя воды или водонасыщенного песка приводит к комплексу процессов, связанных с отжатию из зоны льдообразования (криогенная концентрация) растворённых газов и солей. При эпигенетическом промерзании эти условия являются наиболее благоприятными для формирования парагенетических комплексов массивных подземных льдов, горизонтов минерализованных вод (криопэгов) 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/см<sup>2</sup>. Реальные давления, возникающие в водоносном горизонте при промерзании, намного больше (табл. 1.4).

**Таблица 1.4. Обобщённые характеристики криопэгов в пределах Харасавэйского и Бованенковского ГКМ [Васильчук, Буданцева, 2006]**

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

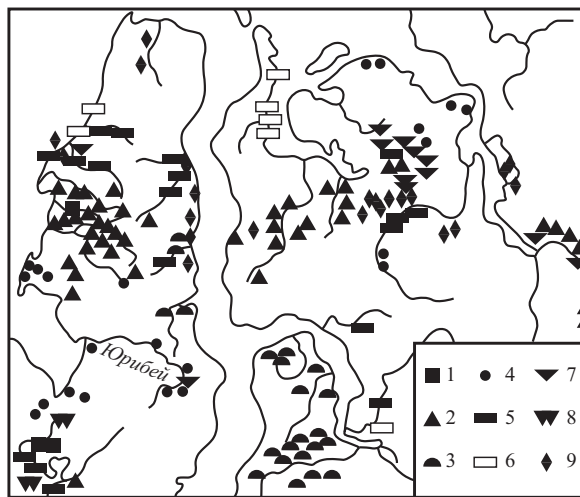
Между глинистой толщей и водоносным песчаным горизонтом формируется слой воды, промерзание которого образует пласт подземного льда. В голоценовых отложениях первой лагунно-морской террасы и современной лагунно-морской лайды Обской губы Ю.К. Васильчуком были обнаружены пластовые льды мощностью от 0,2 до 5,7 м, залегающие на глубине до 2 м. Изучение изотопного состава и палинологических остатков в пластовых льдах позволило сделать вывод о комплексе сегрегационных и инъекционно-сегрегационных процессов при их формировании [Васильчук и др., 2015]. Более полно формирование мощных внутригрунтовых пластовых льдов в морских отложениях рассмотрено нами в ранее опубликованных работах [Хименков, 1985; Хименков, Брушков, 2003; Хименков и др., 2018а]. Таким образом, на глубине (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 [Стрелецкая и др., 2017].

На севере Западной Сибири распределение пластовых залежей подземных льдов в целом совпадает с расположением тектонических структур (рис. 1.18). К этим структурам приурочены и зоны повышенного содержания водорастворённых газов в пластовых водах (см. табл. 1.3). Сопоставление средних содержаний метана в газовой компоненте вмещающих отложений и пластовых льдов указывает на более высокие их концентрации в последних (до 23 352 ppmv) (табл. 1.1, 1.5) [Васильев и др., 2015].

**Таблица 1.5. Концентрация метана (ppmv) в подземных льдах**  
[Васильев и др., 2015]

Генезис и возраст льда	ПЖЛ голоценовые, МИС 1 (10)*			ПЖЛ неоплейстоце- новые, МИС 2 (15)			ПЛ I типа (15)			ПЛ II типа (4)		
	Сред- нее	Макс.	Мин.	Сред- нее	Макс.	Мин.	Сред- нее	Макс.	Мин.	Сред- нее	Макс.	Мин.
Динамический метод (32)	95	227	17	680	4 461	26	6 197	17113	26	6117	23352	160
Метод «head space» (12)	96	346	3	105	357	3	10084	12292	7877	-	-	-

Примечание. \* В скобках количество образцов



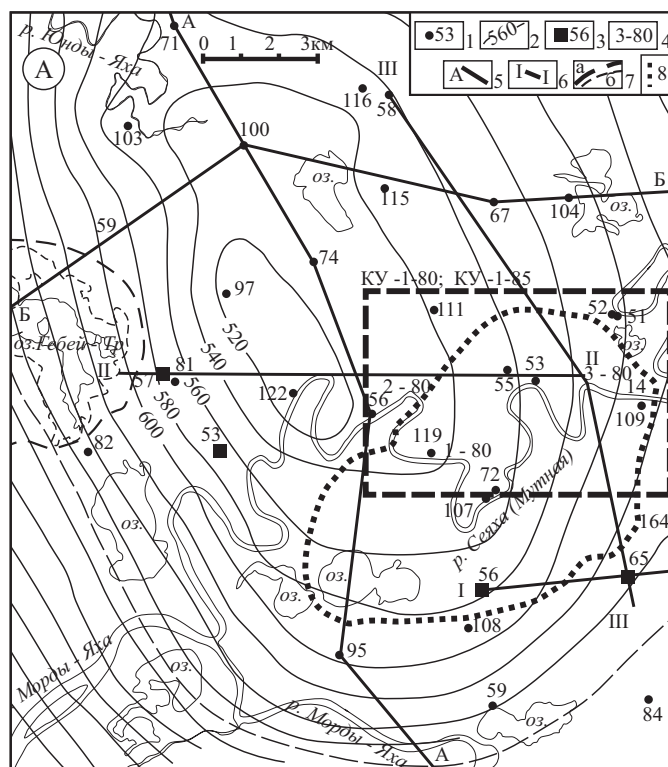
**Рис. 1.18. Распределение пластовых залежей подземного льда в северной части Западно-Сибирской плиты:**

1 — инъекционно-сегрегационные ПЗЛ в голоценовых и верхнеплейстоценовых 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 [Бадю и др., 1982]

### 1.3.5. Формирование крупных газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых породах на примере Бованенковского НГКМ

Процессы формирования крупных газонасыщенных геосистем в многолетнемёрзлых породах на территориях разных нефтегазовых месторождений имеют много общего, по-

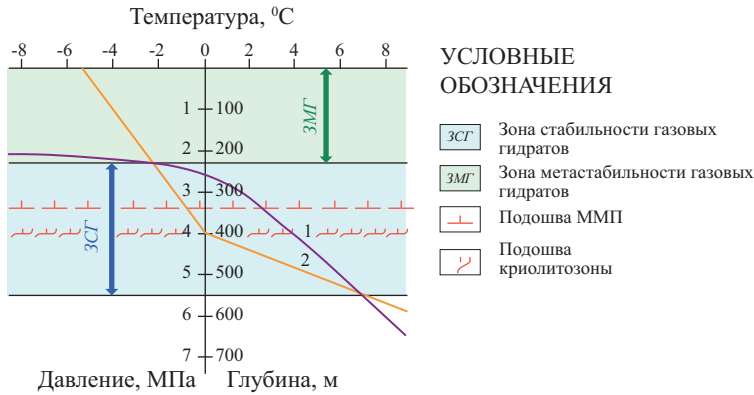
скольку обусловлены сходными природными факторами. Поэтому лучше всего рассмотреть их на примере одного из наиболее изученных и крупных — Бованенковского НГКМ. Данное месторождение находится в центральной части полуострова Ямал и приурочено к Бованенковскому локальному поднятию (рис. 1.19). Многолетнемёрзлые породы представлены преимущественно глинами с песчаными прослоями различной мощности. Для них 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 глубины 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. Дебиты газовых выбросов колеблются от 50 до 14 000 м<sup>3</sup>/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. м<sup>3</sup>, а площадь газовой залежи в 80 тыс. м<sup>2</sup> [Бондарев и др., 2008].



**Рис. 1.19. 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 ВСЕГИНГЕО; б — хасырей озера Тибейто; 8 — граница зоны области наибольших газопроявлений [Крицук, 2010]**

По содержанию газа на Бованенковском НГКМ выделяются два типа мёрзлых пород. В первом содержание газа незначительно и составляет  $0,005 \text{ см}^3/\text{г}$ . Степень заполнения порового пространства (удельная пористость этих пород, свободная ото льда и незамёрзшей воды) незначительно превышает газосодержание и составляет от 0,86 до 0,95%. Второй тип, приуроченный к горизонтам газопроявлений, отличается от первого. Отличительной особенностью данных пород является наличие каверн изометричной формы диаметром 5–8 мм и глубиной до 7 мм. Стенки каверн гладкие, сами каверны часто заполнены фирноподобным снегом. Газосодержание в грунтах в этих условиях достигает  $0,5 \text{ см}^3/\text{г}$ . Количество газа в них превышает свободную пористость на два-три порядка, что не может быть объяснено ни свободным, ни растворённым газом. Большую газонасыщенность мёрзлых пород второго типа и наличие в них каверн, заполненных фирноподобным снегом, можно объяснить только гидратной формой нахождения газа. Судя по прямым и косвенным признакам, а также исходя из представлений о равновесных условиях гидратообразования метана (рис. 1.20) большая часть внутримёрзлотного газа на Бованенковском ГКМ находится в газогидратной форме.



**Рис. 1.20. Выделение зоны стабильности газогидратов (ЗСГ) и зоны метастабильности газогидратов графо-аналитическим методом [Якушев и др., 2007]:**

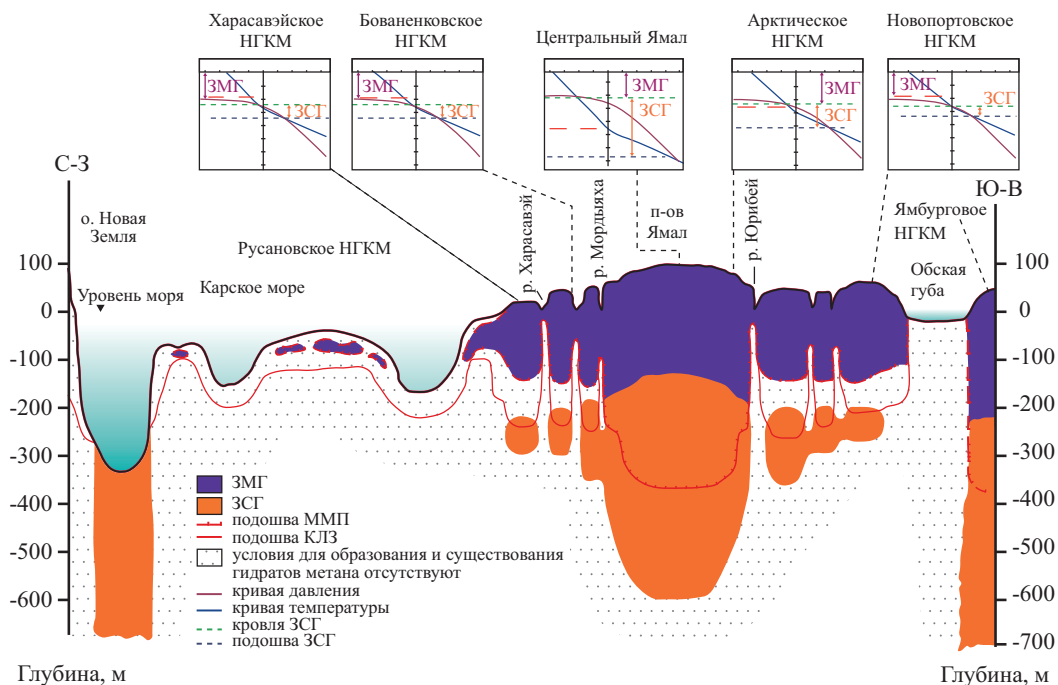
- 1 — кривая равновесных условий гидратообразования метана;**
- 2 — распределение температур по разрезу**

Вклад газа в растворённом или свободном виде в мёрзлых льдонасыщенных породах незначителен по сравнению с клатратной формой [Строение и свойства..., 2007]. Это наглядно проиллюстрировано на криогидратном профиле Ямальского региона в мёрзлых породах различных НГКМ (рис. 1.21) [Перлова и др., 2017]. На нём показано, что слой метастабильных газогидратов Бованенковского НГКМ распространяется на всю мощность мёрзлых пород.

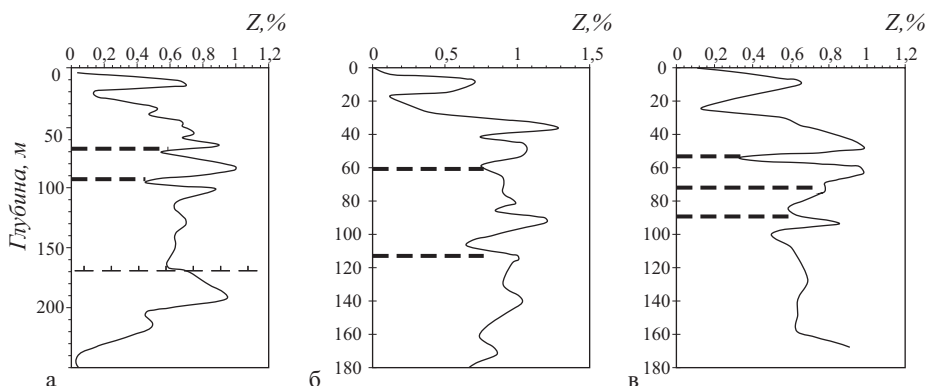
Более 85% газопроявлений в отложениях ямальской серии зафиксировано на глубине порядка 60–80 м. Этот горизонт выдержан на площади порядка  $120 \text{ км}^2$ . Наиболее масштабные газовые выбросы с дебитами до 10–15 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$  при средних значениях порядка  $800\text{--}1000 \text{ м}^3/\text{сут}$  характерны для гидратонасыщенных горизонтов. Ниже них наблюдается увеличение общей засоленности мёрзлых пород или водоносных минерализованных слоёв (криопёгов) (рис. 1.22). Повышение концентрации солей ниже опреснённых гидратона-



сыщенных интервалов — типичная ситуация для севера Западной Сибири, связанная с отжатием солей из зоны льдо- и гидратообразования при промерзании водонасыщенных отложений. При этом обратный процесс, диссоциации газогидратов, резко интенсифицируется в присутствии минерализованных растворов [Строение..., 2007]. Отдельные газопроявления зафиксированы непосредственно в пластовых льдах. При проходке ледяных тел фиксируется сильный запах газа [Криосфера..., 2013].



**Рис. 1.21. Региональный криогидратный профиль Ямального региона, направление С-З — Ю-В (Русановское, Харасавэйское, Бованенковское, Среднеямальское, Арктическое, Ямбургское месторождения)**



**Рис. 1.22. 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 [Перлова, 2001]**

В приведённых на рис. 1.22 скважинах наблюдались газопроявления, приуроченные к зонам пониженной, относительно соседних горизонтов, засоленности: 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) [Перлова, 2001].

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

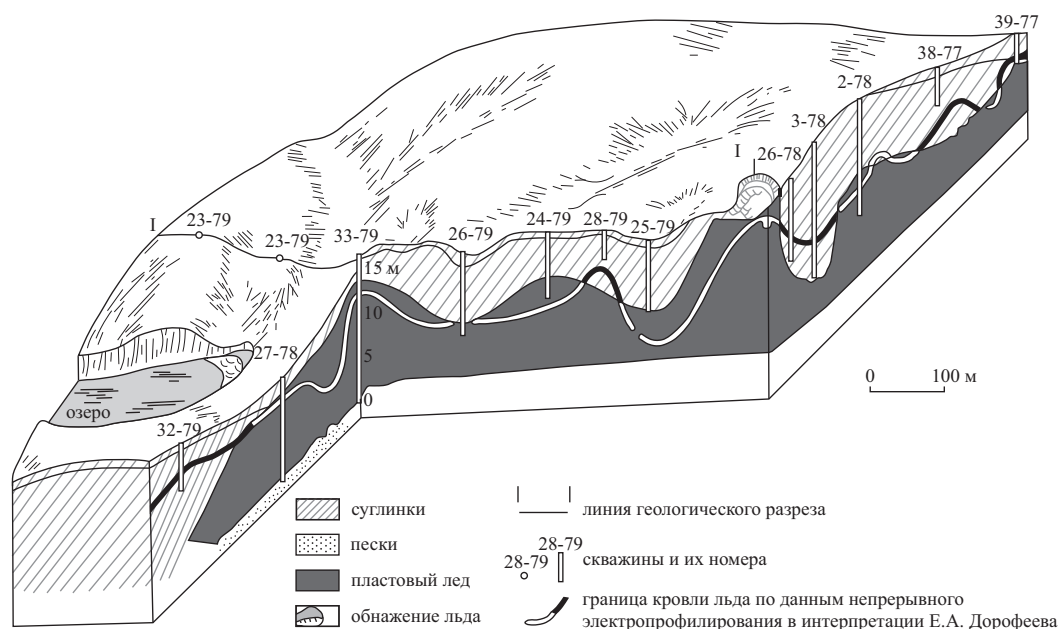
- сингенетические газы, установленные в интервале глубин 16–150 м, значение  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  –70 ‰ и ниже, характерное для газов биогенерации (встречаются пробы со значением  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  –59,2 ‰), что указывает на присутствие в их составе некоторой доли эпигенетических (миграционных) газов;
- сингенетические, с некоторым содержанием эпигенетических (термокаталитических) газов, свойственные водорастворённым газам (интервал 10–252 м), в которых значение  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  изменяется от –61,0 до –67,7 ‰;
- смешанные газы (сингенетические и эпигенетические), сорбированные осадочными породами, в которых содержание  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  изменяется в пределах –43,5...–76,4 ‰ (интервал мёрзлых пород 0–262 м и 202–350 м, палеоген-меловые отложения), что присуще газам биогенного происхождения [Бондарев и др., 2008].

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 является миграционной и привнесена из нижезалегающих горизонтов (палеоген-меловых отложений).

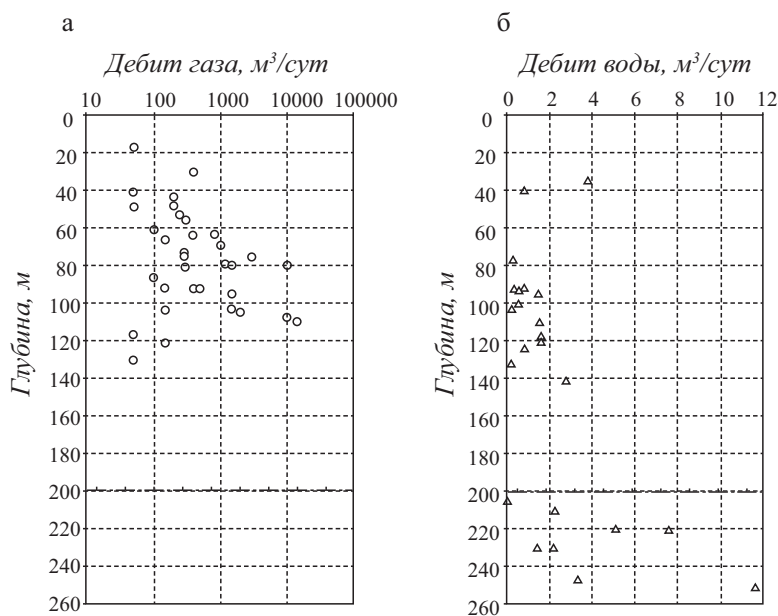
Характерной чертой строения многолетнемёрзлых пород Бованенковского НГКМ является наличие скопления мощных пластовых залежей подземных льдов. Пластовые льды в буровых профилях наиболее часто прослеживаются под останцами третьей и второй террас (с абсолютными отметками от 15–20 до 40 м), а также в пределах аллювиальной и озерно-аллювиальной пойм. Анализ данных по 3 тыс. скважин глубиной от 10 до 100 м, пробуренных в пределах территории Бованенковского НГКМ, показал наличие в 260 из них скоплений пластовых льдов. Перекрывающие пластовые льды отложения представлены преимущественно суглинками мощностью от 2 до 12 м. Подстилаются песками, супесями, реже суглинками [Васильчук, 2010]. 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 участке площадью около 4 км², приуроченном к вершине газового купола (рис. 1.23), 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 подсчётах, превысил 4 млн м³ [Пармузин, Суходольский, 1982].

При бурении скважин в многолетнемёрзлых породах на глубине 40–130 м были встречены многочисленные водопроявления (рис. 1.24). Минерализация криопэггов составляет 26–34 г/л [Перлова, 2001]. Криопэги часто подстилают пластовые залежи (рис. 1.25).

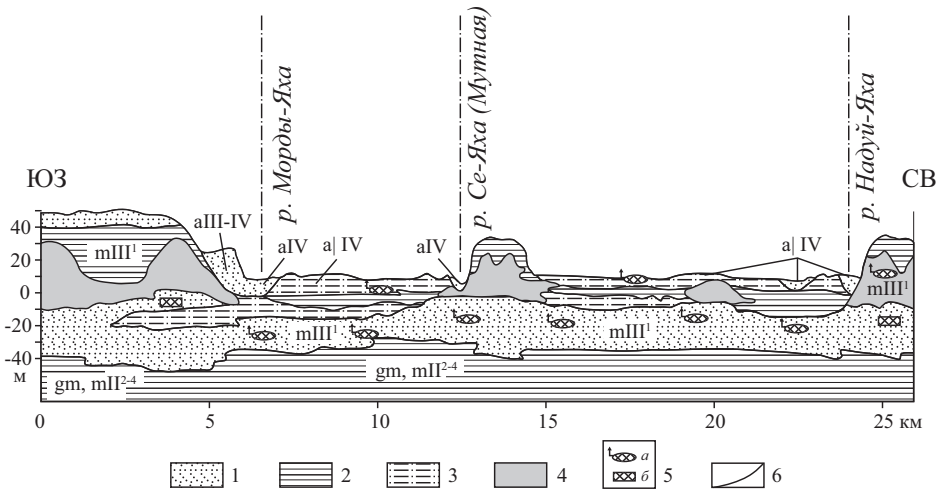
Рассмотрим условия, способствующие формированию газонасыщенной криогенной геосистемы Бованенковского НГКМ.



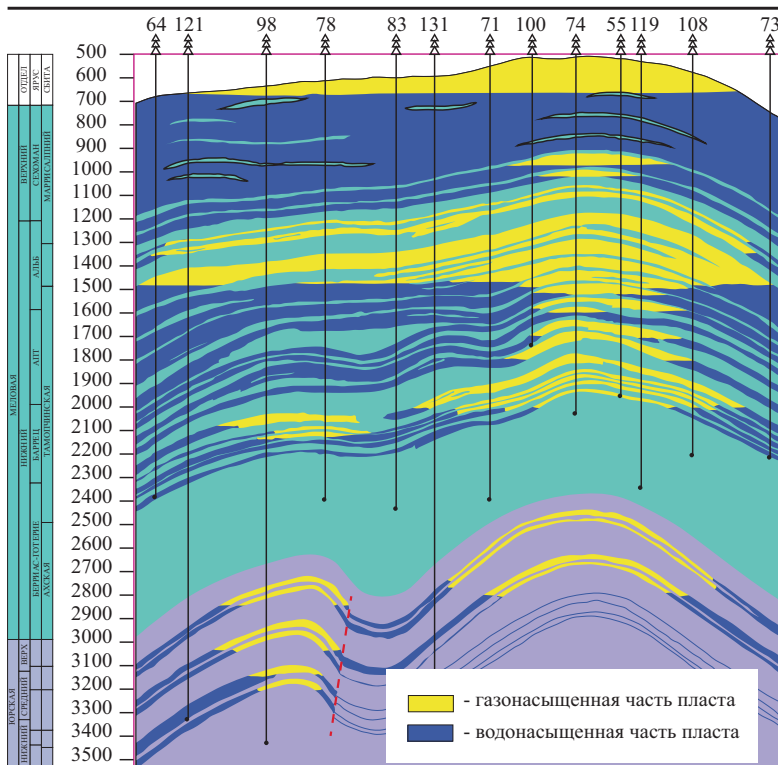
**Рис. 1.23. Блок-диаграмма останца третьей террасы на правом берегу реки Сеяхи [Пармузин, Суходольский, 1982]**



**Рис. 1.24. Распределение газообразных (а) и жидких (б) флюидов по глубине мёрзлой толщи [Перлова, 2001]**



**Рис. 1.25. Схематический разрез через Бованенковское месторождение:**  
 1 — пески; 2 — глины; 3 — переслаивание песков, суглинков и глин;  
 4 — пластовый лёд; 5 — линзы криопэггов (а — установленные,  
 б — предполагаемые); 6 — граница комплекса с пластовым льдом  
 [Стрелецкая, Лейбман, 2002]



**Рис. 1.26. Геологический разрез продуктивных толщ Бованенковского НГКМ (ВНИИГАЗ, 2003). Приводится по [Грива, 2005]**



По верхнему сеноманскому горизонту размеры месторождения составляют  $51 \times 20,5$  км [Скоробогатов и др., 2003], условно можно считать это площадью водосбора. Высота горизонта около 150 м, с глубины 520 до 670 м (рис. 1.26). Водоносный апт-сеноманский горизонт составляют аргиллитоподобные глины с частыми прослойками песчаников, алевролитов и уплотнённых 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/дм<sup>3</sup>. Для вод горизонта характерна высокая газонасыщенность — от 1000 до 2300 см/дм<sup>3</sup> (см. табл. 1.3). Преобладающим компонентом растворённых газов является метан (94–99%) биогенного происхождения. Верхняя часть разреза, куда подаётся 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 глубине 75–100 м (иногда с 60 м) залегает мореноподобный супесчаный слой (пористость 41%, коэффициент пористости 0,70) [Бондарев и др., 2008]. Ещё до промерзания, на этапе накопления осадков, воды из нижних горизонтов с растворёнными в них газами по трещинам поступают в морские отложения, а затем и в морские воды. По мере движения газонасыщенной жидкости вверх давление в ней будет снижаться. При снижении давления до значений, близких к давлению газовыделения, наблюдается резкое увеличение расхода насыщенной газом жидкости, фильтрующейся через пористую среду (эффект «сверхтекучести» фильтрующейся жидкости). При дальнейшем снижении давления расход газированной жидкости также резко уменьшается. При этом газовыделение также резко увеличивается [Шагапов, 1993]. Данный эффект может оказывать значительное воздействие на процессы формирования газонасыщенных субаквальных осадков. Интенсивное газовыделение будет сопровождаться понижением температуры до отрицательных значений и способствовать промораживанию водонасыщенных осадков. Последующее эпигенетическое промерзание приводит, во-первых, к криогенной концентрации грунтовых вод, газов и растворённых солей; во-вторых, формирует экран, препятствующий выходу воды и газов на поверхность. Возрастание напора грунтовых вод, приуроченных к песчаным горизонтам, приведёт к гидроразрыву по контакту мёрзлых и талых пород и выделению горизонта свободной воды. Его промерзание формирует пластовые льды и криопэги под ними. В результате наложения природных факторов: локальных тектонических движений, влияющих на особенности осадконакопления и движение газонасыщенных грунтовых вод; неравномерного эпигенетического промерзания, определяющего формирование пластовых льдов и криопэгов, — в толще многолетнемёрзлых пород формируется сложная криогенная геосистема, включающая парагенетический комплекс криогенных образований: высокольдистые мёрзлые отложения, пластовые залежи подземных льдов, криопэги, высокую газонасыщенность в виде многочисленных горизонтов газогидратов и газовых карманов. В целом криогенная геосистема газонасыщенных многолетнемёрзлых пород Бованенковского НГКМ в структурном отношении состоит из парагенеза более мелких криогенных подсистем, сформировавшихся в разное время и в различных природных обстановках.

#### 1.4. 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, сопровождающих разложение газовых гидратов, многообразны. Один и тот же процесс диссоциации газовых гидратов в различных природных условиях приведёт к различным результатам [Хименков, Станиловская, 2018].

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 подозёрный, 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.

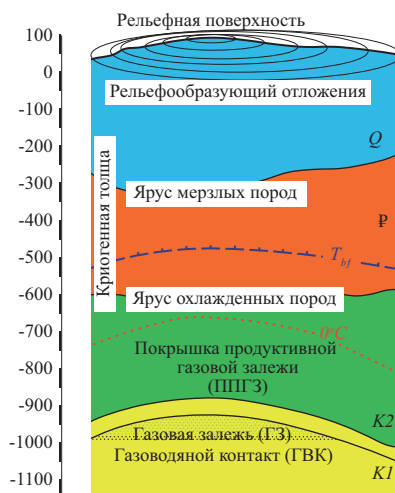
Рост давления при диссоциации газовых гидратов может увеличиваться быстро. После того как давление в полости превысит прочность кровли, происходит выброс, особенно если газогидратный слой залегает на небольшой глубине (20–30 м). При этом возможны различные варианты: от небольшого взрыва без образования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

#### 1.5. Геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород

В настоящее время газовая составляющая многолетнемёрзлых пород как структурный элемент мёрзлых пород практически не изучена. Есть лишь единичные работы, посвящённые данной теме. Прежде всего следует выделить работы Ю.Б. Баду, посвящённые изучению мёрзлых пород газоносных структур севера Западной Сибири. Им выделяется особая криолитологическая система — «криогенная толща в газоносной структуре» (рис. 1.27).

Криогенная толща определяется как многокомпонентная и многофазная криолитологическая система в виде составной части газоносной структуры (ГС). Она состоит из яруса мёрзлых пород и яруса охлаждённых пород. Подошва криогенной толщи отбивается по положению нулевой изотермы, а подошва мёрзлой — 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 уплотнённых 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, фациальную обстановку осадконакопления, вещественный состав мёрзлых пород, а также их распределение по разрезу, температуре, мощности, льдистости и газонасыщенности [Баду, 2016; Баду, 2018].

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. Однако формирование газонасыщенных зон мёрзлых пород, даже совпадающих со структурами газовых месторождений, осуществляется в особом режиме. Этот режим только частично связан с общими закономерностями развития ГС и во многом определяется спецификой криогенной истории, включая криогенную концентрацию газа, формирование газогидратов, криопэггов, пластовых льдов.



**Рис. 1.27. Элементы газоносной структуры и криогенной толщи [Баду, 2018]**

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, отличаются по свойствам от вмещающих пород. 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.

Согласно нашим представлениям, криогенная газонасыщенная геосистема является структурным элементом криогенной геосистемы [Хименков, 2013] и представляет собой локальную зону с повышенным относительно фоновых значений содержанием газа (в свободном виде или в виде газогидрата). Она имеет свои естественные границы, морфоло-

*гию, 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 немёрзлого 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 проходит три основные стадии развития: 1 — генерация газа; 2 — перераспределение или транзит; 3 — накопление. Этим стадиям в толще мёрзлых пород соответствуют определённые зоны: 1 — зона генерации газа; 2 — зона транзита; 3 — зона накопления; 4 — зона 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. Они составляют структурную основу газонасыщенной геосистемы. Эти зоны с помощью комплексных геологических и геофизических методов можно выделить. 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.

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 перераспределению газа из областей первичного накопления в смежные области, которое происходит под воздействием возникающего давления, обусловленного различными причинами (криогенная концентрация, перепад 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 возникновении 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 развиваться 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 газы находятся под повышенным давлением.

На четвертой стадии на контакте области накопления газовых флюидов и перекрывающих мёрзлых пород формируются пластические и разрывные деформации. В некоторых случаях они проявляются в виде бугров пучения. После того как давление преодолее прочность кровли, могут наблюдаться взрывные процессы с выбросами мёрзлой породы и формированием воронок газового выброса. В других случаях газ может фильтроваться по образовавшимся трещинам и просачиваться на поверхность, что наблюдается в осадках и водах некоторых озёр на севере Западной Сибири.



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

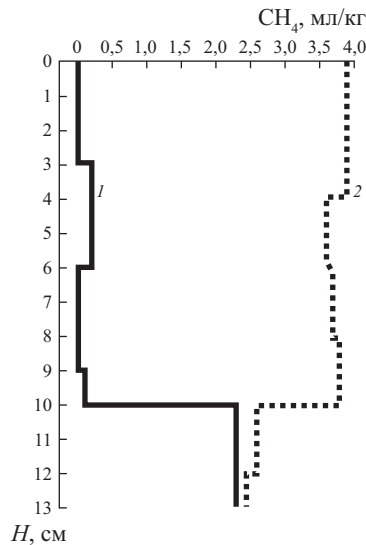
Следует разделять первичные и вторичные газонасыщенные геосистемы в многолетнемёрзлых породах. Формирование первой группы обусловлено различными природными факторами (эпигенетическим промерзанием, перераспределением растворённых газов водными потоками, поступлением с глубин по трещинам) и фиксацией в виде гидратосодержащих мёрзлых 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 выделения 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 возникают в тех случаях, когда формируется газонепроницаемый экран или существует приток газа извне. Для мёрзлых пород такие условия создаются при эпигенетическом промерзании осадков. Промерзание и создаёт 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:

- уровень 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 являются 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, возникающие при формировании сезонномёрзлого слоя, являются моделью процессов, происходящих 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. 1.28). В промёрзшем песке аллаиховской свиты в верхних трёх срезах метан содержался в концентрации 0–0,5 мл/кг, а в нижнем заметно больше — 2,3 мл/кг. Концентрация  $\text{CH}_4$  в суглинках в верхних 10 см составляла  $3,8 \pm 0,2$  мл/кг. Ниже, у основания контейнера, концентрация была заметно меньше —  $2,5 \pm 0,1$  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 — миграции метана вместе с поровым раствором при промерзании сверху и отжиму при промерзании снизу, со стороны мёрзлых синкриогенных отложений [Краев и др., 2013].



**Рис. 1.28. Распределение метана в песках (1) и суглинках (2) в результате промораживания одинаково и однородно насыщенных талых грунтов [Краев и др., 2013]**

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

С.Г. МIRONЮК 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 [МIRONЮК, Отто, 2014].

Выделяются следующие элементы геосистемы системы газонасыщенных морских осадки:

- газ (биогенный, термогенный и биогенно-термогенный). В осадках (породах) он находится в виде пузырьков, окружённых водой (кристаллами льда, соли), в растворённом (в поровом пространстве) или в свободном виде, а также в твёрдом 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 транзита): газовые «трубы» («столбы», «колонны»);
- газовые ловушки (зоны накопления газа), газогидратные толщи, газовые карманы, обширные скопления свободного газа в приповерхностных осадках под региональными флюидоупорами, в том числе под подводными реликтивными многолетнемёрзлыми породами, так называемые газовые фронты), домы (невысокие придонные купольные структуры), купола газового вспучивания, трещины растяжения;
- флюидопроводящие структуры (на донной поверхности): линейные (зоны тектонических разломов, трещины, борозды выпаживания айсбергов (плугмарки) [Андреев и др., 2006; Шахова, 2010; Лобковский и др., 2015; Миронюк, Отто, 2014].

Косвенно о формировании газонасыщенных зон в мёрзлых отложениях различных генетических типов могут свидетельствовать газопроявления, связанные с выбросами метана при бурении даже неглубоких инженерно-геологических скважин. Эти явления повсеместно встречаются в зоне распространения многолетнемёрзлых 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 мёрзлых пород, льда и газа.

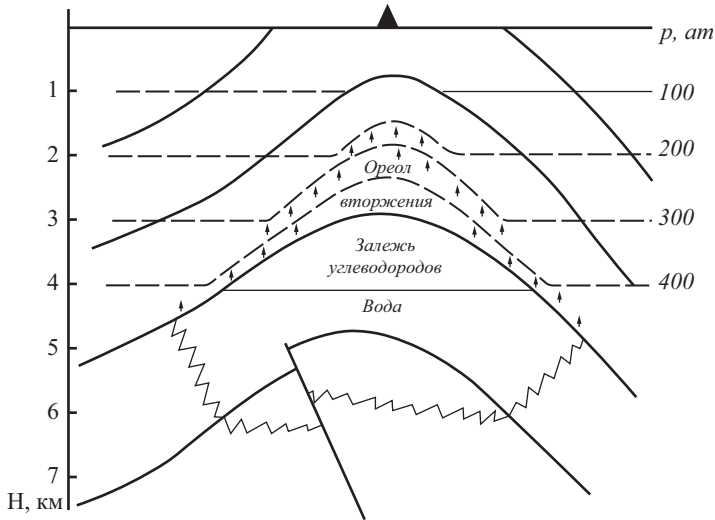
**Криогенные газонасыщенные геосистемы структурно-геологического типа** формируются при совместном взаимодействии нескольких факторов:

- тектонического, связанного с образованием локальных тектонических структур, обуславливающих движение газа к поверхности и накопление его 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 локальными тектоническими структурами, и общая направленность криогенного воздействия обуславливают 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 [Хименков, 2013]. Они имеют все признаки, позволяющие это делать: естественные границы, морфологию, определённое положение в пространстве, пространственно-временную упорядоченность структуры, внутренние связи, свойства.

Для понимания распределения газа в мёрзлых породах следует рассмотреть модель изменения по вертикали пластового давления внутри залежей газовых месторождений, предложенную К.А. Аникеевым [Аникеев, 1979]. Важнейшим элементом этой модели

является ореол вторжения, который возникает в результате интенсивного проникновения в глинистую покрывку высоконапорных флюидов из залежи. Вторгающиеся флюиды порождают в ореоле вторжения аномально высокие давления как в порах глин, так и в песчаных линзах, секущих трещинах и карманах, особенно мобильных в зонах проводящих разломов. Изобары сверхвысоких давлений в ореолах вторжения зависят от высоты залежи. В своде залежи избыточное давление максимально, а к периферии оно ослабевает (рис. 1.29).



**Рис. 1.29. Распределение повышенных поровых давлений в ореоле вторжения над углеводородной залежью [Аникеев, 1979]**

Таким образом, ещё до промерзания над тектоническими структурами, в которых формируются залежи углеводородов, наблюдается закономерное распределение газов. Высоконапорные мелкие скопления углеводородов распространены в глинистой толще покрывки лишь в пределах контура залежи. При удалении от свода аномальность пластового давления в этих скоплениях уменьшается, а за контуром залежи исчезают газопроявления и в покрывке [Дурмишьян, 1961]. При промерзании вследствие криогенной концентрации газов и формирования мерзлотного экрана данная зависимость, вероятно, будет выражена ещё сильнее. Геохимические исследования рассеянных углеводородных газов, проведённые на территории Бованенковского и Харасавэйского ГКМ, показали неравномерность их концентрации в верхних горизонтах многолетнемёрзлых пород. В скважинах глубиной до 3 м, расположенных в контуре месторождений, значения концентраций углеводородных газов значительно выше, чем за пределами контуров (табл. 1.6). При близких процентных содержаниях метана в контурах газоносных структур и за их пределами содержание данного газа непосредственно над месторождениями более чем в два раза превышает значения законтурной части. Данное распределение значений концентрации углеводородных газов отражает общие закономерности газонасыщенности мёрзлых пород в районах газовых месторождений.

Вторичные газонасыщенные геосистемы формируются при растеплении мёрзлых пород и диссоциации газогидратов в естественных условиях или в результате техноген-



ных 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 [Хименков, Станиловская, 2018]. Наиболее мощными естественными нагревателями являются поверхностные водоёмы. Под ними формируются двухслойные толщи. Непосредственно под озером мёрзлые породы оттаивают и развивается так называемый талик. Талик подстилает горизонт высокотемпературных мёрзлых пород, мощность которого часто превосходит оттаявший слой. Поскольку обводнённость северных территорий значительна, заозёрность на Ямале достигает 70% и более, роль поверхностных водоёмов в повышении 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.

**Таблица 1.6. Средние значения газохимических показателей поверхностных отложений Бованенковского и Харасавэйского ГКМ [Бондарев и др., 2005]**

УВГ	В контуре газоносности	За контуром газоносности
CH <sub>4</sub> (см <sup>3</sup> /кг)	338,18	141,84
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (см <sup>3</sup> /кг)	0,4225	0,2703
C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> (см <sup>3</sup> /кг)	0,23148	0,2471
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (см <sup>3</sup> /кг)	0,0671	0,0398
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (см <sup>3</sup> /кг)	0,0782	0,0719
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (см <sup>3</sup> /кг)	0,005	0,0003
CH <sub>4</sub> (в % от суммы УВГ)	98,72	98,63

## Выводы

Влияние газовой составляющей на свойства мёрзлых пород долгое время считалось незначительным. Резкое усиление хозяйственного освоения арктических территорий на фоне глобального потепления климата показало, 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 формируется в результате различных процессов (криогенная концентрация, поступление глубинного газа по трещинам и различным зонам тектонических деформаций).

Газонасыщенные зоны в мёрзлых породах являются самостоятельными геосистемами.

Криогенная газонасыщенная геосистема является структурным элементом криогенной геосистемы, представляет собой 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 немёрзлого 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 четыре основных элемента: 1 — зону генерации газа; 2 — зону транзита; 3 — зону накопления; 4 — зону пластических и разрывных деформаций, располагающуюся на контакте зоны накопления и вмещающих пород.

Выделяются пять 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. Геосистемы 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, связанные с разложением газогидратов в естественных условиях. Их формирование вызвано 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 мёрзлые породы.

Критериев выделения газонасыщенных мёрзлых пород пока не разработано. В качестве предварительного обсуждения можно предложить следующие:

- содержание газа в породах, превышающее фоновое;
- содержание газа в мёрзлых породах, которое существенным образом изменяет их физико-механические свойства.

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

## Библиография

1. Агалаков С.Е. Газовые гидраты в туронских отложениях на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1997. № 3. С. 16–21.
2. Андреев В.М., Туголесов Д.Д., Хренов С.Н. Грязевые вулканы и нефтегазопоявления российского сектора Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 2. С. 50–59.
3. Аникеев К.А. Прогноз сверхвысоких пластовых давлений и совершенствование глубокого бурения на нефть и газ. М.-Л.: Недра, 1971. 168 с.
4. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II, № 4. С. 42–50.
5. Баду Ю.Б. Криосистемный анализ криосферы // Материалы Пятой конференции гео-криологов России, МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2016. М.: Университетская книга, 2016. Т. 2. С. 266–270.
6. Баду Ю.Б. Криогенная толща газонасыщенных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. М.: Научный мир, 2018. 232 с.
7. Баду Ю.Б., Трофимов В.Т., Васильчук Ю.К. Основные закономерности
8. распространения и типы пластовых залежей подземного льда в северной части Западно-Сибирской плиты // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, 1982. С. 13–24.
9. Безродных Ю.П., Делия С.В., Лисин В.П. Применение сейсмоакустических и сейсмических методов для изучения газонасыщенных грунтов Северного Каспия // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2001. № 5. С. 476–480.
10. 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. науч. тр. Новосибирск: Наука, 1997. С. 193–199.
11. Беспалова С.Н. Оценка перспектив нефтегазонасыщенности неокимских отложений севера Западной Сибири по геохимическим показателям // Геология нефти и газа. 1984. № 12. С. 22–26.
12. Богоявленский В.И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 4–10.
13. Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Облеков Г.И. и др. Геохимические методы при обнаружении и локализации залежей углеводородных газов (УВГ) в надпродуктивных отложениях газоконденсатных месторождений полуострова Ямал // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 11. С. 17–22.
14. 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. 2008. № 5. С. 22–34.
15. Валяев Б.М. Углеводородная дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений // Геология нефти и газа. 1997. № 9. С. 30–37.
16. 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.
17. Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е. Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 5. С. 604–607.

18. Васильчук Ю.К. Пластовые ледяные залежи в пределах Бованенковского ГКМ (Центральный Ямал) // Инженерная геология. 2010. № 3. С. 50–67.
19. Васильчук Ю.К. Изотопные методы в географии. Часть 2: Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов. М.: Изд-во МГУ, 2014. Т. II. 244 с.
20. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Криопэги // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 1: Криосфера Харасавэйского газоконденсатного месторождения. Тюмень-СПб.: ООО ТюменьНИИГипрогаз — Недра, 2006. Т. 1. С. 230.
21. Гарагаш И.А. Моделирование геомеханических процессов при эксплуатации месторождений газа в многолетнемёрзлых и гидратосодержащих породах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2012. С. 1–25. [http://oilgasjournal.ru/vol\\_6/garagash.pdf](http://oilgasjournal.ru/vol_6/garagash.pdf)
22. Геологический словарь. М.: Недра, 1978.
23. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1986. Т. 2. 575 с.
24. Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений Ямала. Томск: Изд-во ТГУ, 2005. 352 с.
25. Дурмишьян А.Г. Значение аномально высоких пластовых давлений при поиске газовых и газоконденсатных залежей // Газовая промышленность. 1961. № 7. С. 1–3.
26. 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.
27. Жижченко В.П. Углеводородные газы. М.: Недра, 1984. 112 с.
28. Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В., Буханов Б.А., Станиловская Ю.В., Бадец К. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазоХимия. 2018. № 2. С. 33–42. <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2018-10206>.
29. Кошурников А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Гунар А.Ю., Пушкарёв П.Ю., Семилетов И.П. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Доклады Академии наук. М.: Наука, 2016. Т. 469, № 5. С. 616–620.
30. Краев Г.Н. Закономерности распространения метана в многолетнемёрзлых породах на северо-востоке России и прогноз поступления в атмосферу: автореф. дис. ... к. г. н. М.: ЦЭПЛ РАН, 2010. 20 с.
31. Краев Г.Н., Шульце Э.Д., Ривкина Е.М. Криогенез как фактор распределения метана в горизонтах мёрзлых пород // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451, № 6. С. 684–687.
32. Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мёрзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 173–184.
33. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 2: Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. М.: ООО «Газпром Экспо», 2013. 424 с.
34. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010. 352 с.
35. 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.
36. Курчиков А.Р. Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности. М.: Недра, 1992. 231 с.
37. Курчиков А.Р. Гидрогеотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 11–12. С. 1846–1853.

38. 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 многолетнемёрзлых пород на шельфе моря Лаптевых // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 2. С. 312–320.
39. 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 многолетнемёрзлых пород // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. 1989. № 2. С. 118–128.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. Перлова Е.В. Особенности газосодержания многолетнемёрзлых пород на примере северо-западной части п-ва Ямал: автореф. дис. ... к. г.-м. н.
44. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2001. 26 с.
45. Перлова Е.В., Микляева Е.С., Леонов С.А., Ткачева Е.В., Ухова Ю.А. Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона // *Вести газовой науки*. 2017. № 3 (31). С. 255–262.
46. Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В. Криолитология. М.: Изд-во МГУ, 1985. 239 с.
47. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов на шельфе восточно-арктических морей как потенциальная причина метановой катастрофы: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 446, № 1. С. 1132–1137.
48. Скоробогатов В.А., Строганов Л.В., Копеев В.Д. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. М.: ООО Недра-Бизнес-центр, 2003. 352 с.
49. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов. 2000.
50. 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.
51. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // *Криосфера Земли*. 2002. Т. VI, № 3. С. 15–24.
52. Стрелецкая И.Д., Ванштейн Б.Г., Васильев А.А., Облогов Г.Е. Содержание и генезис метана в мёрзлых отложениях и подземных льдах на побережье и шельфе Карского моря // *Актуальные проблемы нефти и газа (научное сетевое издание)*. М.: Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина; Институт проблем нефти и газа РАН, 2018. Т. 4. С. 1–5.
53. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М.: ГЕОС, 2007. 137 с.



54. Хименков А.Н. Формирование криогенного строения морских отложений: автореф. дис. ... к. г.-м. н. М.: ПНИИИС Госстроя СССР, 1985. 24 с.
55. Хименков А.Н., Брушков А.В. Океанический криолитогенез. М.: Наука, 2003. 335 с.
56. Хименков А.Н. Геосистемный подход в геокриологии // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 2. С. 74–82.
57. 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.
58. Хименков А.Н., Власов А.Н., Сергеев Д.О., Волков-Богородский Д.Б., Станиловская Ю.В. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Часть 1: 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](http://e-notabene.ru/arctic/article_26319.html).
59. Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Часть 2: Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы // Арктика и Антарктика. 2018б. № 2. С. 48–70. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.2.26377.
60. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Гагарин В.Е., Соболев П.А. О фильтрации газов в многолетнемерзлых 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.
61. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А. Лабораторное моделирование фильтрации газа в многолетнемерзлых породах // Арктика и Антарктика. 2019б. № 4. С. 52–73.
62. Чабан П.Д. О газовых гидратах в вечномёрзлых россыпях // Колыма. 1991. № 6. С. 18–19.
63. 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 звуко-рассеивающих объектов водной толщи в российском секторе Баренцева моря // Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата: сб. тезисов Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2014. С. 101–102.
64. Шагапов В.Ш. О фильтрации газированной жидкости // ПМТФ. 1993. № 5. С. 97–106.
65. Шахова Н.Е. Метан в морях Восточной Арктики: автореф. дис. ... д. г.-м. н. М.: ИО РАН, 2010. 44 с.
66. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
67. Энгельгардт В. Поровые водяные растворы и катагенез пород // Диагенез и катагенез осадочных образований. М.: Мир, 1971. С. 443–459.
68. Якушев В.С., Перлова Е.В., Истомин В.А. и др. Ресурсы и перспективы освоения нетрадиционных источников газа в России. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. 152 с.
69. Якушев В.С. Формирование скоплений природного газа и газовых гидратов в криолитозоне: автореф. дис. ... д. г.-м. н. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. 47 с.
70. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
71. Якушев В.С. Генетические типы углеводородных газов в многолетнемерзлых толщах // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 3. С. 71–76.

72. Якушев В.С. Влияние литологии криолитозоны на устойчивость реликтовых газогидратов в Арктике: Труды ИПНГ РАН (Москва). 2017. Вып. 2 (1). С. 172–173.
73. Buldovich S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Supplementary Materials for Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal peninsula (Russia) // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.
74. Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas and possible gas hydrate in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal peninsula West Siberia // *Polarforschung*. 2000. Vol. 68. No. 1–3. P. 215–219.
75. Collett T.S., Ginsburg G.D. Gas hydrates in the Messoyakha gas field of the West Siberian Basin — a re-examination of the geologic evidence // *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 1998. V. 8. P. 22–29.
76. Collett T.S., Dallimore S.R., 2002, Integrated Well Log and Reflection Seismic Analysis of Gas Hydrate Accumulations on Richards Island in the Mackenzie Delta, N.W.T., Canada, CSEG Recorder October, 2002. P. 28–40.
77. Fukuda M. 1999. Occurrence of Ice-complex (Edoma) in Lena River Delta Region and Big Lhyavosky Island, High Arctic Eastern Siberia. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1995. Institute of Lower Temperature Science, Sapporo, Japan, pp. 5–27.
78. 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).
79. 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). P. 67.
80. 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 isotopegeochemical 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.
81. 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.
82. Mackay J.R. Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula Area Northwest Territories // *Georg. Phis. Quart.* 1979. Vol. 33, No 1. P. 3–61.
83. Makogon Y.F., Omelchenko R.Y. Commercial gas production from Messoyakha deposit in hydrate conditions // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2013, vol. 11, pp. 1–6.
84. Moridis G.J. et al., 2004b. Numerical studies of gas production from several CH<sub>4</sub> hydrate zones at the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 43: 219–238.
85. 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.
86. Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia // *Cold Regions Science and Technology*, 2000, vol. 31, pp. 189–197.

## ГЛАВА 2.

# ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ МЁРЗЛЫЕ ПОРОДЫ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

### Введение

Особенности литогенеза в арктических морях определяет широкое распространение в их осадках мёрзлых газонасыщенных пород. Это обусловлено многими причинами. Здесь формирование субаквальных осадков с самого начала происходит при отрицательных температурах. Это накладывает определённое влияние на процессы диагенеза. На фоне активной жизнедеятельности микроорганизмов, продуцирующих биогенный газ, могут наблюдаться процессы льдообразования за счёт замерзания распреснённых поровых вод, выделившихся при диагенезе осадков. На участках с глубинами менее 100 м происходят процессы разрушения мёрзлых пород, сформировавшихся в период около 15 тысяч лет назад при понижении уровня моря. При этом активно начинают протекать процессы диссоциации газогидратов, сопровождающиеся выделением огромного количества углеводородных газов, прежде всего метана. По разломам к поверхности поступают глубинные газы. На арктическом шельфе обнаружено большое количество газосодержащих тектонических структур. Большое разнообразие источников газа и сложность геологических условий обуславливают многообразие форм газонакопления и движения газовых потоков в осадочных толщах арктических морей.

### 2.1. Мёрзлые породы на шельфе арктических морей

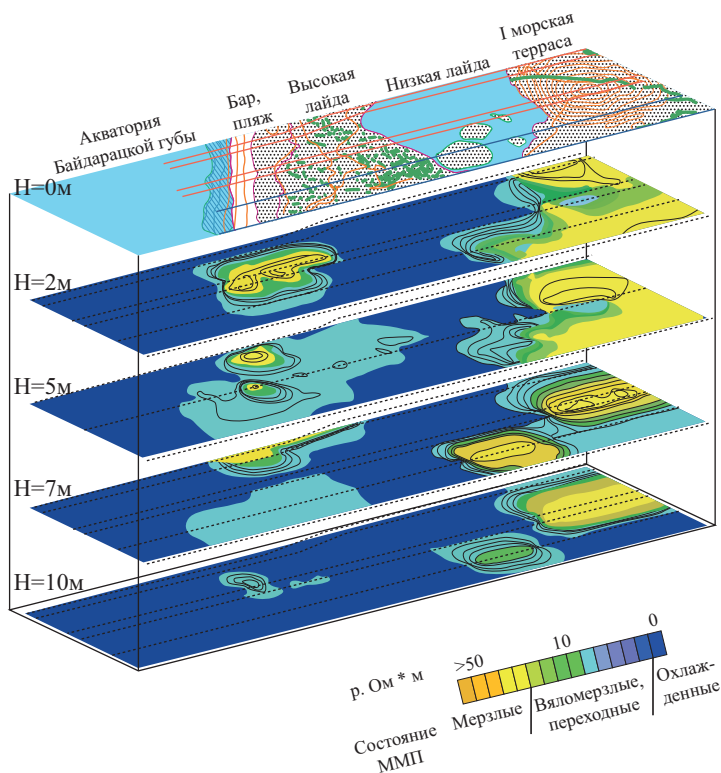
История исследований шельфа Северного Ледовитого океана насчитывает уже более 200 лет. Особенно интенсивно они проводились в XX веке, что связано с началом активного хозяйственного освоения его акватории. Исследования субаквальной криолитозоны связаны с именами известных российских и зарубежных учёных: И.Я. Баранова, Н.Ф. Григорьева, Н.Н. Романовского, Ф.Э. Арэ, И.Д. Данилова и Л.А. Жигарева, Я.В. Неизвестнова, J.A. Hanter, J. Mackay, P.V. Sellman, E.J. Chamberlain, B.A. Соловьёва, В.П. Мельникова, В.И. Спесивцева, С.И. Рокоса. И.Я. Баранов считал вполне очевидным факт распространения мёрзлых пород до изобаты 20 м [Баранов, 1960]. Развивая взгляды И.Я. Баранова и Н.Ф. Григорьева, В.А. Кудрявцев и Н.Н. Романовский предлагают выделять на арктическом шельфе три типа криолитозоны: 1) с отрицательно-температурными породами, поровые воды которых в той или иной степени минерализованы; 2) с ММП, образовавшимися в континентальных условиях и погруженными затем под уровень моря (аркто-континентально-океанический тип криолитозоны, по И.Я. Баранову); 3) с ММП, сформировавшимися в прибрежно-морских условиях (шельфовый тип мёрзлых пород, по Н.Ф. Григорьеву). Близкой позиции по поводу распространения ММП в арктических морях придерживается Ф.Э. Арэ [Арэ, 1976]. По его мнению, ММП могут существовать в той части шельфа, которая осушалась в недавнем геологическом прошлом, т. е. распространены довольно широко, так, по приводимым им литературным ссылкам величина осушения шельфа могла достигать отметки 100 м. Другой точки зрения придерживается Л.С. Говоруха [Говоруха, 1968]. Он считает, что распространение ММП в арктических морях ограничено и встречаются они лишь в узкой прибрежной полосе. На составленной П.И. Мельниковым в 1966 г. Геокриологиче-

ской карте Якутской АССР масштаба 1:5 000 000 распространение ММП показано также только в прибрежной полосе. Но ширина этой полосы на прибрежных мелководьях значительна — от 10 до 70 км. И.Д. Данилов и Л.А. Жигарев [Данилов, Жигарев, 1977] считали, что сплошные вдольбереговые ММП (современные и реликтовые) распространены во всех арктических морях, за исключением южной части Баренцева моря, но полосой различной ширины. Они окаймляют аккумулятивные и абразионные берега у континентальной и островной суши. В юго-восточной части Баренцева и в Печорском море их распространение ограничено полосой в первые десятки метров, в Карском море — от сотен метров до первых километров, в море Лаптевых, в районе Шелонских островов и о. Макара — до 35 км, в западной части Восточно-Сибирского моря к востоку от о. Бол. Ляховский — до 30 км, в районе Хромской, Омуляхской и Гусиной губ — 40 км, в восточной части Восточно-Сибирского и Чукотского морей — от десятков до первых сотен метров. Близких изложенным И.Д. Даниловым и Л.А. Жигаревым взглядов придерживаются Я.В. Неизвестнов [Неизвестнов, 1981] и В.А. Соловьёв [Соловьёв, 1983]. Они также выделяют зоны: сплошных вдольбереговых ММП, реликтовых островных ММП с криопэгами, отрицательнотемпературных пород с криопэгами. В.А. Соловьёв назвал эту зону «мёрзлой–талой» с криопэгами. Я.В. Неизвестновым показано распространение сплошных вдольбереговых ММП от западного побережья п-ва Ямал в Карском море до устья реки Амгуэмы в Чукотском море, островных реликтовых ММП с криопэгами — полосой от Новой Земли до архипелага Северная Земля в Карском море, к востоку от п-ва Таймыр в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском, примерно по изобате 50 м. В.А. Соловьёв [Соловьёв, 1981] показал распространение сплошных вдольбереговых ММП от Хатангской губы в море Лаптевых до устья реки Амгуэмы в Чукотском море, а островных реликтовых ММП с криопэгами на пространствах Хай-Пудырской и Байдарацкой губ, в Обь-Енисейском районе; широкой зоной у западного и северного Таймыра, у берегов Якутии в море Лаптевых и особенно в Восточно-Сибирском море вплоть до Чаунской губы (73–77° с.ш.). По данным В.П. Мельникова и В.И. Спесивцева [Мельников, Спесивцев, 1995], в Печорском море на Варандейском месторождении при глубине моря 15,5 м кровля ММП вскрыта на глубине 63,2 м, но вся мерзлота на глубине 109,5 м не была пройдена. На месторождении Приразломное при глубине моря 21 м в скв. 384 на глубине 23,5–25,7 м наблюдалось переслаивание мёрзлого песка и суглинка с массивной криотекстурой. На других горизонтах этой скважины мёрзлых пород не обнаружено. Также не были вскрыты мёрзлые породы на других участках отмеченных месторождений. В Карском море мёрзлые породы выявлены под слоем воды от несколько метров до 50–100 м и более в следующих районах: а) в полосе перехода газопровода Ямал — Центр через Байдарацкую губу; на морской части Харасавэйского газоконденсатного месторождения; в) на площади Русановского газоконденсатного месторождения; г) вдоль западного берега полуострова Ямал; д) в районе пос. Амдерма. В полосе перехода газопровода мёрзлые грунты мощностью 15 м и более вскрыты семью скважинами на глубине 13–30 м от дна при толщине слоя воды 13–16 м в 9,5–20,5 км от ямальского берега. Они классифицируются как льдистые, сильнольдистые и ледогрунты. Их температура по разрезу изменяется от –1,0 до –2,0 °С, в мёрзлых грунтах присутствуют слои массивного льда толщиной до 7,5 м. Фактические наблюдения далеко не всегда дают представление об истинной мощности реликтовых мёрзлых массивов. Предварительные данные показывают, что в большинстве случаев мощность мёрзлых толщ в Карском море не менее 5–20 м

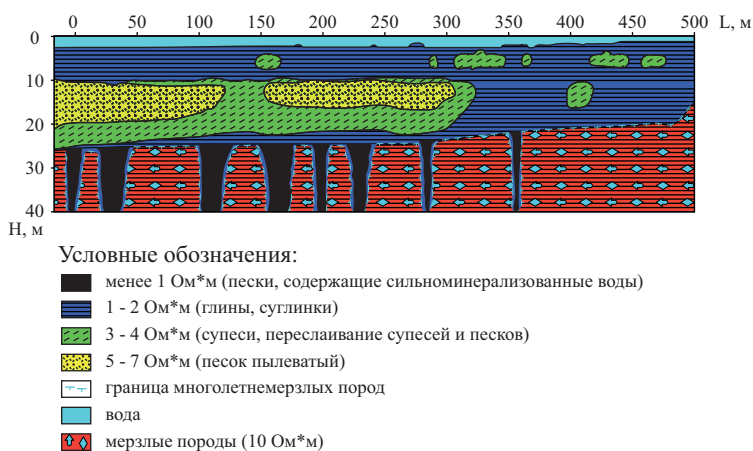
[Природные условия..., 1997]. В бухте Кожевникова (море Лаптевых) в 3 км от берега на глубине 4,4 м отмечены мёрзлые породы, прослеженные до глубины 66 м [Пономарёв, 1940]. В заливе Креста на Чукотке мёрзлые породы присутствуют близи изобаты 12 м. Исследования Е.Н. Молочушкина [Молочушкин, 1973] в море Лаптевых указывают на широкое развитие здесь мёрзлых пород, поверх которых накапливается слой голоценовых нелитифицированных осадков с отрицательной температурой. В целом на арктическом шельфе России реликтовые мёрзлые породы наблюдаются от о. Колгуев в Баренцевом море на западе до мыса Челюскина на востоке [Соловьёв, 1983]. На Североамериканском шельфе бурением и сейсморазведкой также доказано широкое развитие реликтовой мерзлоты. Мёрзлые породы на дне моря глубиной 4 м и на расстоянии нескольких сотен метров от берега описаны в районе мыса Барроу на Аляске [Breuer, 1958]. Льдистые толщи здесь перекрыты почти 30-метровой толщей охлаждённых осадков, не содержащих льда. По данным Маккея [Maskau, 1974], в районе мыса Барроу при глубине моря 17 м под слоем несцементированных алевроитовых глин мощностью 6 м встречена толща глинистого алевроита мощностью 9 м, которая содержала отдельные гнёзда льда, ниже залегают глины без льда. В прибрежной части моря Бофорта сплошные мёрзлые породы прослеживались на расстоянии до 20 км при глубине моря до 20 м [Sellman, Chamberlain, 1980]. Различными коммерческими компаниями совместно с геологической службой Канады были пробурены глубокие скважины на значительных глубинах моря Бофорта. Одна скважина была пробурена на площади Тингмарк в 67 км севернее п-ва Туктойактук (глубина моря 30 м) до глубины 60 м от дна, которой были встречены сцементированные льдом песчаные отложения на глубине от 34 до 43 м (от дна), а температура на забое скважин в алевроитовых глинах составляла  $-1,6^{\circ}\text{C}$  [Hanter et al., 1976]. На Баренцево-Карском шельфе вечная мерзлота встречена во многих местах в Карском море, при глубине моря до 150 м — в районе Байдарацкой губы, на Русановской и Ленинградской площадях. Кровля мёрзлых пород залегает на глубине от 8 м — в Карском море. Вблизи пролива Карские Ворота при глубине моря около 50–70 м встречена современная мёрзлая льдистая толща. По данным С.И. Рокоса и др. [Рокос и др., 2009], мёрзлые породы на шельфе Карского моря развиты в основном при глубине моря 15–25 м. Кровля многолетних льдистых отложений залегает в интервале 8–20 м ниже поверхности дна в Карском море. Наблюдаемая в скважинах мощность составляет, как правило, 20–40 м. Кровля мёрзлой толщи выражена достаточно резко. Подошва нечёткая и связана с постепенным уменьшением льдистости вниз по разрезу. В последние годы значительную роль в выявлении мёрзлых пород на шельфе играют геофизические исследования. На шельфе Печорского, Карского, Чукотского морей, моря Лаптевых с помощью геофизических исследований зафиксирован высокоомный слой (рис. 2.1, 2.2). Данные бурения позволяют утверждать, что высокоомный слой соответствует горизонту многолетнемёрзлых пород. Интересно, что данный слой пронизан многочисленными вертикально ориентированными каналами с низким электрическим сопротивлением (см. рис. 2.2). Возможно, отмеченные геофизическими методами каналы соответствуют локальным скоплениям газа в толще морских осадков.

Приведённые материалы отражают разнообразие взглядов различных авторов по вопросу распространения ММП под дном арктических морей в пределах открытых акваторий. Можно констатировать, что при разбросе мнений по частным вопросам в целом допускается возможность распространения мёрзлых толщ под дном арктических морей до изобаты 100 м.





**Рис. 2.1. Особенности строения криолитозоны в районе Байдарацкой губы (схема А.В. Кошурникова)**



Геоэлектрический разрез по данным ЧЗ+ЗСБ профиль 9

**Рис. 2.2. Результаты геофизических исследований на Уральском берегу перехода газопроводом Бованенково — Ухта через Байдарацкую губу. Материалы А.В. Кошурникова**

## 2.2. Распределение газа на различных стадиях океанического криолитогенеза

Область распространения отрицательнотемпературных осадочных толщ морского генезиса (субаквальные и субаэральные толщи) должна рассматриваться как единая, закономерно построенная природная система. Её существование обусловлено устойчивым и долговременным взаимодействием океанической области осадконакопления и океанического полярного климата [Хименков, 1985; Хименков, Брушков, 2003]. Данную природную систему в целом мы определяем как область океанического криолитогенеза. Она включает в себя осадки морского генезиса с отрицательной температурой, приуроченные к бассейну Северного Ледовитого океана. Данная природная геосистема формируется в субаквальных условиях, но в результате многократных колебаний уровня моря часть морских толщ оказалась в субаэральном состоянии, где и сформировала обширные прибрежные равнины. Несмотря на разнообразие условий залегания, строения и вещественного состава, морские осадки образуют единый массив, обладающий рядом общих свойств, и прежде всего высокой засоленностью, особенностями субаквального литогенеза, закономерностями фациальных переходов, влиянием отрицательных температур, обуславливающих возможность льдовыделения на всех этапах диагенетического преобразования осадков. При изменении палеогеографических условий отдельные части данной системы могут попадать в субаэральные условия, промерзать, частично оттаивать, вновь переходить в субаквальное состояние. Выделяемая природная система непрерывно существует как минимум в течение всего плейстоцена. В зависимости от палеогеографических условий меняются соотношения и пространственное расположение отдельных частей системы, но общие закономерности её существования остаются неизменными. Выделенные этапы отражают основную сущность развития океанического криолитогенеза и проявляются как на локальном (например, в пределах одной тектонической структуры), так и на глобальном (общее изменение уровня Мирового океана) уровнях. Особенность формирования криогенных геосистем в морских осадках связана с переходом от глубоководных условий седиментогенеза к мелководным, а затем к субаэральным. При этом развитие мёрзлых пород определяется не только климатическими факторами, но и процессами, обусловленными особенностями седиментогенеза в арктических морях. Эволюция данной системы во времени определяется трансгрессивно-регрессивными циклами. Каждый цикл определяется закономерной сменой обстановок осадконакопления и криолитогенеза. В соответствии с общепринятыми представлениями о циклическом развитии области морского осадконакопления можно выделить несколько стадий развития океанического криолитогенеза [Хименков, Брушков, 2003].

1. Стадия первичного океанического криолитогенеза. На данной стадии происходит первичное накопление морских осадков. При этом процессы седиментогенеза и криогенеза протекают одновременно. Формирующиеся криогенные толщи представляют собой неконсолидированные, отрицательнотемпературные и содержащие лёд осадки, в которых протекают диагенетические процессы и наблюдается активная жизнедеятельность, присущая биоценозам данных осадков. Мощность слоя субаквальных осадков, где активно может протекать первичный субаквальный океанический криолитогенез, составляет около нескольких десятков метров.

2. Регрессивная стадия. Здесь на первичный океанический криолитогенез накладывается континентальный криолитогенез и начинается формирование многолетнемёрзлых пород (эпигенетическое и сингенетическое) морского генезиса. При этом образуются спе-

цифические криогенные толщи, отражающие пограничное состояние развития природной системы. Характерной чертой является чередование монолитных, сцементированных льдом массивов и отрицательнотемпературных водоносных горизонтов.

3. Субаэральная стадия океанического криолитогенеза, связанная с особенностями нахождения мёрзлых морских толщ в условиях континентального криолитогенеза вне воздействия моря. Завершается формирование монолитных мёрзлых толщ. На фоне направленной регрессии (или тектонических движений) образуются серии морских террас, широко развитых в районах, прилегающих к Северному Ледовитому океану.

4. Стадия перекрытия многолетнемёрзлых пород морскими водами с отрицательной температурой (трансгрессивная стадия), связанная с вторичным переходом мёрзлых морских толщ в субаквальное состояние. При этом развивается совокупность термоденудационных процессов, обусловленных перестройкой параметров мёрзлых толщ, переходящих в субаквальные условия. Реликтовые монолитные, сцементированные льдом осадки, имеющие площадное распространение вблизи побережий и локальное на некотором удалении от них, встречаются в основном до глубин в несколько десятков метров. Поверх них формируются осадки, соответствующие стадиям первичного океанического криолитогенеза.

Накоплению осадочных толщ в арктических бассейнах и их преобразованию процессами диагенеза соответствует этап первичного океанического криолитогенеза [Хименков, Брушков, 2003]. Наиболее существенной характеристикой данного этапа является то, что он осуществляется в узком температурном диапазоне — от 0 до  $-1,8^{\circ}\text{C}$ . Данный температурный режим устойчиво поддерживается за счёт саморегуляции на протяжении сотен тысяч, а может, и миллионов лет. Под первичным океаническим криолитогенезом мы понимаем совокупность криогенных процессов, развивающихся одновременно с накоплением морских осадков и их диагенетическим преобразованием на глубине моря, превышающих мощность припайных льдов. В полярных бассейнах криогенные процессы проявляются с самого начала формирования осадков и протекают на последующих стадиях их диагенетических преобразований. Формирующиеся в арктических морях отложения характеризуют рыхлость и пластичность сложения, большая обводнённость, обогащённость микроорганизмами и неуравновешенность физико-химической системы в целом. Уже на стадии первичного океанического криолитогенеза формирование многолетнемёрзлых морских пород обусловлено перераспределением водных, газовых и литогенных флюидов, рассеянных в случае выделения и отжатия диагенетических вод или локализованных в случае миграции газовых и водных потоков, а также потоков осадков при подводных оползнях. В порах субаквальных осадков газ содержится в свободном (в виде пузырей), адсорбированном, защемлённом и растворённом 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 [Миرونюк, Отто, 2014]. Концентрация газов в грунтах зависит от региональных и локальных условий участка морского дна. Значимым содержанием углеводородных газов в грунте принято считать концентрации 0,1 мл/л и выше [Hovland et al., 2002]. Высоким содержанием метана (от 0,1 до 285 мл/кг) отличаются современные четвертичные глубоководные осадки Чёрного 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 под-

водного продолжения дельты реки Лены [Разуваева и др., 2007]. 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 [Портнов и др., 2011].

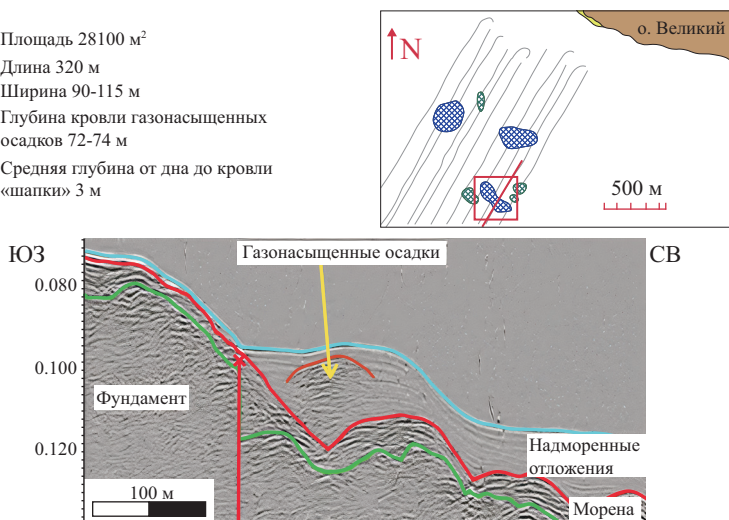
Рассеянные биогенные газы, выделяясь в придонную воду, формируют только региональный фон углеводородных газов в воде, а при подтоке газа из недр, в том числе из нефтегазовых залежей, формируются аномальные поля. По данным А.И. Обжирова, содержание углеводородных газов в воде и донных отложениях является 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 её залегания (1700 м) [Обжиров, 1993]. 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 создаёт аномалии в придонной воде. Аномальные концентрации углеводородных газов в придонных слоях возникают только в том случае, когда существует залежь, которая создаёт трещиноватые зоны в перекрывающих её породах и подток углеводородов из залежи с высоким давлением газа. м. В этих районах содержание метана может превышать фоновое на порядки и достигает значений 1100–12 500 нл/л. В районе выхода газа на глубине в керне донных илистых осадков были обнаружены пустоты, включения газогидратов [Обжиров и др., 2018]. 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, поступление 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 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 (рис. 2.3).

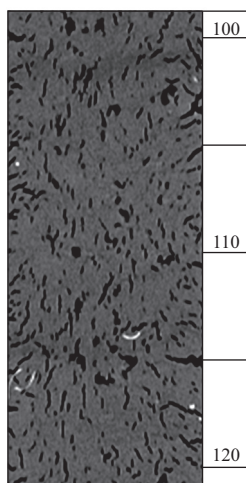
Особенностью строения текстуры газонасыщенных осадков являются многочисленные газовые включения в виде трещинок и пузырьков. Данные компьютерной томографии кернов показали наличие в толще осадка многочисленных полых трещин субвертикальной ориентировки, обусловленных дегазацией осадка (рис. 2.4). Осадок не структурирован, 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.

### Изучаемая газовая «шапка»

- Площадь 28100 м<sup>2</sup>
- Длина 320 м
- Ширина 90-115 м
- Глубина кровли газонасыщенных осадков 72-74 м
- Средняя глубина от дна до кровли «шапки» 3 м



**Рис. 2.3. Строение газовой «шапки» по данным сейсморазведки в Ругозёрской губе Кандалакшского залива Белого моря [Токарев, Соловьёв, 2014]**



**Рис. 2.4. Фрагмент рентгеноплоскостного среза. Серое — осадок, чёрное — трещины, обусловленные дегазацией осадка (глубина 100–120 см) [Токарев и др., 2019]**

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 снижением 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 тяжёлых 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) [Токарев и др., 2019].

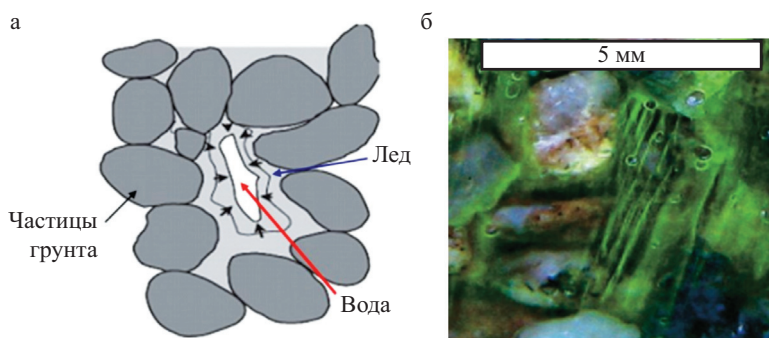
Важнейшим процессом, регулирующим все геохимические процессы при диагенезе глинистых осадков, является дегидратация. Дегидратация глинистых осадков начинается с момента их отложения и заключается в высвобождении (миграции) сначала свободной, а затем и физически связанной воды при переходе её в свободную. Таким образом, совокупность процессов диагенеза приводит к выделению в осадочной толще локальных очагов свободной опреснённой воды, в которой начинают формироваться отдельные кристаллы льда. На фоне отрицательных температур это будет приводить к формированию льда в толще морских осадков без какого-либо внешнего источника охлаждения. Следует особо отметить невозможность консолидации субаквальных морских илов за счёт промерзания выделившихся при диагенезе опреснённых поровых вод. Это связано со следующими причинами. Не формируется чётко выраженный фронт промерзания. При незначительных температурных градиентах в субаквальных толщах и минерализации порового раствора центры льдообразования будут рассеяны в толще осадков. Кристаллизация приведёт к увеличению минерализации у растущей поверхности льда (поскольку лёд всегда более пресный, чем исходный раствор), что вызовет остановку дальнейшего роста кристаллов. При структурировании илов соли из поровых растворов переходят в минеральные частицы, за счёт чего и опресняется выделившаяся вода, но при этом засоленность минеральных частиц увеличивается. Поскольку минимальная температура придонных вод не может быть ниже  $-1,8^{\circ}\text{C}$ , а часто бывает и выше, то она не обеспечит промерзание глинистых илов и они останутся неконсолидированными.

При промерзании засоленных осадков формируются структуры, в которых незамёрзшая вода скапливается в центре порового пространства, формируя каналы в структуре замёрзшего грунта (рис. 2.5, *а*). Система каналов незамёрзшей воды создаёт своеобразную транспортную сеть (рис. 2.5, *б*), обеспечивающую движение восходящего потока газа в образовавшемся массиве мёрзлых пород [Шахова, Семилетов, 2014].

Породы, соответствующие первичному океаническому криолитогенезу, выделяются как криодиагенетические [Хименков, Брушков, 2003]. Они представляют собой отрицательнотемпературные, неконсолидированные субаквальные осадки, содержащие лёд, в которых не прерываются диагенетические преобразования, жизнедеятельность присущих им биоценозов, миграция поровых вод, минералообразование. Их отличие от «традиционных мёрзлых пород» заключается в том, что все они не связаны с фактором «промерзания», определяемым внешним источником охлаждения, т. е. непосредственным теплообменом с атмосферой. Льдообразование в толще субаквальных осадков происходит за счёт внутренних причин, обусловленных особенностями развития области морского субаквального полярного седиментогенеза и диагенеза и ограничено ими [Хименков, 2002].

Потенциально криодиагенетические толщи могут формироваться во всех субаквальных осадках с отрицательной температурой, как на шельфе, так и на континентальном склоне. Для формирования монолитных массивов сцементированных льдом мёрзлых морских осадков требуется наложение каких-либо иных процессов в толще самих осадков или более низкие температуры, достижение которых связано с воздействием внешнего источника охлаждения (контакт с атмосферой). К первым можно отнести такие процессы,

как: субаквальные склоновые процессы (оползни, сплывы и др.), при которых происходит тиксотропное разжижение илов и выделение пресной воды. При её замерзании формируются ледяные тела со следами деформаций [Попов, 1983; Данилов, 1978]; поступление континентальных пресных вод по водоносным горизонтам в толщу отрицательнотемпературных морских осадков; захоронение морскими осадками нижних частей айсбергов; формирование газогидратов на глубинах, обеспечивающих их термодинамическую стабильность; понижение температуры морских осадков за счёт дроссельного эффекта Джоуля-Томпсона при миграции газов с больших глубин. В сводовых частях залежей углеводородных газов наблюдается увеличенная плотность дилатансионных трещин, являющихся потенциальными каналами вертикальной миграции газов из глубоких горизонтов. В Западной Сибири над газовыми залежами располагаются участки повышенной мощности многолетнемёрзлых пород, что обусловлено их дегазацией и дополнительным охлаждением [Мельников, Спесивцев, 1995].



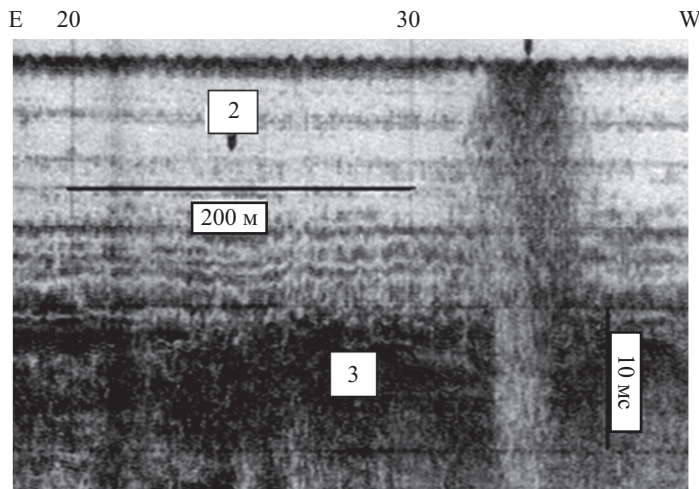
**Рис. 2.5. Модель формирования канальцев незамерзшей воды в структуре мерзлого грунта (а) и внешний вид канальцев, сделанный в ходе экспериментов (б), (из Arenson and Sego, 2006) [Шахова, Семилетов, 2014]**

Формирование сплошного мёрзлого слоя происходит на второй и третьей стадиях океанического криолитогенеза, с момента смерзания припайного льда с грунтом. На первичный океанический криолитогенез начинает воздействовать интенсивное зимнее охлаждение, и начинается формирование многолетнемёрзлых пород (эпигенетических и сингенетических) морского генезиса. 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  $0^{\circ}\text{C}$  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 с последующим промерзанием сверху под мёрзлыми глинистыми толщами с малой фильтрационной способностью грунтовые воды с содержащимися в них растворёнными газами оказываются запечатанными. Последующее промерзание образует массивы подземных льдов и выделившихся при льдообразовании газов. Формирование газонасыщенных прибрежно-морских осадков аналогично развитию газонасыщенных

мёрзлых пород при эпигенетическом промерзании в континентальных условиях, рассмотренных в главе 1. Промерзание лагунных отложений с большим количеством органики сопровождается интенсивным перераспределением внутригрунтовых вод и содержащихся в них газов. В толще лагунных отложений при промерзании возникают локальные зоны накопления углеводородных газов, соединённые между собой каналами незамёрзшей минерализованной воды (криопэгмами), обильно встречающимися в мёрзлых лагунных осадках. Промерзание обводнённых насыщенных органикой осадков приводит не только к образованию газовых карманов, но и к повышению давления в них, что, в свою очередь, может приводить к переходу части газа в клатратное состояние [Васильчук и др., 2015].

По мнению ряда исследователей, после перемещения в подводное состояние (4-я стадия океанического криолитогенеза) температура многолетнемёрзлых пород повышается, оставаясь в основном в пределах отрицательных значений. Стабильность газовых газогидратов, широко распространённых в морских породах, при переходе в субаквальное состояние нарушается раньше, чем начинается таяние мерзлоты, в результате этого формируется газовый фронт, стремящийся к восходящему движению [Шахова и др., 2009].

В пределах мелководных областей Печорского и Карского морей газонасыщение новейших отложений произошло, вероятно, в результате деградации многолетнемёрзлых пород под воздействием трансгрессии современного морского бассейна. Предполагается, что насыщение осадков газом произошло в результате таяния в морских условиях реликтовой верхне-неоплейстоценовой мёрзлой толщи. Повышение температуры до положительных значений вызвало резкую активизацию процессов разложения погребённого органического вещества, которое было «законсервировано» мерзлотой. В результате произошло выделение биогенного газа, который распределился по осадочному разрезу в зависимости от проницаемости и пористости слагающих его отложений (рис. 2.6) [Бондарев и др., 1999; Богдарев и др., 2002; Рокос и др., 2001].



**Рис. 2.6. Локальные скопления газа в толще современных аллювиально-морских осадков на сонограмме гидролокации бокового обзора:**  
**1 — выход газа на поверхность дна; 2 — современные прибрежно-морские осадки; 3 — доголоценовые газонасыщенные породы [Рокос, Тарасов, 2007]**

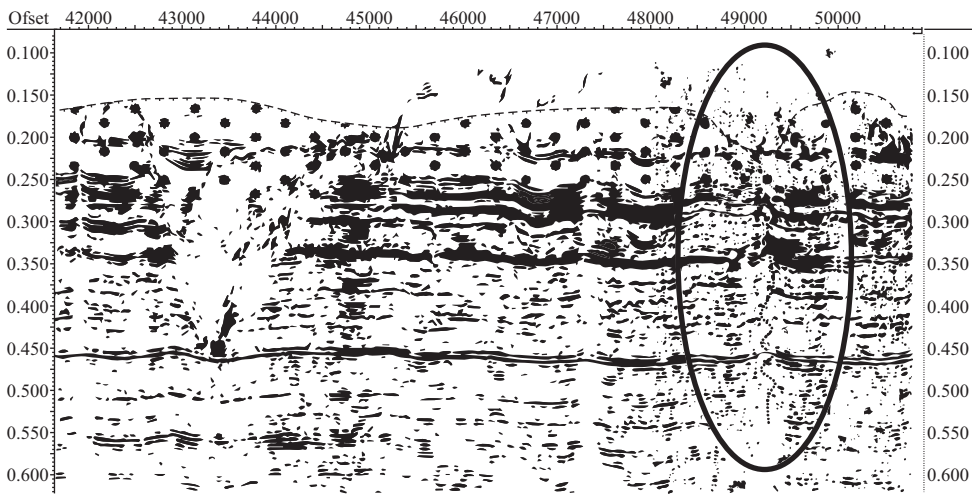
Прорывы свободного газа из нижележащих песков нередко наблюдаются в зонах резкого перегиба слоёв и особенно в сводах антиклинальных складок. На мелководных участках шельфа (глубине менее 60 м) выброс метана из разрушающихся газогидратов может иметь характер мощной пузырьковой эмиссии в форме факелов (рис. 2.7) [Шахова и др., 2009].



**Рис. 2.7. Метановый факел, зарегистрированный с помощью эхолота в центральной части моря Лаптевых в сентябре 2007 г. [Шахова и др., 2009]**

При бурении инженерно-геологических скважин в пределах мелководных районов наблюдаются выбросы газовой смеси. Наиболее мощные и интенсивные выбросы наблюдались при бурении инженерно-геологических скважин в толще многолетнемёрзлых пород [Рокос, 2009]. В толщах субаквальных пород отмечается большое количество субвертикально ориентированных зон нарушения сейсмической записи, прослеживающихся практически на всю глубину исследований. Эти узкие субвертикальные зоны интерпретируются как зоны трещиноватости пород, представляющие собой каналы вертикальной миграции газа и жидкого флюида к поверхности из глубоких, возможно продуктивных, горизонтов. Необходимо отметить, что в случае прохождения данной зоны через проницаемые породы происходит их насыщение (горизонтальная миграция флюида в проницаемые породы). Расширение газа, происходящее по мере его подъёма в верхние горизонты осадочного чехла, проходит с поглощением тепла, вызывая дополнительное охлаждение окружающих пород. Это охлаждение при благоприятных условиях может приводить к переходу талых грунтов в мёрзлое или пластичномёрзлое состояние. С другой стороны, к зонам разрывных нарушений приурочен повышенный тепловой поток. Разогретые флюиды, мигрируя из нижних частей разреза, могут повышать температуру вмещающих пород. Какой из данных факторов играет ключевую роль — остаётся неясным.

По результатам сейсмических исследований, проведённых «МГУ-геофизика», в областях обнаружены узкие зоны вертикальной миграции газа из нижележащих слоёв (рис. 2.8) (отмечено синим овалом). Здесь на сейсмических профилях на геоэлектрических разрезах в местах выходов газов наблюдается заглупление кровли высокоомного слоя, соответствующего слою многолетнемёрзлых пород.



**Рис. 2.8. Сопоставление геоэлектрического и сейсмического разрезов по профилю 83 (по данным А.В. Кошурникова)**

### **2.3. Формирование крупных скоплений газонасыщенных льдистых мёрзлых пород в субаквальных условиях**

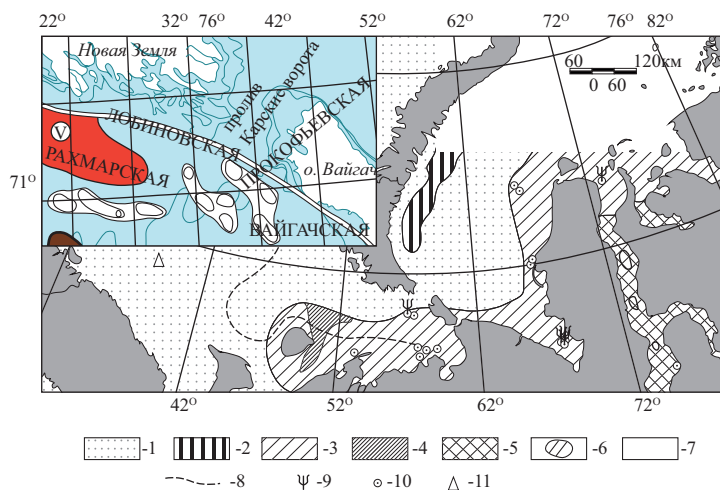
На шельфе арктических морей обнаружены значительные скопления газонасыщенных пород в сочетании с мощными массивами подземных льдов. Наиболее мощные массивы льдов, газонасыщенных мёрзлых пород и интенсивные выбросы газа встречаются на объекте «Диапиры» (восточная часть Печорского моря, около 60–70 км к юго-западу от пролива Карские Ворота), расположенном в пределах газоносной структуры (рис. 2.9).

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 (см. рис. 1.27). На сводах этих поднятий при глубине менее 0,5 м ниже дна бурением были вскрыты мёрзлые льдистые грунты. Одной из скважин, пробуренной 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 объёмная льдистость грунтов достигает 80–95% и более (ледогрунт). Начиная с глубины 30 м ниже поверхности дна, объёмное содержание льда не превышает 30% и постепенно уменьшается вниз по разрезу. Наиболее глубокая из пробуренных здесь скважин вскрыла 100-метровую монотонную мёрзлую толщу, предположительно микулинских морских глин и суглинков.

На временных разрезах, полученных с помощью электроискрового источника (спаркера) в диапазоне частот от 300 до 1000 Гц и высокочастотного (2500 Гц) профилографа, осадочный разрез расчленяется на две толщи. Верхняя имеет акустически прозрачную слоистую структуру (рис. 2.10). Мощность слоистой толщи изменяется от 1–5 до 30–50 м и более. Нижняя толща характеризуется неслоистой и практически непроницаемой акустической структурой. На полученных временных разрезах локальные поднятия поверхности морского дна представляют собой диапироподобные структуры, прорывающие и де-



формирующие покровы вышележащих акустически слоистых осадков. Осадки, не содержащие свободного газа и не испытавшие промерзания, отображаются как акустически слоистые образования и включаются в состав верхней толщи. Отложения, находящиеся в мёрзлом состоянии и (или) насыщенные свободным газом, на временных разрезах показаны как акустически непроницаемые неслоистые образования и включаются в состав нижней толщи. По материалам гидролокации бокового обзора и эхолотирования в пределах изученной площади было выявлено более 50 диапироподобных поднятий [Бондарев и др., 2002].

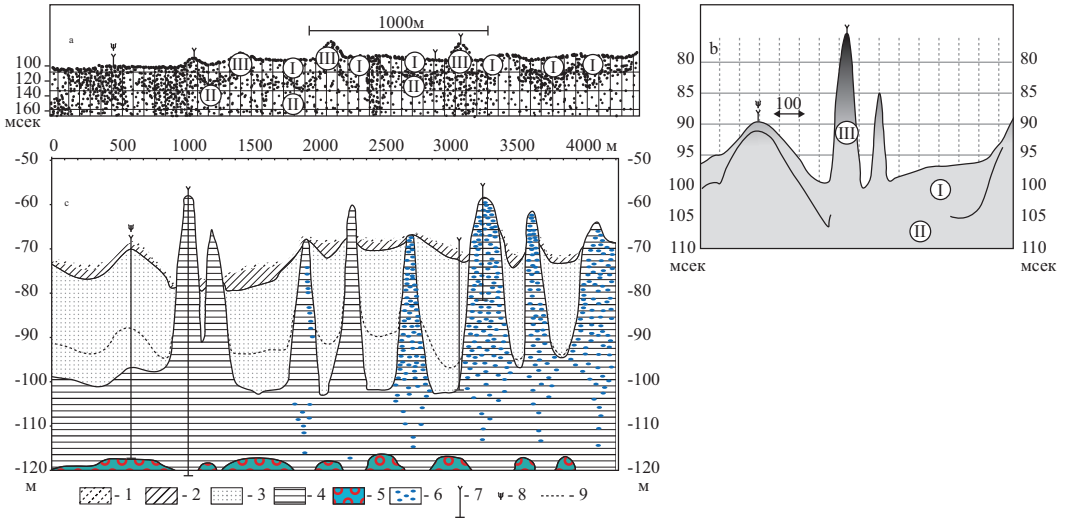


**Рис. 2.9. Газонасыщенные осадки Баренцево-Карского шельфа [Рокос, 2008] (с добавлением фрагмента карто-схемы нефтегазоносных структур [Григоренко и др., 2011]):**

- 1** — глубина 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 мёрзлые грунты;
- 11** — точки скважин, в которых отмечены нефтепроявления

Скважина, пробуренная на участке между диапироподобными поднятиями вскрыла кровлю многолетнемёрзлых пород, представленных микулинскими глинами, на глубине 20,2 м ниже поверхности дна. В процессе дальнейшего бурения с глубины около 49,5 м ниже поверхности дна произошёл мощный выброс газовой смеси. Высота фонтана достигала более 10 м. Вокруг судна образовался «котёл кипения» диаметром около 150–200 м, внутри которого наблюдалось бурление воды с пузырьками газа и взвешенными грунтовыми частицами [Рокос, 2009]. 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 многолетнемёрзлых микулинских глин. Мёрзлые глины обладают высокой прочностью, соответственно внутри мёрзлой толщи или под её покровом могут создаваться относительно высокие давления. Видимо, газ, скапливаю-

щийся в сводах антиклинальных изгибов подошвы каргинско-средневалдайской толщи, находится под значительным давлением. Когда это давление достигает некоторого критического значения, вероятно, сопоставимого с сопротивлением недренированному сдвигу осадков данной толщи (около 5–30 КПа), происходит деформация.



**Рис. 2.10. Временные разрезы, полученные на объекте «Диапиры»**

**и их интерпретация по данным бурения:**

**а** — временной 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 многолетнемёрзлых пород [Рокос, 2008]

Вопрос о генезисе диапировых структур на дне моря, содержащих пресные массивные льды и ледогрунты в сочетании с газоводяными выбросами остаётся нерешённым. Диапироподобные образования, представленные высокочальдистыми породами, подстилаются тальными осадками, насыщенными газом с аномально высоким давлением. Высокое давление приводит к деформации осадочной толщи скоплением газа с аномально высоким пластовым давлением, содержащимся в песчаных линзах. При снижении внешнего горного давления в результате колебаний уровня моря, сейсмических сотрясений, волнения, абразионного среза и т.п. газ, защемлённый в локальных коллекторах, расширяется, а его давление на вмещающий флюидоупор в виде мёрзлых глин увеличивается. При достижении давлением критического значения, вероятно, сопоставимого с сопротивлением недренированному сдвигу осадков данной толщи (около 5–30 КПа), происходит деформация.

Деформации, связанные с давлением газа, могут также развиваться по схеме ползучести. Данная схема реализуется даже при относительно низком (меньше критического) давлении в течение достаточно длительного времени. Деформации в осадочной толще приводят к выжиманию 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. Прежде всего текстурный сегрегационный лёд, обладающий относительно высокой пластичностью. В результате этих процессов и формируются поднятия с ледогрунтовыми сводами [Бондарев и др., 2002, Рокос, 2009].

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:

- деформации осадочной толщи под давлением поступающих снизу газоводяных флюидов;
- формирования подводных гидролакколитов 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 выжимания 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;
- возникновения аномально высоких пластовых давлений за счёт диссоциации газогидратов [Мельников, Спесивцев, 1995; Рокос, 2009].

Кстати, последнее объясняет совместное нахождение пресной воды и большого количества свободного газа. Объект «Диапиры» располагается в зоне субаквального распространения газогидратов криогенного типа (рис. 2.11) [Рокос, 2009].

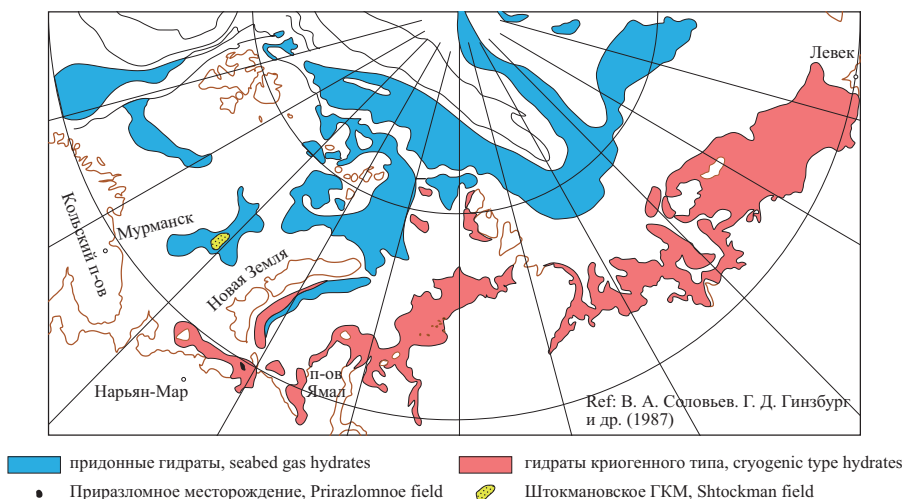


Рис. 2.11. Газогидраты и их распространение в Арктике [Соловьёв и др., 1987]

Материалы по строению субаквальных диапировых структур показывают их близкое строение с газонасыщенными многолетнемёрзлыми породами Бованенковского НГКМ, рассмотренными в главе 1. Схожи и условия формирования. В обоих случаях наблюдается комплекс парагенетических процессов, в основе которых лежит формирование локальных тектонических поднятий, куполов, которые концентрируют потоки газовых, жидкостных и газово-жидкостных 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 будут наблюдаться вторичные процессы перераспределения газов, связанные с разложением газогидратов. Вероятно, для субаквальных условий криогенная концентрация, характерная при субаэральном промерзании, будет играть меньшую роль.

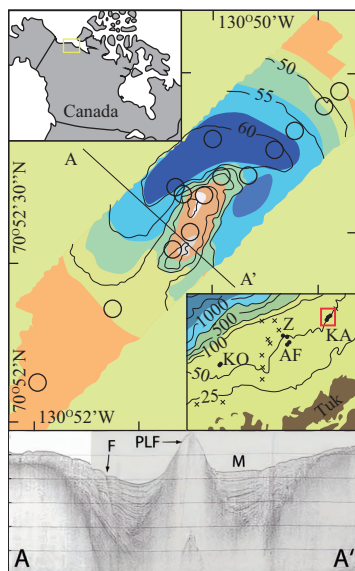
В условиях холмистого рельефа дна вскрыта дислоцированная ледогрунтовая толща (50–70% льда) с равномерной слоистой криогенной текстурой, повторяющей дислоцированные слои. Толща включает горизонты чистого льда. На Русановской площади в Карском море при глубине моря 80–115 м, при температуре придонного слоя воды  $-1,6 \dots -1,8$  °С в дислоцированных отложениях теми же авторами вскрыта высокльдистая (более 80%) мерзлота с мощными залежами пластовых льдов, тоже в стадии роста. Лёд содержит тонкие прослойки суглинка толщиной 1–2 мм (рис. 2.12) [Мельников, Спесивцев, 1995].



**Рис. 2.12. Подземный лёд в дислоцированных донных отложениях Баренцево-Карского шельфа по скважинам [Бондарев и др., 2001]**

#### **2.4. Мёрзлые газонасыщенные льдистые бугры на арктическом шельфе**

Пластические деформации льда и льдистых пород связаны с течением льда, обусловленным выпиранием льдистой мёрзлой породы под воздействием аномально высокого давления газа в подстилающих осадках. Батиметрические исследования, проведённые в море Бофорта, показали существование на глубине 10–20 м большого количества пингообразных образований высотой до 18 м, окружённых понижениями (рис. 2.13). Данные образования аналогичны обнаруженным российскими исследователями на шельфе арктических морей РФ.



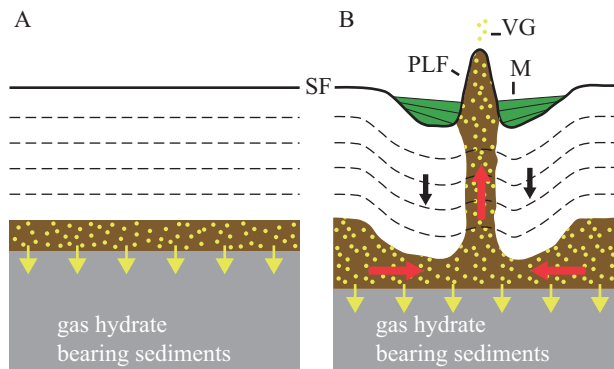
**Рис. 2.13. Местоположения пингообразных бугров на морском дне (вверху). Положение сейсмического профиля (А–А1) (внизу). PLF — пингообразный бугор, М — понижение, окружающее бугор заполненным слоистым слоем осадков, содержащих вертикально ориентированные трещины (F) [Charles и др., 2007]**

В сейсмике профили пингообразные бугры не имеют внутренней структуры и окружены понижениями, заполненными слоистыми осадками, рассекаемыми небольшими, вертикально ориентированными трещинами, что предполагает неравномерные осадки. Из гребня холма наблюдается выделение газа (рис. 2.14). Газ выделяется из рассеянных по поверхности отверстий диаметром 5 см и состоит в основном из метана. Породы, слагающие бугор, представлены преимущественно глинами. Криогенная текстура представлена рассеянными изометричными включениями льда. При оттаивании формируется структура с открытыми пустотами, напоминающая структуры дегазации, наблюдаемые в глубоководных кернах. Объёмное содержание льда в ядре бугра в некоторых образцах было от 10 до 30% и более. Авторы статьи предложили следующую схему формирования пингоподобных образований.

Пингоподобные образования могут формироваться вследствие нагрева гидратосодержащих многолетнемёрзлых пород водами голоценовой трансгрессии арктического шельфа. После перекрытия водами Северного Ледовитого океана температура мёрзлых пород начинает повышаться. Потепление приводит к формированию постепенно утолщающегося слоя разложения газогидрата (коричневый цвет на рис. 2.14) при выделении газообразного метана в донные отложения (жёлтые точки). Образование пузырьков газа, связанное с фазовыми переходами, создаёт избыточное давление. Под действием давления газонасыщенные мёрзлые породы на локальных участках начинают выдавливаться вверх. Газ, находящийся под давлением, вызывает течение мёрзлого грунта. Молекулярный и изотопный состав свидетельствует о его бактериальном генезисе. Пресные льды на морском мелководье шельфа Бофорта встречаются только в пингоподобных образованиях в отличие от окружающих отложений. Это подразумевает её подземный источник. Таким источником является разложение газогидратов в многолетнемёрзлых породах. Температура субаквальных осадков остаётся ниже точки за-



мерзания пресной воды на сотни метров ниже морского дна. Таким образом, выделившаяся вода замерзает, заполняя газовые пустоты, а затем пресный лёд вовлекается под действием давления в движение вверх. Авторы предполагают, что разложение газа гидрата метана является ключевым фактором в формировании подводных бугров. Этот процесс даёт понимание причины наблюдаемого нагнетания метана, поднимающего пресноводные льдистые отложения в пингоподобных образованиях, и существования окружающих их провалов. Со временем местные напряжения могут превысить прочность покровной породы, вызвать её частичный разрыв и выход газа с поверхности бугра в воду. Снятие давления внутри бугра и вывод газа из района, окружающего канал, будут способствовать остановке его роста и образованию кольцевых депрессий вокруг него [Charles и др., 2007]. Следует добавить, что разрыв мёрзлой кровли подводных бугров может реализовываться не только в виде струйного истечения газовых пузырьков, но и в виде взрывных процессов с образованием поймаков.



**Рис. 2.14. Схематический чертёж пингоподобной структуры (PLF) и окружающего её рва (M), связанных с разложением гидрата газа; VG — выход газа; SF — морское дно [Charles и др., 2007]**

Согласно проведённому математическому моделированию в настоящее время в пределах изобат 60–70 м многолетнемёрзлые породы существуют на всей территории Восточно-Сибирского шельфа. В этих условиях они стабильны, непрерывны и непроницаемы для газа [Gavrilov et al., 2003]. Однако именно в мёрзлых толщах, распространённых повсеместно (80% площади), обнаружены аномально высокие концентрации метана [Шахова и др., 2009]. Данное несоответствие связано, по-видимому, с тем, что при моделировании не учитывается возможность фильтрации газа в мёрзлых породах. Изучение материалов исследования воронок газового выброса и лабораторного моделирования показало, что фильтрация газа в мёрзлых породах происходит и осуществляется при достижении оптимального соотношения между давлением газов и прочностью пород, которое регулируется их температурой [Хименков, Станиловская, 2018; Хименков и др., 2019].

Переход многолетнемёрзлых пород в субаквальное состояние сопровождается повышением их температуры, соответствующим температурам придонных слоёв морских вод. При этом изменяются характеристики самих пород: увеличивается содержание незамёрзшей воды, образуются зоны минерализованных вод, уменьшается прочность. Сформированная во время регрессии мёрзлая толща сдерживает до определённого времени вертикальную миграцию биогенного газа из глубины вверх по разрезу. Достигнув подошвы мёрзлой толщи, этот газ, не имея возможности дальнейшей миграции по вертикали, накапливался в доста-

точно больших количествах. Лабораторное моделирование показало, что газ в этих условиях находится под давлением около 2 МПа [Глазов и др., 2018]. Развитие зон аномально высоких давлений газа в толще многолетнемёрзлых пород арктического шельфа является основным фактором газодинамики в этой области криолитозоны. Существуют различные позиции по поводу причин поступления газа из мёрзлых пород [Рокос, 2008]. Одна из них заключается в следующем: после деградации мёрзлой толщи, которая, вероятно, протекала довольно быстро, скопившийся газ практически распределился по разрезу вышележащих протаявших осадков. Биогенный газ, накапливаясь у подошвы мёрзлой толщи, формирует локальные газовые карманы с аномально высокими давлениями [Рокос, 2008].

Согласно другой, выделение большого количества углеводородных газов, находящихся под давлением, связано с массивированным разложением газогидратов. Выброс метана из разрушающихся гидратов может иметь характер мощной пузырьковой эмиссии в форме факелов. Эмиссия газа в вышележащие слои геосферы контролируется состоянием мерзлоты, которая играет роль запорного клапана. В современных условиях подводная мерзлота мелководной части морей арктического шельфа уже не выполняет эту функцию. При этом вероятность эмиссии значительной части метана в атмосферу очень высока [Шахова и др., 2009]. Позднее авторы несколько скорректировали свою позицию, полагая, что миграция газа может происходить через мёрзлые породы на шельфе после того, как будет достигнуто соответствующее давление. При этом в мёрзлых породах формируются каналы, по которым газ проникает в морские воды, а затем и в атмосферу [Shakhova et al., 2017]. Полученные в результате лабораторных исследований данные (глава 6) по фильтрации газа в мёрзлых породах показали, что указанный процесс в зависимости от минерализации поровых вод и температуры грунта наблюдался при давлении 2–4 кг/см<sup>2</sup>.

## Выводы

Существует несколько причин формирования газонасыщенных зон в субаквальных осадках арктических морей. Во-первых, это перераспределение и накопление свободного газа биогенного генезиса в песчаных горизонтах, залегающих в глинистых толщах. Во-вторых, формирование происходит в результате криогенной концентрации при эпигенетическом промерзании во время перехода морских осадков из субаквального состояния в субаэральное. Газ накапливается или в свободном виде в локальных газовых карманах, или в клатратной форме в виде включений газогидратов в мёрзлых породах. В-третьих, газ может поступать из глубинных горизонтов и накапливаться или в литологических (песчаные прослои) или в криогенных (неровности нижней границы мёрзлых пород) ловушках. Повышение температуры многолетнемёрзлых пород, происходящее при их перекрытии морскими водами, вызывает разложение газогидратов, выделение газа в толще мёрзлых пород и возникновение в них очагов повышенного давления. При определённом соотношении прочности мёрзлой кровли и давления газа начнётся миграция газа вверх через мёрзлую породу. Миграция может происходить как в виде отдельных газовых флюидов, формирующих долговременные потоки газовых пузырьков в морской воде, так и в виде взрывов, выбрасывающих одномоментно огромные объёмы парниковых газов, главным образом метана. При протаивании мёрзлых пород по образовавшимся талым зонам газ будет поступать к морскому дну и дальше в водную толщу и атмосферу. Газонасыщенные зоны в субаквальных морских породах представляют собой закономерно построенные геосистемы со своими границами, морфологией, строением, свойствами и историей развития, аналогичные газонасыщенным криогенным геосистемам в субаэральных условиях.

## Библиография

1. Арз Ф.Э. О субаквальной криолитозоне Северного Ледовитого океана // Региональные и теплофизические исследования мёрзлых горных пород в Сибири. Якутск, 1976. С. 3–26.
2. Баранов И.Я. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:1000 000 (пояснительная записка). М.: Знание, 1960. 48 с.
3. Бондарев В.Н., Длугач А.Г., Рокос С.И., Костин А.Д. Акустические фации посткриогенных обстановок мелководных районов Печорского и Карского морей // Разведка и охрана недр. 1999. № 7–8. С. 10–14.
4. Бондарев В.Н., Локтев А.С., Длугач А.Г., Потапкин Ю.В. Методы исследования и определения субаквальной мерзлоты // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. Книга 1. Апатиты: Кольский научный центр, 2001. С. 15–19.
5. Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 7. С. 587–598.
6. 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.
7. Глазов В.А., Глазова В.А., Новосёлов А.Е. Измерение давления подводного фонтанирования на примере выброса газа в Печорском море // Молодежный научный форум: Естественные и медицинские науки: электр. сб. ст. по мат. XXX междунар. студ. науч.-практ. конф. URL: [https://nauchforum.ru/archive/MNF\\_nature/1\(29\).pdf](https://nauchforum.ru/archive/MNF_nature/1(29).pdf) (дата обращения: 08.11.2018).
8. Говоруха С.Ю., Гаккель Я.Я. Об Арктике // Проблемы полярной географии: труды ААНИИ. Л.: Гидрометиздат, 1968. Т. 285. С. 37–50.
9. 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](http://www.ngtp.ru/rub/5/37_2011.pdf).
10. Данилов И.Д. Полярный литогенез. М.: Недра, 1978. 238 с.
11. Данилов И.Д., Жигарев Л.А. Криогенные породы арктического шельфа // Мёрзлые породы и снежный покров. М.: Наука, 1977. С. 17–26.
12. Леонтьев О.К. Морская геология. Основы геологии и геоморфологии дна Мирового океана. М.: Высшая школа, 1982. 344 с.
13. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука, 1995. 198 с.
14. МIRONЮК 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.
15. Молочушкин Е.Н. К мерзлотной характеристике донных пород восточной части Ванькиной губы моря Лаптевых // Вопросы географии Якутии. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Вып. 6. С. 123–129.
16. Неизвестнов Я.В. Мерзлотно-гидрогеологические условия зоны Арктических шельфов СССР // Криолитозона Арктического шельфа. Якутск, 1981. С. 18–28.
17. Неизвестнов Л.Н. Этапы формирования гидрогеологических условий шельфа // Основные проблемы палеогеографии позднего кайнозоя Арктики. Л.: Недра, 1983. С. 182–185.

18. Неизвестнов Я.В., Семенов Ю.П. Подземные криопэги шельфа и островов Советской Арктики // II Междунар. конф. по мерзлотоведению: докл. и сообщ. Якутск: Кн. изд-во, 1973. Вып. 5. С. 103–106.
19. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
20. 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.
21. Пономарев В.М. Еще раз о гидрогеологических условиях полуострова
22. Раздельный (остров Вайгач) и Амдермы // Проблемы Арктики. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1940. № 4. С. 81–91.
23. Попов А.И. Криолитогенез как зональный тип литогенеза // Проблемы геокриологии. М.: Наука, 1983. С. 35–43.
24. Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В. Криолитология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 239 с.
25. 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. М., 2011. Т. II. С. 97–100.
26. Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал — Центр. М.: ГЕОС, 1997. 432 с.
27. 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. 2007. Т. IV. С. 155–157.
28. Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г. Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. С. 40–52.
29. Рокос С.И., Тарасов Г.А. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2007. № 67. С. 66–75.
30. 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. 22–30.
31. Рокос С.И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа: автореф. дис. ... к. г. н. Мурманск: Мурманский морской биологический институт, 2009. 21 с.
32. Рокос С.И., Длугач А.Г., Костин Д.А., Куликов С.Н., Локтев А.С. Многолетнемёрзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // Инженерные изыскания. 2009. № 10. С.
33. Соловьев В.А. Криолитозона шельфа и этапы ее развития // Основные проблемы палеогеографии позднего кайнозоя Арктики. Л.: Недра, 1983. С. 185–192.
34. Соловьев В.А. Гинзбург Г.Д. и др. Криотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л.: ПНО «Севморпуть», 1987. 150 с.
35. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1940. 379 с.
36. Токарев М.Ю., Соловьев М.А. Выделение газонасыщенных осадков по данным сейсмо-разведки в Ругозёрской губе Кандалакшского залива Белого моря, 2014 [class-baikal.ru].

37. 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.
38. Хименков А.Н. Особенности субаквального океанического криолитогенеза // Сергеевские чтения. М.: ГЕОС, 2002. Вып. 4. С. 471–475.
39. Хименков А.Н., Брушков А.В. Океанический криолитогенез. М.: Наука, 2003.
40. 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. URL: [http://e-notabene.ru/arctic/article\\_27524.html](http://e-notabene.ru/arctic/article_27524.html).
41. 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 естественных взрывных процессов в криолитозоне // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С.
42. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестник Российской академии наук. 2009. Т. 79, № 6. С. 507–518.
43. Шахова Н.Е., Семилетов И.П. Метан в морях Восточной Арктики: избранные результаты исследования (1994–2014). <https://docplayer.ru/37852131-Metan-v-moryah-vostochnoy-arhtiki-izbrannye-rezultaty-issledovaniya-shahova-n-e-semiletoy-i-p.html>.
44. Якушев В.С. Формирование скоплений природного газа и газовых гидратов в криолитозоне: автореф. дис. ... д. г.-м. н. М., 2009. 47 с.
45. Breuer M.E. Some result of geothermal investigation of permafrost in Northern Alaska. Transaction American geophysical Union. № 1, feb.1958.
46. Charles K. Paull, William Ussler, Scott R. Dallimore, Steve M. Blasco, Thomas D. Lorenson, Humfrey Melling, Barbara E. Medioli, F. Mark Nixon, and Fiona A. McLaughlin. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // Geophysical research letters. 2007. Vol. 34, L01603, doi: 10.1029/2006GL027977.
47. Hanter J.A. et al. Permafrost and frozen sub-sia bottom materials in the southern Beaufort sea // Beaufort sea technical report. 1976. № 22. 174 p.
48. 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.
49. Gavrilov A.V., Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Tumskey V.E. Reconstruction of Ice Complex Remnants on the Eastern Siberian Arctic // Permafrost Periglac. Process., 2003. V. 14. P. 187–198.
50. Mackay J. Ross, Lavkulich L.M. Ionic and oxygen isotopic fractionation in Mackay J. permafrost growth. "Pap. Geol. Surv. Can." No 1, part B, 1974. P. 255–256.
51. Sellman P.V., Chamberlain E.J. Permafrost beneath the Beaufort Sea: Niar Prudhoe Bay, Alaska // J. Energj. Res. Technologj. 1980. Vol. 102. № 1. P. 35–48.
52. Shakhova N., Semiletoy I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. Nature Communications, 2017. № 8 (15872). doi.org/10.1038/ncomms1.



## ГЛАВА 3.

# МИГРАЦИЯ ГАЗОВ В МЁРЗЛЫХ ПОРОДАХ

### Введение

В предыдущих главах были рассмотрены основные проблемы, связанные с формированием газонасыщенных геосистем криолитозоны. Данная глава посвящена рассмотрению некоторых вопросов, связанных с их разрушением и прежде всего с возможностью фильтрации газа в мёрзлых породах. Газ в газонасыщенных зонах всегда будет находиться под повышенным давлением. Это обусловлено тем обстоятельством, что любое перераспределение газа и накопление его в локальных зонах происходит под воздействием избыточного давления. Наличие непроницаемой оболочки, прочность которой превосходит давление, оказываемое на неё газом, обеспечивает концентрацию газа в мёрзлой породе. Если будут созданы соответствующие термобарические условия, то газ переходит в твёрдое состояние, образуя газогидрат. Нарушение равновесных условий вызывает разрушение газогидратов, выделение большого количества газа и резкое повышение давления. Нарушение условий, при которых газонасыщенные зоны в мёрзлых породах находятся в стабильном состоянии, приводит к тому, что газ начинает из них удаляться. При техногенных нарушениях во время бурения происходит резкий сброс давления и локальный нагрев мёрзлой породы. В этом случае происходит взрывное расширение газа. Мощность взрыва будет зависеть от давления и объёмов газонасыщенной зоны. При медленном нагреве мёрзлых пород за счёт изменения климата или поверхностных условий процесс дегазации газонасыщенных зон будет иным. Известно, что при повышении температуры прочность мёрзлых грунтов уменьшается. При достижении определённых соотношений между температурой и давлением газа на контактах газонасыщенных зон и вмещающих мёрзлых пород начинают формироваться области нарушения сплошности (пластические и разрывные деформации). Это, в свою очередь, вызывает миграцию газа. Активное освоение северных территорий РФ и шельфа арктических морей, а также осознание вклада этих регионов в выбросы парниковых газов в связи с интенсивным потеплением климата, требуют незамедлительного изучения движения газовых флюидов и связанных с ними процессов в толще многолетнемёрзлых пород. Актуальность исследования определяется необходимостью выявления условий, при которых возможна фильтрация газа и формирование газовых выбросов в мёрзлых породах как в естественных условиях, так и при техногенном воздействии. В настоящее время по общепринятым в геокриологии представлениям многолетнемёрзлые льдистые породы считаются газонепроницаемыми. Все расчёты и прогнозы миграции газа при техногенных воздействиях и климатических изменениях базируются на представлениях об оттаивании многолетнемёрзлых пород. В условиях усиливающегося техногенного воздействия при интенсивном освоении северных территорий и арктического шельфа, а также ускоряющегося глобального потепления климата такой подход не позволяет адекватно оценивать процессы, происходящие в мёрзлых породах. Реально эти опасные процессы наступают раньше, чем принято считать. Сосредоточенность на оценке только ореолов оттаивания при техногенных воздействиях и игнорирование массообменных, и в первую очередь газообменных, процессов, происходящих в высокотемпературных мёрзлых породах, затрудняют оценку, учёт и прогнозирование воздействия данных процессов на инженерные сооружения и оценку объёма парниковых газов, поступающих в атмосферу. Проблема миграции газа в мёрзлых породах, ещё недавно

казавшаяся незначительной и имеющей только академический интерес, становится важной как в теоретическом, так и в практическом отношении. Резкое изменение температуры на Земле учёные связывают с растущей концентрацией в атмосфере парниковых газов, прежде всего углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и метана ( $\text{CH}_4$ ). В подавляющем количестве этот газ заключён в толще многолетнемёрзлых пород в виде газогидратов.

### 3.1. Состояние проблемы фильтрации газа в мёрзлых породах

Представления о том, что криолитозона является экраном, препятствующим выходу подземного газа на поверхность, являются наиболее распространёнными в настоящее время. Согласно им, только после оттаивания мёрзлых пород формируются миграционные потоки газа (преимущественно  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ), поступающие в водную толщу или атмосферу в виде потоков пузырьков [Шахова, 2010]. В.С. Якушев, проанализировавший огромный материал по возможности фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах, пришёл к заключению, что высокольдистые покровные отложения криолитозоны (верхние 40–50 м) являются практически непроницаемыми для газа, идущего под напором из глубины [Якушев, 2009]. Поскольку на пути миграции газа находятся весьма слабопроницаемые для газа мёрзлые породы, то невозможна даже диффузия газа в приповерхностные отложения [Якушев, 1989]. Е.М. Чувилин с соавторами установлено, что мёрзлые льдонасыщенные породы являются абсолютным упором для газовых флюидов [Чувилин, Гребенкин, 2016]. Для песчаных прослоев критическое значение льдонасыщенности порового пространства, при котором осуществима фильтрация газа, составляет 60–70% от порового объёма. Если льдонасыщенность порового пространства больше этой величины, то порода становится непроницаемой для газового флюида [Чувилин, Гребенкин, 2016; Чувилин и др., 2018]. Мёрзлые льдонасыщенные породы считаются и по своей сути являются абсолютным упором для газовых флюидов [Чувилин и др., 2019]. Верхняя часть многолетнемёрзлых пород является региональным флюидоупором. Лишь сквозные талики под озёрами и реками выполняют функцию окон дегазации и путей субвертикальной миграции газа из зоны ММП в гидросферу и атмосферу [Богоявленский и др., 2019]. В последние годы взгляды на возможность фильтрации газа в мёрзлых породах начинают меняться. В первую очередь это связано с разработкой проблемы формирования воронок газового выброса за счёт разложения газогидратов [Хименков и др., 2017; Хименков, Станиловская, 2018; Yakushev et al., 2018; Хименков и др., 2019; Chuvilin et al., 2020]. Приведённые выше материалы, казалось бы, убедительно доказывают невозможность миграции газа в льдонасыщенных мёрзлых породах, слагающих верхние горизонты криолитозоны. Тем не менее имеются материалы, показывающие, что миграция газа в этих условиях не только возможна, но и происходит.

Бурение скважин в многолетнемёрзлых породах сопровождается многочисленными газовыми выбросами, часто продолжающимися длительное время, что свидетельствует о возможности миграции газа из прилегающих мёрзлых слоёв [Якушев, 2009; Арэ, 1998; Мельников, 1989; Чабан, 1991]. При расчётах зоны поступления газа оцениваются массообменные процессы, происходящие только в зоне оттаивания. Между тем в зоне растепления, которая превышает мощность оттаявшего слоя и в которой температуры остаются в диапазоне отрицательных значений, за счёт разложения газогидратов могут формироваться газовые потоки с высоким давлением. Потоки газа, наблюдающиеся в некоторых термокарстовых озёрах, связывают с оттаиванием гидратосодержащих мёрзлых пород. Однако и в этом случае диссоциация газогидратов и выделение газа начинается гораздо раньше, ещё до оттаивания мерзлоты. Изучение воронок газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири, пока-

зало, что в подготовке взрывных процессов значительную роль играет напорная миграция газа в многолетнемёрзлых породах [Хименков, Станиловская, 2018]. Некоторые исследователи считают возможным проникновение глубинных газовых флюидов в поверхностные слои мёрзлых толщ по разломам [Богоявленский, 2019; Эпов и др., 2014]. Но на севере Западной Сибири не обнаружено локальных зон протаивания, приуроченных к разломам. Следовательно, и в этом случае необходимо рассматривать условия движения газа в мёрзлых породах. Общим для всех приведённых примеров является то, что во всех случаях необходимым условием является растепление низкотемпературных многолетнемёрзлых пород. При повышении температуры до значений, приближающихся к области интенсивных фазовых переходов, они приобретают много новых свойств, в том числе увеличивается их газопроницаемость.

Исследования геохимических полей в криолитозоне западной части Енисей-Хатангского прогиба показали, что в результате субвертикального массопереноса углеводородные газы проникают по разрезу в верхние пласты многолетнемёрзлых пород. Здесь на Пеляткинском газовом месторождении в районе распространения ММП отмечалось образование газовых грифонов в непосредственной близости от залежи [Бордуков, 1985; Старобинец, Муругова, 1985]. По оценкам Г.Н. Краева, количество метана, выделяющегося при газопроявлениях, наблюдаемых при бурении, намного превышает количество газа, заключенного в объём вечной мерзлоты диаметром до 5 м вокруг скважины. Это позволяет предполагать наличие в мёрзлых породах системы сообщающихся каналов, трещин, ослабленных зон, соединяющих пористые зоны с высоким содержанием свободного газа, или участков с гидратосодержащими мёрзлыми породами [Kraev et al., 2019]. Такими каналами могут быть песчаные слои с минерализованными водами (криопэгами). В мёрзлых морских засоленных породах криопэги распространены широко, именно к ним часто приурочены выбросы газа.

Мы считаем, что утверждение о газонепроницаемости льдистых мёрзлых пород не вполне корректно. При оценке возможности фильтрации газа в мёрзлых породах недостаточно учитывать только степень заполнения пор льдом (льдистость). Данная позиция не учитывает, что при тепловом воздействии таликовая зона вследствие формирования области фазовых переходов развивается гораздо медленнее и достигает меньших размеров, чем зона нагрева многолетнемёрзлых пород. Но именно здесь происходят значительные изменения свойств мёрзлых пород. При повышении температуры увеличиваются содержание незамёрзшей воды и проницаемость, уменьшается прочность, в засоленных грунтах появляются рассольные зоны и криопэги, в подземных льдах различного рода дислокации и дефекты. При определённых соотношениях прочности мёрзлых пород и давлений содержащихся в них газов могут сформироваться условия для движения газовых потоков. Имеются данные, позволяющие предположить, что потоки газа могут начать формироваться и в высокотемпературных мёрзлых породах ещё до их оттаивания. При наличии подземного газа различного генезиса (свободный газ в карманах и газовых ловушках, газ, образовавшийся при разложении газогидратов, подмерзлотный газ из нижележащих горизонтов), находящегося под давлением, создаются условия для фильтрации газа в субвертикальном направлении. В зависимости от природных условий фильтрация газа может реализовываться в виде формирования бугров пучения, взрывных процессов с выбросами породы, в свободном истечении в водоёмы или атмосферу или образовании зон с аномально высокими давлениями в толще многолетнемёрзлых пород.

В стабильных геокриологических условиях газ находится в равновесном «законсервированном» состоянии, которое нарушается при изменении геокриологической обстановки, выражающейся в повышении температуры или увеличении порового давления и создающей условия для перераспределения газовой компоненты. Повышение температуры

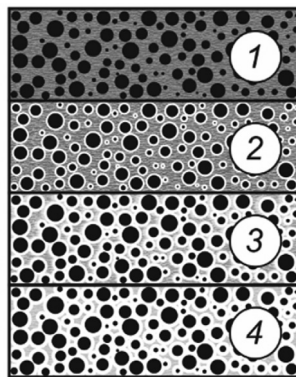
мёрзлых грунтов выше определённого предела, обусловленного составом, строением, начальной температурой и напряженным состоянием, инициирует начало газовыделения в них. Газовыделение приводит к закономерным изменениям строения мёрзлых грунтов и их свойств, в том числе таких важнейших, как прочность и деформируемость. Степень изменения свойств грунтов может быть существенной. Так, например, снижение сцепления грунтов при газовыделении может достигать трёх-пятикратных значений.

### 3.2. Зависимость свойств многолетнемёрзлых пород и льдов от изменения температуры

Миграция газовых флюидов неразрывно связана с пликативными и дизъюнктивными деформациями мёрзлых пород. Высокие давления внутригрунтовых газов, взаимодействуя с породой, производят её разрыхление, при этом формируются порово-кавернозно-трещинные резервуары. Возникающие под воздействием повышающегося внутреннего давления пластические и разрывные деформации создают в толще породы ослабленные зоны, по которым начинается перемещение газового флюида. Проникая в породу, газ, находящийся под давлением, продолжает процесс её разрушения и деформирования. Постепенно формируется фильтрационно-деформационная зона, продвигающаяся вглубь массива породы.

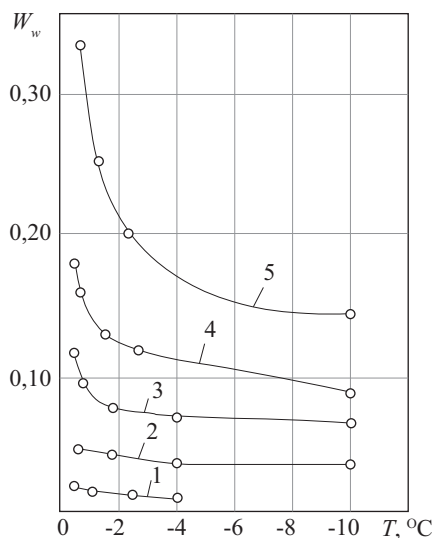
При локальном нагреве поверхностным водоёмом в мёрзлых породах начинают происходить объёмные тепловые деформации с появлением трещин, возникают дефектные зоны по границам кристаллов, увеличивается содержание незамёрзшей воды, газовые включения, расширяясь, образуют каналы между собой. Прочность мёрзлых пород и льдов уменьшается, увеличивается пористость, формируется достаточно развитая система фильтрационных каналов, связывающих между собой поры. Таким образом, в зоне нагрева происходит своего рода разгрузка пластового давления, а вместе с этим увеличивается его газопроницаемость.

В работе Ю.К. Зарецкого [Зарецкий, 1988] дана структурная схема фазовых зон мёрзлой породы, при переходе её из твёрдомёрзлого в талое состояние. В этом случае помимо твёрдомёрзлой и талой зон выделяются промежуточные оттаивающая и пластичномёрзлая зоны (рис. 3.1). Оттаивающая зона по своим свойствам приближается к талым породам, но формально относится к мёрзлым, поскольку при температуре около 0 °С в ней присутствуют кристаллы льда, хотя и не скрепляющие породу.



**Рис. 3.1. Модель оттаивания мёрзлой породы: схема расположения зон оттаивания:**  
**1 — талая зона, 2 — оттаивающая зона, 3 — пластичномёрзлая зона,**  
**4 — твёрдомёрзлая зона [Зарецкий, 1988]**

Свойства мёрзлых грунтов изменяются в зависимости от ряда факторов и прежде всего от температуры. Особенно велика эта зависимость в пределах от 0 до  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , когда замерзает значительная часть воды и растворов солей, находящихся между частицами грунта. При этом, чем больше в мёрзлом грунте незамёрзших воды или растворов солей, тем ниже его прочность (рис. 3.2).



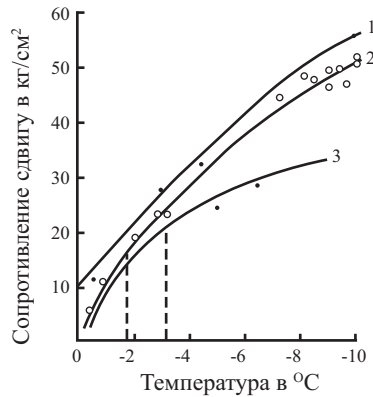
**Рис. 3.2. Кривые содержания незамёрзшей воды в мерзлых грунтах в зависимости от отрицательной температуры (по Н.А. Цытовичу): 1 — кварцевый песок; 2 — супесь; 3 — суглинок; 4 — глина; 5 — то же, содержащая монтмориллонит [Цитович, 1973]**

Величина сдвигающего напряжения, при котором возникает вязкопластическое течение льда, при отрицательных температурах, близких к  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , очень мала и не превышает  $0,01\text{ МПа}$  [Велли и др., 1963]. Процесс течения льда сопровождается нарушением структурных связей мёрзлого грунта. Одновременно происходит перемещение и переконфигурация твёрдых частиц, в результате чего возникают необратимые структурные деформации, т. е. явление ползучести. Эти деформации возникают только в том случае, когда касательные напряжения превышают силы внутреннего взаимодействия, обуславливающие равновесное состояние мёрзлой породы. Если нагрузка превышает предел длительной прочности, то возникает пластично-вязкое течение. Наличие ледяных прослоек снижает общее сопротивление мёрзлых грунтов длительно действующим нагрузкам. Кроме указанных процессов, происходит также отжатие воздуха, содержащегося в мёрзлом грунте [Вялов, 1959]. Мёрзлые грунты в зависимости от их температуры, величины и времени внешнего воздействия могут вести себя как твёрдые или пластичные. При нагревании, особенно около  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , значения их прочностных и деформационных характеристик резко уменьшаются [Шушерина, 1974] (рис. 3.3, 3.4, табл. 3.1, 3.2).

Л.Т. Роман выявлено закономерное увеличение температурных деформаций в газонасыщенных многолетнемёрзлых породах при изменении их температуры. Это относится не столько к объёмным изменениям защемлённых газов, сколько к деформациям их оболочки, образованной скелетом или льдом. С увеличением температуры защемлённого газа

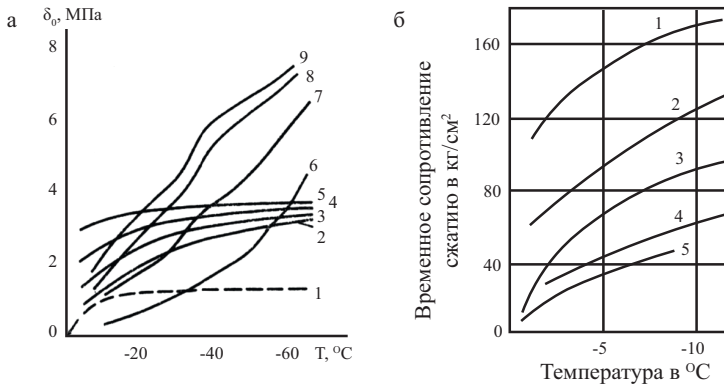


давление в порах будет расти. Это приводит к дополнительным деформациям скелета [Роман, 2002; Роман и др., 2017]. Локальный нагрев многолетнемёрзлых пород как бы «рыхлит» ранее газонепроницаемую толщу.



**Рис. 3.3. Зависимость сопротивления сдвигу мёрзлого грунта и льда от температуры:**

**1 — лёд; 2 — супесь; 3 — глина [Велли и др., 1963]**



**Рис. 3.4. Зависимость временной прочности мёрзлых пород и льда на разрыв (а) и сжатие (б) от температуры:**

**а) 1 — лёд, 2–5 — песок с влажностью соответственно 10, 12, 15, 18%; 6–9 суглинок с влажностью соответственно 12, 15, 18, 20% [Шушерина, 1974]; зависимость временного сопротивления сжатию мёрзлых грунтов от температуры:**

**б) 1 — пылеватый песок; 2 — кварцевый песок; 3 — супесь; 4 — глина, суглинок тяжёлый; 5 — лёд [Велли и др., 1963]**

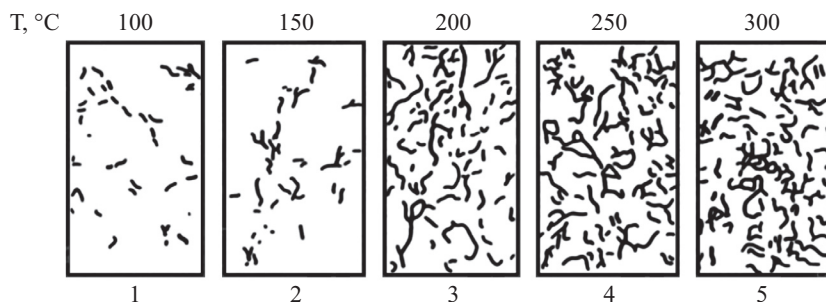
Изменение пористости в мёрзлой породе при повышении температуры и постоянном давлении происходит по всему объёму породы и аналогично увеличению трещиноватости в образцах скальных пород при повышении температуры в условиях постоянного гидростатического давления (рис. 3.5).

**Таблица 3.1. Значения нормативного сопротивления скалыванию мёрзлого грунта окружающего фундамент  $S_p$  [СН 91-60]**

Средняя температура в градусах вечномерзлого слоя грунта, окружающего фундамента	$S_p$ , кг/см <sup>2</sup>
-0,2	0,3
-0,5	0,5
-1	1
-2	1,5
-3	2
-4	2,5

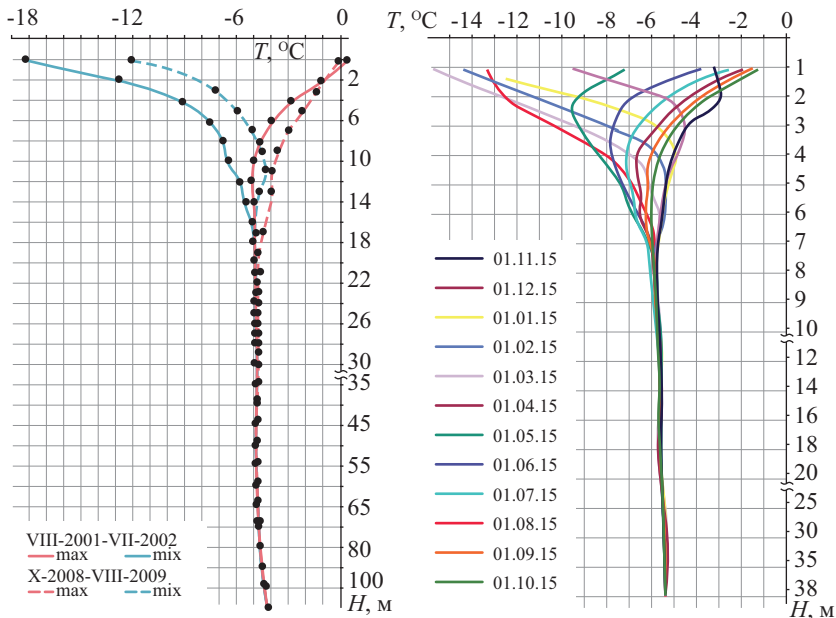
**Таблица 3.2. Нормативные сопротивления  $r^n$ , кг/см<sup>2</sup>, твёрдомёрзлых грунтов [СН 91-60]**

№ п/п	Наименование грунта	Нормативные сопротивления $r^n$ при наиболее высокой среднемесячной температуре грунта на уровне подошвы фундамента в процессе эксплуатации здания и сооружения			
		0,5	-1,5	-2,5	-4
1	Щебенистый (галечниковый)	6	9	12	15
2	Пески крупные и грунт дресвяный (гравийный) из обломков кристаллических пород	5	8	10	12
3	Пески средней крупности и грунт дресвяный (гравийный) из обломков осадочных пород	4	6	8	10
4	Пески мелкие и пылеватые и супеси	3	5	7	8
5	Суглинки и глины	2,5	4	6	7
6	То же, пылеватые	2	3	4	6
7	Все виды грунтов, указанные в пп. 1–6, при наличии в них под подошвой фундаментов на глубину до 3 м ледяных прослоек суммарной толщиной до 30 см и глинистые грунты с органическими примесями в количестве от 3 до 12% по весу	1,5	2,5	3,5	5
8	Лед и лед с илом и торфом	–	0,5	1	2

**Рис. 3.5. Развитие межзерновой трещиноватости в образцах амфиболита при повышении температуры, постоянном гидростатическом давлении 180 МПа и постоянной сжатии 45 МПа [Абдрахимов и др., 1992]**

### 3.3. Изменения температуры многолетнемёрзлых пород в субэвальных условиях как фактор влияния на газонасыщенные зоны

Фильтрация газа (или её отсутствие) не является заданной характеристикой многолетнемёрзлых пород. Она может появляться и исчезать. И зависит это прежде всего от температуры, а значит, и свойств мёрзлых пород. Имеющиеся долговременные температурные наблюдения показывают, что для Ямала, несмотря на глобальные климатические изменения, динамика температур на глубине в несколько десятков метров незначительна. Температуры пород в скважинах геокриологического стационара Марре-Сале ВСЕГИНГЕО показывают, что с 2001 по 20015 г. они практически не изменились и колеблются в диапазоне  $-5 \dots -6$  °C [Дубровин и др., 2015]. На глубине от 20 до 60 м наблюдается интервал безградиентного распределения температур (рис. 3.6). Вероятно, это связано с тем, что в засоленных грунтах, широко распространённых на Ямале, фазовые переходы происходят в области более низких температур. Незначительные колебания температурного поля будут сглаживаться фазовыми переходами. Приведённые данные свидетельствуют о недостаточности возмущающих воздействий климатических изменений для возможности разложения газовых гидратов на глубине, соответствующих глубине воронки (около 60 м). Это позволяет усомниться в утверждениях некоторых авторов о ведущей роли резкого повышения летних температур в течение нескольких лет, предшествовавших образованию Ямальского кратера [Лейбман, Плеханов, 2014; Кизяков и др., 2015; Лейбман, Кизяков, 2016]. Климатические изменения последних десятилетий могли значительно изменить температуру многолетнемёрзлых пород только в верхнем 10–20-метровом горизонте.



Lorem ipsum

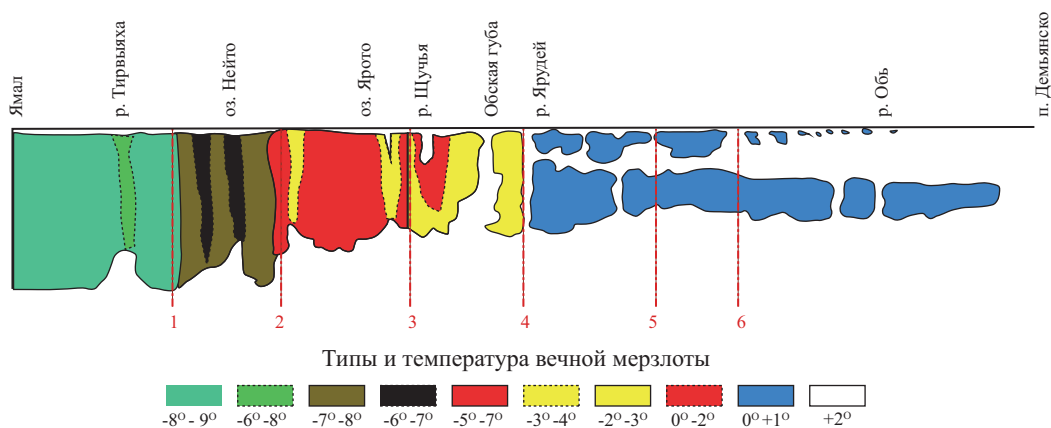
**Рис. 3.6. Температура пород в скважинах геокриологического стационара Марре-Сале ВСЕГИНГЕО [Дубровин и др., 2015]**

В случае залегания газонасыщенных пород в этих интервалах могут начаться процессы миграции газа в мёрзлых породах. Ниже изменения температуры незначительны, что не предполагает каких-либо катастрофических поступлений газов в атмосферу из многолетнемёрзлых пород.

### 3.4. Формирование растеплённых зон под поверхностными водоёмами

Гораздо более интенсивное влияние, чем климатические изменения в естественных условиях, на температуру ММП оказывают поверхностные водоёмы. В природе именно они являются наиболее эффективными «нагревателями». Они обеспечивают как быстрый прогрев многолетнемёрзлых пород при своём появлении, так и быстрое возвращение в первоначальное температурное состояние при осушении. Север Западной Сибири расположен в зоне сплошного распространения многолетнемёрзлых пород со среднегодовыми температурами грунтов от  $-2...-4^{\circ}\text{C}$  до  $-7...-9^{\circ}\text{C}$ . Вследствие широкого распространения на полуострове озёр разной морфологии и размеров многолетнемёрзлые грунты характеризуются здесь значительной прерывистостью с поверхности и наличием подозёрных таликов различной мощности, которая зависит от размеров и глубины озёр. Минимальные значения заозёрности на полуострове Ямал ( $5-10\%$ ) характерны для высоких геоморфологических уровней — дренированных водораздельных пространств; максимальные (до  $30\%$ ) — для речных пойм и низких террас.

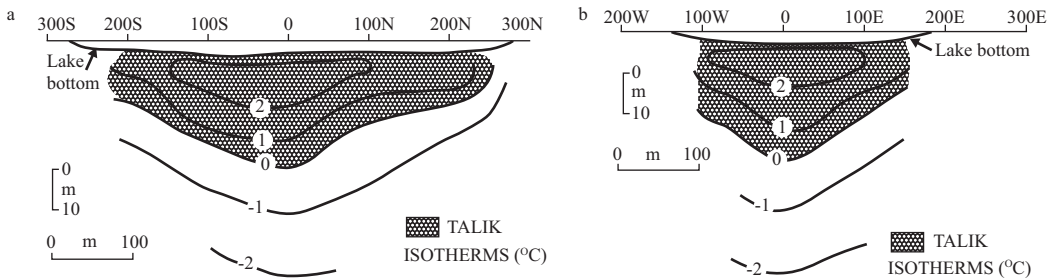
Территория Бованенковского ГКМ характеризуется обилием озёр (около 4000), неравномерно распределённых по площади месторождения. Заозёрность в районе месторождения составляет  $12-15\%$ , достигая в бассейне реки Мордыха  $30\%$  [Криосфера..., 2013]. Концентрация озёр и их размеры возрастают в зонах глубинных разломов фундамента и платформенного чехла плиты, с которыми, в свою очередь, связаны нефтегазные локальные структуры. Распределение заозёрности значительно искажает зональность распределения температур ММП (рис. 3.7). Формирование озёр приводит к повышению температур мёрзлых пород, а иногда и к их разрушению. В крупных озёрных котловинах Ямала и Гыдана мощность ММП заметно уменьшается по сравнению с окружающими пространствами. На рис. 3.7 показано влияние поверхностных водоёмов на температуру и мощность ММП на п-ве Ямал.



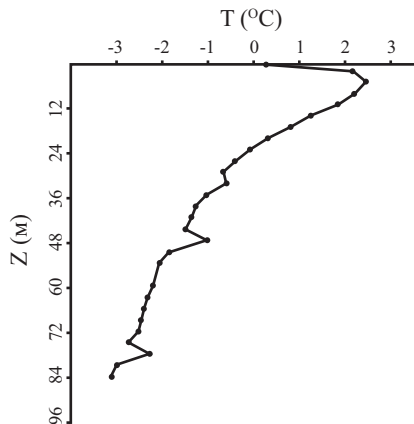
**Рис. 3.7. Особенности влияния поверхностных водоёмов на температуру ММП Ямала [Бешенцев, 2009]**

На отдельных участках салехардской морской равнины, занятой крупными озёрами, глубина залегания нулевой изотермы уменьшается до 80–90 м. Под пойменной террасой озера Тоунгынято (Гыдан) электроразведкой зафиксирована мощность ММП 20–24 м. В среднем течении небольших рек глубина промерзания уменьшается до 140–100 м, в низовьях до 40–50 м. Хасыреи широко развиты как в долинах рек, так и на водоразделах, занимая до 30–40% площади.

В случае формирования несквозного талика под водоёмом формируется двучленное строение температурного поля. Непосредственно под водоёмом породы имеют положительные температуры (талики), ниже залегают высокотемпературные мёрзлые породы. На рис. 1.8, 1.9 изображено строение температурного поля под озером при формировании несквозного талика. Данные были получены при исследовании озера Иллисарвик, расположенного в дельте реки Маккензи. Размер — 300×600, с максимальной глубиной 4,5 м. Среднегодовая температура мёрзлых пород в районе озера находится в диапазоне –8...–10 °С. Мощность мерзлоты — 400–600 м. Были пробурены 10 скважин глубиной от 15 до 87 м. В глубоководной части озера граница талых пород проходит на глубине около 24 м, ниже залегают мёрзлые породы, температура которых понижается и на глубине около 90 м достигает –3 °С (рис. 3.8, 3.9) [Burges et al., 1982].



**Рис. 3.8. Распределение температур субаквальных отложений озера Иллисарвик (Канада) [Burges et al., 1982]**

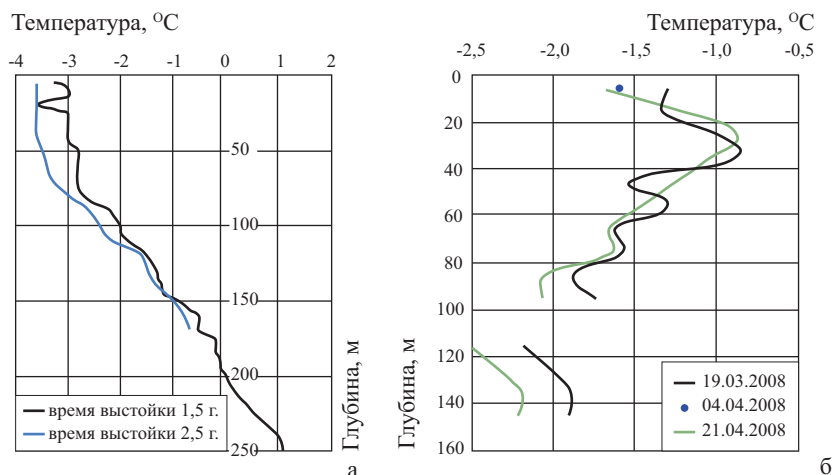


**Рис. 3.9. Температурный профиль в субаквальных осадках центральной, глубоководной части озера (глубина 4,5 м) (скважина 78-10) [Burges et al., 1982]**



Для севера Западной Сибири данных о температурах субаквальных осадков нет. Оtepляющее влияние озёр на многолетнемёрзлые породы можно оценить, анализируя температуры в скважинах, пробуренных на хасыреях — днищах осушенных озёр, в настоящее время находящихся в субаэральном состоянии. Температуры, замеренные на поверхности хасыреев, на глубине 60–80 м находятся в диапазоне:  $-3 \dots -2,5$  °C для III морской террасы и  $-1,8 \dots -1,6$  °C для поймы (рис. 3.10) [Криосфера..., 2013].

Многолетнемёрзлые породы вне зоны озёр с поверхностными температурами около  $-5$  °C, на глубине 60–80 м находятся для III морской террасы и поймы в диапазоне  $-5,5 \dots -5$  °C [Криосфера..., 2013].



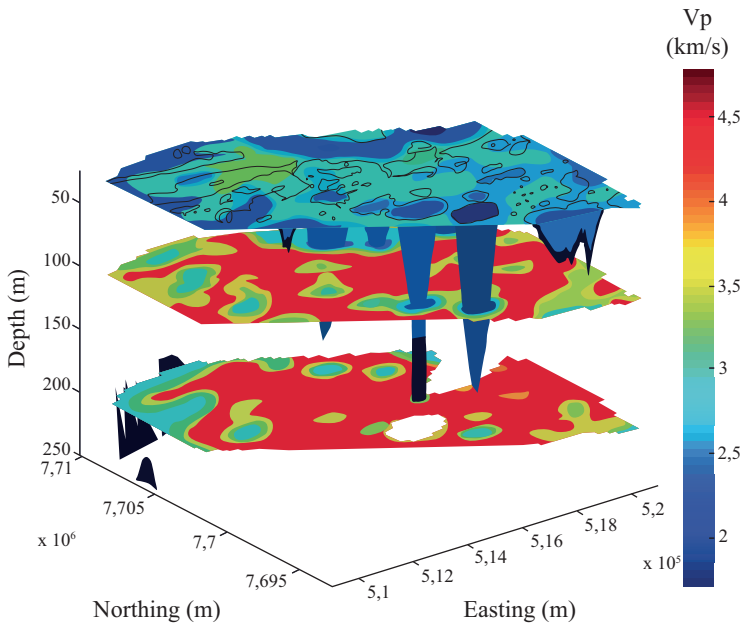
**Рис. 3.10. Температура криогенной толщи под хасыреем на территории Бованенковского ГКМ:**

**а — III морская терраса; б — пойма [Криосфера..., 2013]**

Канадскими геофизиками, исследовавшими таликовые зоны под озёрами выявлено, что под ними формируются зоны пониженных скоростей в виде перевёрнутых конусов (рис. 3.11) [Majorowicz et al., 2015]. Пониженные скорости объясняются авторами тем, что повышение температуры приводит к увеличению количества незамёрзшей воды, газовых пузырьков, а для засоленных грунтов к появлению свободной минерализованной воды (криопэгв). Очевидно, что все эти признаки являются результатом нагревания многолетнемёрзлых пород. Интересно, что для небольших озёр иногда конусов не видно, но на срезах, проведённых через 100 м, выделяются округлые пятна. Это является свидетельством того, что даже небольшие озёра оказывают значительное отепляющее воздействие на многолетнемёрзлые породы.

При локальном нагреве поверхностным водоёмом в мёрзлых породах начинают происходить объёмные тепловые деформации с появлением трещин, возникают дефектные зоны по границам кристаллов, увеличивается содержание незамёрзшей воды, газовые включения, расширяясь, образуют каналы между собой. Прочность мёрзлых пород и льдов уменьшается, увеличивается пористость, формируется достаточно развитая система фильтрационных каналов, связывающих между собой поры. Таким образом, в зоне нагрева происходит своего рода разгрузка пластового давления, а вместе с этим

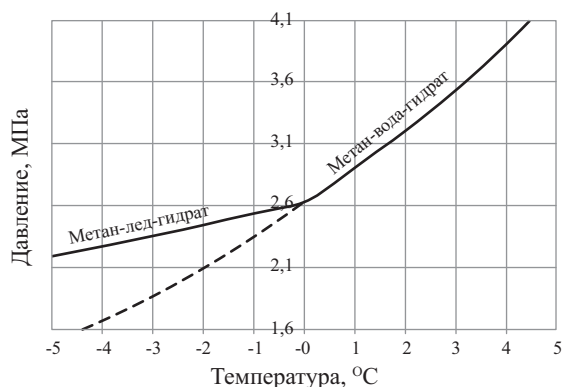
увеличивается её газопроницаемость. Локальный нагрев многолетнемёрзлых пород как бы «рыхлит» ранее газонепроницаемую толщу. В зоне растепления формируется «единое фильтрационное пространство», в котором поры и каналы соединены между собой. Зоны нагрева под водоёмами не только подготавливают мёрзлые породы к возможности проникновения в них флюидов, но и обуславливают форму того пространства, где возможны эти процессы. Алан Тейлор [1998] выделяет эти зоны как «геофизические талики», которые в отличие от термальных таликов с положительной температурой являются мёрзлыми и при этом содержат значительное количество незамёрзшей воды. «Геофизические талики» имеют трубообразную форму и проникают в окружающие низкотемпературные многолетнемёрзлые породы. Формирование высокотемпературных каналов с большим содержанием незамёрзшей воды в толще многолетнемёрзлых пород может приводить к миграции по ним углеводородных газов [Taylor et al., 1998]. Таким образом, ещё до появления источника газа в толще многолетнемёрзлых пород под озёрами возникают локальные зоны, в которых создаются благоприятные условия для миграции флюидов. Вертикально ориентированные цилиндрические каналы, состоящие из высокотемпературных мёрзлых пород с незначительной по сравнению с окружающей толщей прочностью и с большим содержанием незамёрзшей воды, пронизывают низкотемпературные газонепроницаемые массивы. И если на пути растущей зоны растепления встретится горизонт метастабильных газогидратов или локальная газонасыщенная область с высоким давлением (газовый карман), то создадутся условия для движения по этим каналам газовых флюидов к поверхности.



**Рис. 3.11. Трёхмерное распределение областей пониженных скоростей под озерами по данным томографии [Majorowicz et al., 2015]**

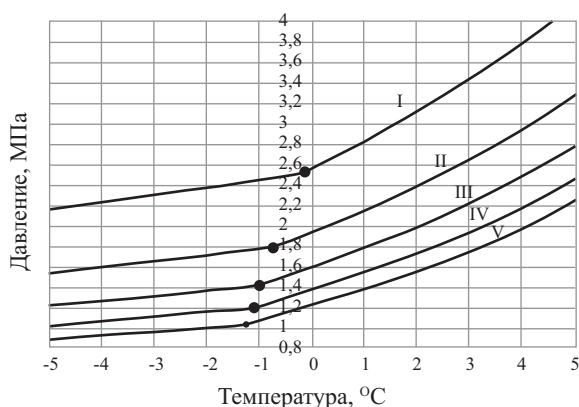
### 3.5. Формирование зон аномально высокого давления газа в многолетнемёрзлых породах

Выяснив морфологию зон локального нагрева многолетнемёрзлых пород, рассмотрим причины появления здесь условий для возникновения повышенного давления, обуславливающего возможность миграции газа. В.А. Истоминым с соавторами выявлены равновесные состояния газогидратов различных сочетаний подземных газов (рис. 3.12, 3.13). Для метана при температурах в диапазоне 268,15 К (–5 °C) ÷ 273,15 К (0 °C) равновесное давление в системе «газ–вода (лед)–гидрат» находится в диапазоне 2,2–2,6 МПа (см. рис. 2.44) [Истомин и др., 2018].



**Рис. 3.12. Линии трёхфазного равновесия «метан–вода–гидрат» и «метан–лед–гидрат». Пунктирная линия — метастабильное равновесие «метан–переохлаждённая вода–гидрат» [Истомин и др., 2018]**

В естественных условиях газ, содержащийся в субаквальных осадках, состоит в основном из метана с примесью диоксида углерода. Поэтому реальные равновесные значения будут отличаться (рис. 3.13).



**Рис. 3.13. Линии трехфазного равновесия «газ–вода (лед)–гидрат» структуры I для метана, диоксида углерода и их смесей. Состав газовой фазы: I — 100% CH<sub>4</sub>; II — 75% CH<sub>4</sub> + 25% CO<sub>2</sub>; III — 50% CH<sub>4</sub> + 50% CO<sub>2</sub>; IV — 25% CH<sub>4</sub> + 75% CO<sub>2</sub>; V — 100% CO<sub>2</sub>. Точки на линиях — четырёхфазное равновесие «газ–вода–лед–гидрат» [Истомин и др., 2018]**

Из графика видно, что промерзание в замкнутых условиях максимально возможное давление составляет около 2,6 МПа, и оно ограничивается началом процесса гидратообразования [Истомин и др., 2018]. Приведённые данные позволяют оценивать давления, возникающие при диссоциации газогидратов разного состава в случае нарушения равновесных условий. При промерзании неконсолидированных засоленных газонасыщенных морских отложений создаются условия для формирования в них скоплений газогидратов. По оценкам Булдовича, давления 1,5 МПа и температур ниже  $-1,4^{\circ}\text{C}$  достаточно для образования стабильных углекислых газогидратов [Buldovich et al., 2018a]. В современных морях газонасыщенные осадки широко распространены. Свободный газ в отложениях верхней части разреза современных морских отложений имеет в основном биогенную природу. По составу это преимущественно (более 95%) метан с примесью  $\text{CO}_2$  и других газов. Иногда в морских осадках формируются мини-ловушки, которые представляют собой прослои песчаного состава, перекрытые сверху и снизу слабопроницаемыми глинисто-суглинистыми образованиями. В этих зонах скопления газа могут находиться под давлением в диапазоне 0,5–3,0 МПа. При снижении внешнего давления и/или повышении температуры газ, скопившийся в мини-ловушках или связанный в газогидратных залежах, расширяется. Это вызывает смятие и выжимание к поверхности вмещающих и вышележащих отложений. При бурении наблюдаются выбросы газовой смеси, насыщенной взвешенными грунтовыми частицами. В большинстве случаев выбросы происходят в диапазоне глубин от 20 до 50 м ниже поверхности дна [Рокос, 2009].

Установлено, что интенсивность диссоциации поровых газогидратов в значительной мере зависит от температуры и вещественного состава (дисперсность и минеральный состав, засоленность). В лабораторных условиях в образце песка с начальной насыщенностью пор гидратами 60% при отрицательной температуре  $-2^{\circ}\text{C}$  гидратонасыщенность через 20 часов упала до 5%, при  $-4^{\circ}\text{C}$  составляла 28%, а при  $-7^{\circ}\text{C}$  снизилась лишь до 43%. Через 150 часов при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$  гидрат практически разложился, а при температурах  $-4^{\circ}\text{C}$  и  $-7^{\circ}\text{C}$  сохранился, причём процесс его разложения резко снизился, особенно при температуре  $-7^{\circ}\text{C}$ . Увеличение содержания глинистых частиц способствует снижению устойчивости порового гидрата метана и повышает интенсивность его разложения по сравнению с песчаными породами. Засоленность гидратосодержащих грунтов также вызывает увеличение интенсивности разложения газогидратов. В образце песка, засоленного 0,2 н раствором NaCl с начальной весовой влажностью  $W = 10\%$ , гидратосодержание в равновесных условиях составляло 13%, после сброса давления наблюдались резкое падение гидратосодержания и высокая скорость диссоциации гидрата метана. Уже через 1,5 часа после начала опыта гидрат метана полностью разложился. В чистом песке объёмное гидратосодержание в равновесных условиях было равно 14%, через 1,5 часа — 8% [Истомин и др., 2008]. Для естественных условий интенсивность разложения газогидратов и комплекс сопровождающих его процессов изучены недостаточно.

Экспериментальные исследования, проведённые В.С. Якушевым, показали, что вещественный состав пород оказывает значительное влияние на температуры, при которых начинается диссоциация газогидратов. В песчаных породах с низкой минерализацией поровых гидратов носит массовый характер при температурах вблизи  $-1^{\circ}\text{C}$ . В более дисперсных породах (супеси, суглинки) температура полного разложения реликтовых гидратов понижается вплоть до  $-3...-4^{\circ}\text{C}$ . Во влажных засоленных глинах разложение реликтовых гидратов может происходить при разных температурах и даже небольшое (доли градуса) повышение температуры может приводить к массовому выделению газа из разлагающихся гидратов [Якушев, 2017].

### 3.6. Процессы миграции газов в мёрзлых породах

Рассмотренные в монографии материалы позволяют сделать вывод о том, что в многолетнемёрзлых породах могут создаваться условия, при которых они перестают быть экраном для внутригрунтовых газов. При этом газы, находящиеся под достаточно большим давлением, могут интенсивно, иногда даже в виде естественных взрывных процессов, поступать в атмосферу. В нефтяной и газовой отраслях представления о струйной миграции флюидов используются уже давно. В соответствии с представлением о миграции нефти и газа, предложенным В.П. Савченко, углеводороды, выделяющиеся из материнских пород в коллектор, объединяются в струи, которые потом сливаются в более мощные потоки. Скорость перемещения потоков различна, она может изменяться в течение одного года от миллиметров до метров. При этом автор подчёркивает зависимость мощности потока флюида от степени дислоцированности пород [Савченко, 1977]. По аналогии с механизмом миграции нефти и газа из материнской породы [Воды нефтяных..., 1989] механизм миграции газа в мёрзлых породах можно представить следующим образом. При повышении температуры породы происходит рост внутрипорового давления при одновременном уменьшении её прочности и увеличении внутренних дефектов. Перераспределение газа в криолитозоне обеспечивается определённым соотношением давления газа и прочности вмещающих мёрзлых пород, зависящей от температуры. При её повышении наблюдается увеличение порового пространства, возрастает количество незамёрзшей воды, появляются минерализованные ячейки, нарастает количество внутренних дефектов. Это обеспечивает перераспределение газа в высокотемпературных многолетнемёрзлых породах при достаточно низких давлениях. При достижении прочностными показателями мёрзлой породы определённых пороговых значений происходит нарушение её сплошности и начинается миграция газа из газонасыщенной зоны. Возникающие под воздействием повышающегося внутреннего давления деформации формируют эволюционирующую структуру порового пространства, по которому происходит перенос газового флюида. При этом в первую очередь начинают возникать мелкие волосяные трещины, которые, сливаясь, образуют более крупные каналы. По этой системе пор, микро- и макротрещин происходит миграция флюидов. Таким образом возникает фильтрационно-деформационная зона, продвигающаяся вглубь массива породы [Хименков, Станиловская, 2018]. Данный подход позволит: обоснованно прогнозировать возможность возникновения зон фильтрации газа и условий формирования газовых выбросов на участках залегания гидратонасыщенных мёрзлых пород при техногенном воздействии; разработать методику геофизических исследований зон развития деформаций и фильтрационных потоков газа в многолетнемёрзлых породах; создать комплекс математических моделей перераспределения газа в многолетнемёрзлых породах при различных соотношениях температуры пород и давления внутригрунтовых газов; разработать методику составления прогноза поступления парниковых газов из высокотемпературных мёрзлых пород. Общеизвестно, что выделение парниковых газов в атмосферу обусловлено оттаиванием многолетнемёрзлых пород. Приведённые материалы показывают, что данный эффект может наблюдаться и в мёрзлом состоянии. Даже при незначительном повышении температуры в толщах гидратосодержащих многолетнемёрзлых пород может начаться разложение газогидратов, возникновение естественных взрывных процессов с выделением парниковых газов.

Рассмотренные материалы показывают, что в толще промерзающих и мёрзлых пород вследствие температурной неоднородности, фазовых переходов, структурных преобразований, изменения прочностных и деформационных свойств формируются потоки вещества



в газообразном виде. Основными зонами проявления флюидов являются места локального повышения температуры в пределах отрицательных значений или участки повышения давления вследствие возникновения криогенного напора. Здесь могут происходить структурные изменения мёрзлых пород, такие как разложение газогидратов и появление газовой фазы, находящейся под высоким давлением; переход засоленных льдов и льдистых пород в жидкое состояние; появление ослабленных зон, жидких и газовых включений во льду. При этом меняются физико-механические свойства мёрзлых пород, например, происходит ослабление их прочностных и деформационных характеристик, что может приводить к пластическим и разрывным внутригрунтовым деформациям, а при значительных давлениях к течению грунта и льда.

В природе существует достаточно большое количество причин, приводящих к повышению температур в многолетнемёрзлых породах. Существуют условия для возникновения и развития термокарстовых озёр. К разломам приурочены повышенные теплотокоты. Часто наблюдаются аномалии сезонных и годовых колебаний температуры. В толще многолетнемёрзлых пород нередко встречаются гидратонасыщенные горизонты, особенно в местах расположения месторождений углеводородов. Здесь при нарушении термобарических условий будет происходить диссоциация газовых гидратов. Причин возникновения различного рода неустойчивостей, выводящих из стабильного состояния локальные участки многолетнемёрзлых пород, существует достаточно много, и большинство из них ещё слабо изучено. В настоящее время есть признаки глобального потепления, это, несомненно, мощный фактор, воздействующий на криолитозону. Но пока на глубине в несколько десятков метров какие-либо процессы, свидетельствующие о значительных изменениях, проявляются слабо. Разломы в литосфере существуют тысячи лет, и повышенные тепловые потоки в них стабильны. Влияние, которое они оказывали и оказывают на многолетнемёрзлые породы, уже должно было реализоваться в виде мощных выходов глубинных газов на поверхность, чего в условиях севера Западной Сибири не наблюдается. В этих условиях поверхностные водоёмы являются наиболее активным и динамичным фактором, оказывающим мощное локальное тепловое воздействие на многолетнемёрзлые породы. Они быстро, в геологическом времени, появляются и так же быстро исчезают. Зона их воздействия может достигать сотен метров, а может ограничиваться лишь несколькими метрами. Причём мёрзлые породы могут не оттаивать, а лишь нагреваться на несколько градусов, но и этого может быть достаточно, чтобы привести в действие механизмы резкого локального выделения газа при диссоциации газогидратов и повышении давления в породах.

Локальные колебания температуры в массивах многолетнемёрзлых пород, связанные с неоднородностью поверхностных условий, могут приводить к изменению их прочностных и деформационных свойств, объёмным изменениям. Это, в свою очередь, может вызывать локальное увеличение внутригрунтовых давлений. Возникающие напорные процессы и вызванное ими перераспределение вещества реализуются в виде потоков газовых флюидов, выравнивающих внутригрунтовые давления. Эти процессы в геокриологии практически не учитываются.

Включение флюидодинамических представлений в понятийный аппарат геокриологии позволит успешней решать многие теоретические и практические задачи, таких как исследование естественных взрывных процессов в криолитозоне; изучение миграции газовых флюидов в многолетнемёрзлых породах; понимание процессов динамометаморфизма многолетнемёрзлых пород и др.

Движение флюидов в толще пород происходит при возникновении разности давлений между флюидосодержащей зоной и вмещающими породами. Что же приводит к образованию зон повышенного давления в мёрзлых породах? Перечислим некоторые из причин:

- неравномерность промерзания, обуславливающая формирование криогенного напора и латерального перемещения подмерзлотных вод и газов в область меньших давлений (образование сезонных и многолетних бугров пучения);
- промерзание замкнутых таликов;
- образование областей растепления мёрзлых грунтов под поверхностными водоёмами;
- разложение газогидратов в области растепления мёрзлых пород под поверхностными водоёмами. Создание в области диссоциации газогидратосодержащих мёрзлых пород избыточного давления;
- формирование криогенного напора биогенного газа в промерзающих породах, его латеральное перераспределение и накопление в локальных областях.

### 3.7. Лабораторное моделирование миграции газа сквозь льды и мёрзлые породы

Многообразие природных условий (минералогический и гранулометрический состав, засоленность, льдистость, строение, температурный режим, история развития и др.), а также трудности полевого исследования осложняют изучение фильтрации газа в мёрзлых породах в естественном состоянии. Косвенные наблюдения криогенного строения природных объектов без понимания сути процессов порождают обилие гипотез, требующих подтверждения. Лабораторные исследования данной проблемы позволяют варьировать перечисленные характеристики в мёрзлых образцах и применять для исследования разнообразные методики. Если учесть, что в настоящее время фильтрация газа сквозь льдистые мёрзлые породы вообще отрицается, то отработка методических приёмов изучения принципиальной возможности данного процесса возможна только в лабораторных условиях.

#### 3.7.1. Методика проведения исследований

Как показывают эксперименты, проведённые в лаборатории ИГЭ РАН, фильтрация газа в мёрзлых грунтах в значительной мере зависит от их льдистости (табл. 3.3). В ходе опытов сквозь образцы с разной льдистостью пропускался газ под разным давлением. Результаты представлены в таблице.

**Таблица 3.3. Расход газа за 60 с при различных давлениях [Агапкин, Кальбергенов, 2020]**

Мёрзлый грунт при $t = -5^{\circ}\text{C}$		
Суглинок при влажности $W$ , % и льдистости $S_r$ , %	Давление газа $P$ , кПа	Расход газа $V$ , $\text{cm}^3$
$W = 8,7$ $S_r = 41$	6	83
	10	211
	15	566
$W = 13,1$ $S_r = 55$	6	49
	10	103
	15	162
	20	274

У мёрзлых суглинков с льдонасыщением, близким к полному ( $S_r = 92,3\%$ ), объём газа, прошедшего через образец за 1 час (60 минут), при давлении 100 кПа, составил  $7,5 \text{ см}^3$ . Представленные данные показывают, что мёрзлые суглинки с неполным льдонасыщением (до  $S_r = 55\%$ ) достаточно хорошо проводят газ. Прослеживается чёткая связь между льдистостью суглинков и их фильтрационными свойствами [Агапкин, Кальбергенов, 2020]. К сожалению, в проведённых исследованиях отсутствовало изучение структуры грунта, что не позволило оценить изменения строения мёрзлого субстрата под напорным воздействием газа. Эксперименты проводились при одной температуре, что не позволило выявить влияние данного фактора на фильтрацию. При использовании давлений в образцах высотой 2 см создавались их значительные градиенты, намного превышающие естественные.

В опытах, проведённых совместно сотрудниками Института геоэкологии РАН и кафедры геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, изучалось влияние температуры на фильтрацию газа во льдах различной минерализации и грунтах различного состава и засоленности. Особое внимание уделялось изучению строения образцов после проведения опытов. Подбирались наименьшие давления (от 2 до 4 кПа), при которых фильтрация начиналась при высоких отрицательных температурах [Хименков и др., 2019; Хименков и др., 2019б; Хименков и др., 2020].

Для проведения экспериментов была создана установка, обеспечивающая: подготовку образцов льда и мёрзлых грунтов кубической формы, размером  $20 \times 8 \times 8 \text{ см}$ ; подачу газа под давлением в нижнюю часть образца (рис. 3.14). В качестве газа использовался воздух. Давление создавалось компрессором FUBAG DC 320/50 CM 2.5 с точностью измерения давления  $0,5 \text{ кг/см}^2$ . Выход газа с поверхности образца осуществлялся путём размещения на поверхности контейнера газонепроницаемой эластичной камеры (резиновой перчатки на рис. 3.14).



**Рис. 3.14. Установка для исследования фильтрации газа в мёрзлых грунтах. Фото П.А. Соболева**

Экспериментальное изучение фильтрации газа во льдах проводилось на образцах льда различной засоленности (10 г/кг, 5 г/кг, пресный лёд). Образцы готовились методом послойного промораживания. После промораживания температура льда понижалась до

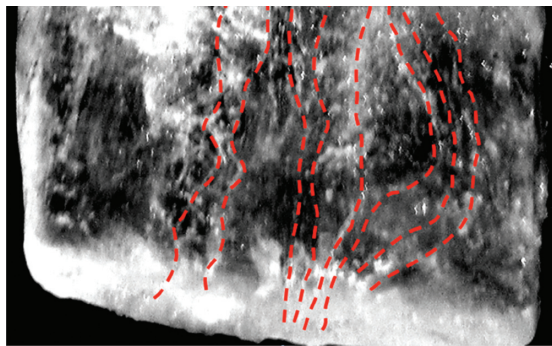
–9 °С, и снизу подавался газ из штуцера под давлением 2 атм. При температуре –9 °С фильтрации газа сквозь лёд не наблюдалось. После этого температура повышалась. При температурах около –2...–3 °С фиксировался выход газа с поверхности образца. По окончании опыта проводились структурные исследования образцов.

В первой серии изучения фильтрации газа сквозь грунт при подготовке образцов использовался глуховецкий каолин. Грунтовые образцы, приготавливались методом послойного промораживания при температуре –9 °С. После окончания промораживания и выстаивания при данной температуре в нижнюю часть образца через штуцер подавался воздух под давлением 4 кг/см<sup>2</sup>. Температура постепенно повышалась до значений, при которых фиксировался выход газа с поверхности образца. После фиксации выхода газа мёрзлый образец распиливался в вертикальной плоскости по центру и в нескольких местах в горизонтальной плоскости. Затем производилось фотографирование срезов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. По фотографиям проводился анализ структурных и морфометрических характеристик криогенного строения образцов. Выявлялись структурные и текстурные деформации первичного строения и их распределение в массиве образца. Изучались морфология и распределение в образце новообразований, связанных с фильтрацией газа.

### **3.7.2. Результаты лабораторного изучения фильтрации газа сквозь мёрзлые породы и льды**

#### **3.7.2.1. Лёд с минерализацией 20 г/кг**

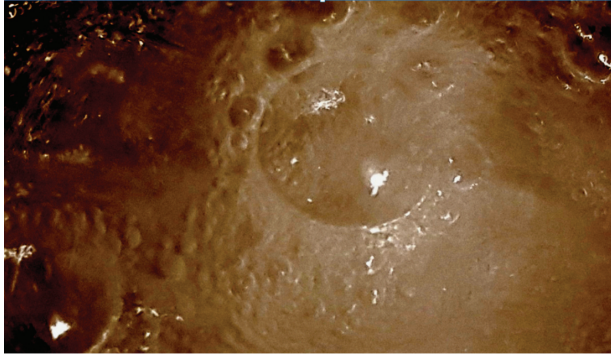
Изучение структуры льда при промораживании раствора с минерализацией 10 г/кг показало, что при подаче газа во лёду формируются многочисленные субвертикальные каналы, пронизывающие образец льда на всю высоту (рис. 3.15). Каналы представляют собой цепочки круглых и вытянутых газовых пузырьков около 1–2 мм в поперечнике.



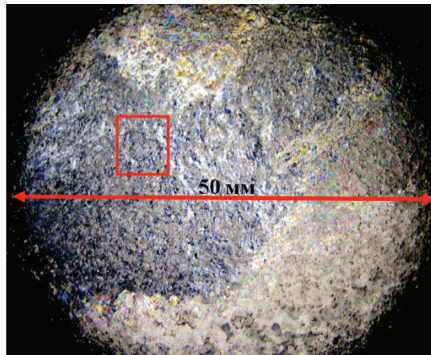
**Рис. 3.15. Ориентировка газовых каналов в нижней части образца (штриховые линии). Минерализация первичного раствора 20 г/кг. Фото А.Н. Хименкова**

Используя ослабленные зоны, фильтрующийся сквозь лёд газ движется под давлением вверх и выделяется с поверхности образца в виде пузырей (рис. 3.16). В качестве ослабленных зон выступают рассольные ячейки, пронизывающие кристаллы льда. При своём движении газ выдавливает минерализованный раствор. Структурные исследования показали, что каналы фильтрации газа в поперечном сечении имеют округлую, угловатую и вытянутую форму (рис. 3.17, 3.18). В верхней части образца они распределены довольно

равномерно, в нижней каналы концентрируются в центре, поблизости от штуцера подачи газа (см. рис. 3.15). Образец рассекают несколько трещин без видимой ориентировки, которые возникли, вероятно, в результате деформации льда под воздействием давления, оказываемого газом.



**Рис. 3.16. Фотография поверхности ледяного образца с минерализацией 20 г/кг в ходе процесса фильтрации газа под давлением. Фото П.А. Соболева**



**Рис. 3.17. Структура газонасыщенного льда после пропускания газа. Верхняя часть образца. Горизонтальный срез. Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова**



**Рис. 3.18. Выделенный фрагмент рис. 3.17. Чёрные пятна соответствуют газовым каналам. Фото А.Н. Хименкова**



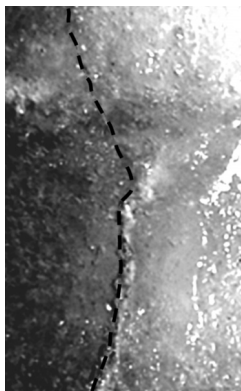
## 3.7.2.2. Лёд с минерализацией 5 г/кг

Образец с минерализацией 5 г/л для предотвращения образования рассольных зон и более быстрого формирования льда промораживался с помощью послойного налива (рис. 3.19). Таким образом удалось полностью устранить выдавливание минерализованного раствора из образца.



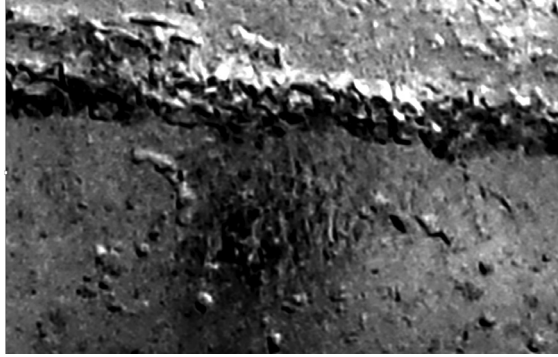
**Рис. 3.19. Образец льда, приготовленного послойным наливом. Фото П.А. Соболева**

Для первичного строения образца характерны скопления газовых пузырьков в центральных частях каждого заливаемого слоя (см. рис. 3.19). По контактам слоёв наблюдается повышенное содержание газовых пузырьков. Обнаружены многочисленные свидетельства фильтрации газа в сформировавшемся образце льда. В первую очередь это каналы с газовыми включениями субвертикальной ориентировки, или пронизывающие образец на всю высоту, или прослеживающиеся в нескольких слоях. Газовые каналы представляют собой цепочки пузырьков диаметром 1–2 мм. Наряду с цепочками пузырьков встречаются червеобразные каналы, заполненные газом, шириной 2–3 мм. Выявлены каналы сложного строения, нижняя часть которых имеет червеобразную форму, затем они переходят в трещину, рассекающую лёд, и выше продолжают в виде цепочки газовых пузырьков (рис. 3.20).



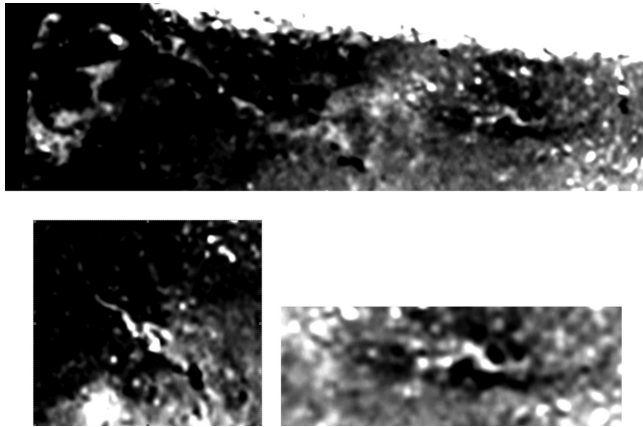
**Рис. 3.20. Газовые каналы в массиве льда, секущие границы между слоями льда. Штриховой линией выделен один из газовых каналов, пересекающих границу различных слоёв льда (диаметром доли мм). Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова**

Лёд по всей высоте образца разбит вертикально ориентированными трещинами (рис. 3.20, 3.21) разной длины, заполненными газовыми пузырьками размером до 1 мм. Трещины наблюдаются как внутри слоёв, так и на их границе. Они разрушают контакты слоёв на прямоугольные блоки (см. рис. 3.21), проникая из нижнего слоя в перекрывающий.



**Рис. 3.21. Зона вертикально ориентированных трещин во льду (в массиве льда и на границе между слоями). Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова**

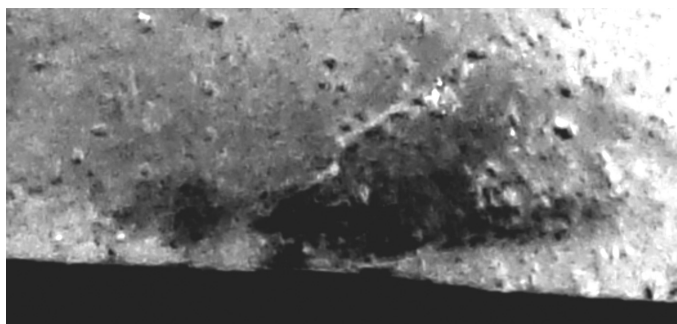
Наряду с разрывными нарушениями во льду прослеживаются пластические деформации, которые маркируются изогнутыми и волнообразными газонасыщенными каналами (рис. 3.22). Разрывные и пластические деформации часто встречаются вместе. Они сосредоточены в основном в нижней части образца, но прослеживаются и в верхних слоях.



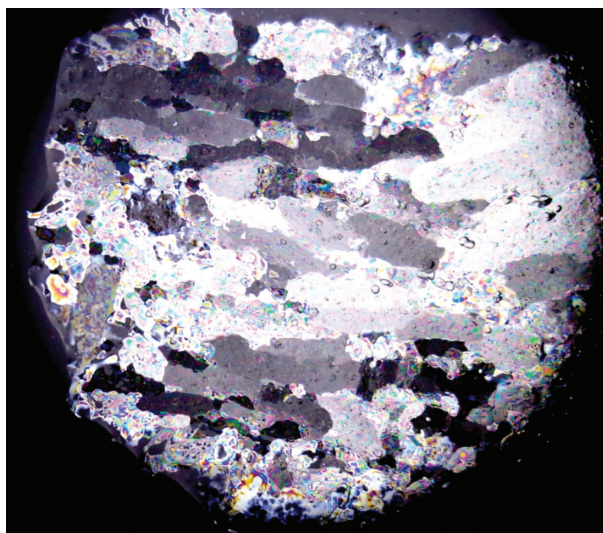
**Рис. 3.22. Локальные пластические деформации, которые маркируются соответствующими газонасыщенными образованиями. Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова**

В нижней части образца на контакте со штуцером подачи газа сформировалась веерообразная газонасыщенная зона высотой около 2 см и шириной 3–4 см, к которой приурочены радиально расходящиеся трещины (рис. 3.23).

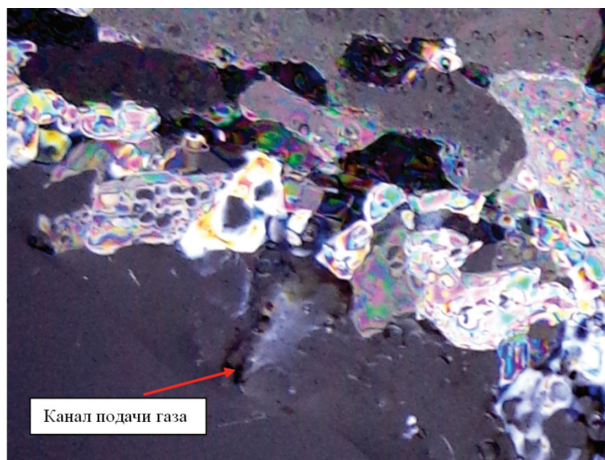
Съёмка структуры нижнего слоя льда в поляризованном свете показала наличие многочисленных следов пластических и разрывных деформаций (рис. 3.24). Наиболее значительные сплошные деформации льда наблюдаются в зоне, прилегающей к штуцеру подачи газа.



**Рис. 3.23.** Нижняя часть образца, примыкающая к штуцеру. Съёмка в отражённом свете. Фото А.Н. Хименкова

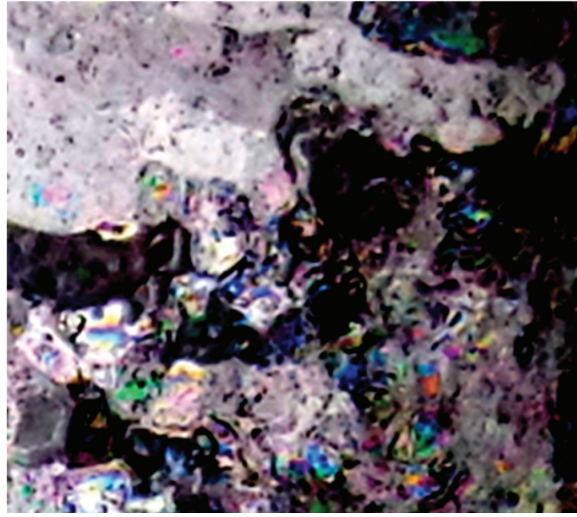


**Рис. 3.24.** Структура льда в нижнем слое льда. Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова

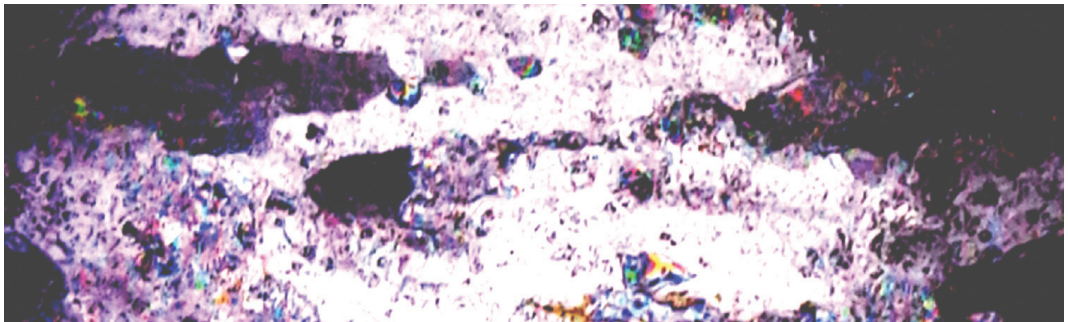


**Рис. 3.25.** Структура льда зоны льда, непосредственно примыкающей к штуцеру подачи газа. Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова

Хорошо виден канал подачи газа во льду, прилегающий к штуцеру подачи газа (рис. 3.25), в области канала сформировалась зона деформации льда с сильнодислоцированными, перемятыми и раздробленными кристаллами, к этой зоне с внешней стороны приурочена зона кристаллов с пластическими деформациями (рис. 3.26, 3.27). Видны пластические деформации кристаллов, волнообразные границы, вдавливание кристаллов друг в друга, будинаж трещины и зоны дробления, на контактах кристаллов цепочки воздушных включений.



**Рис. 3.26. Зона дробления и пластических деформаций. Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова**



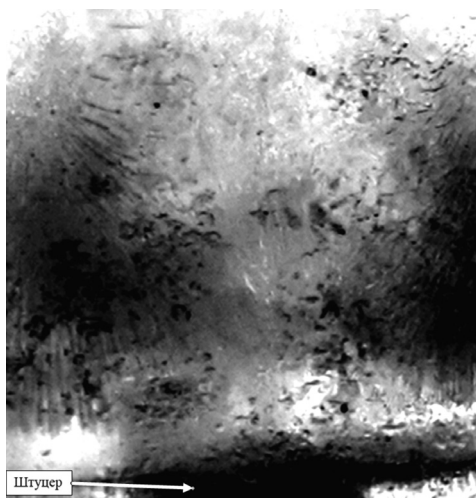
**Рис. 3.27. Зона дробления, будинажа и пластических деформаций. Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова**

Изучение образца льда с начальной минерализацией раствора 5 г/кг показало, что в отличие от образца с большей минерализацией фильтрация газа под давлением сопровождалась своим набором процессов. Это формирование нитевидных и червеобразных каналов, заполненных газовыми пузырьками, многочисленные трещины, пластические и разрывные деформации льда и газовых включений, зоны дробления, перестройка структуры льда, особенно заметная на контакте со штуцером подачи газа. Пластические деформации переходят в течение льда, с отрывом частей кристаллов (см. рис. 3.27).



### 3.7.2.3. Пресный лёд

Подготовка образца пресного льда проводилась при всестороннем промерзании дистиллированной воды в контейнере. Данная технология обусловила формирование центрального газонасыщенного ядра, протянувшегося на всю высоту образца. Концентрация газа в центре образца обуславливает создание здесь ослабленной зоны при подаче газа под давлением. Поэтому исследования были сосредоточены на изучении нижней части образца льда, непосредственно примыкающей к штуцеру подачи газа (рис. 3.28). Эта часть сформировалась при всестороннем промерзании воды в контейнере. Её отличительной особенностью является наличие вытянутых, радиально ориентированных пузырьков воздуха. Подача газа под напором 2,5 атм вызвала коренную перестройку данного слоя льда. Образовалась газонасыщенная зона, разрывающая первичный слой. Границы зоны резкие, с многочисленными разрывными и пластическими деформациями. По границе наблюдаются многочисленные трещины, изогнутые, вытянутые пузырьки газа, направление которых не совпадает с общим направлением газовых включений в первичном слое (рис. 3.28, 3.29).



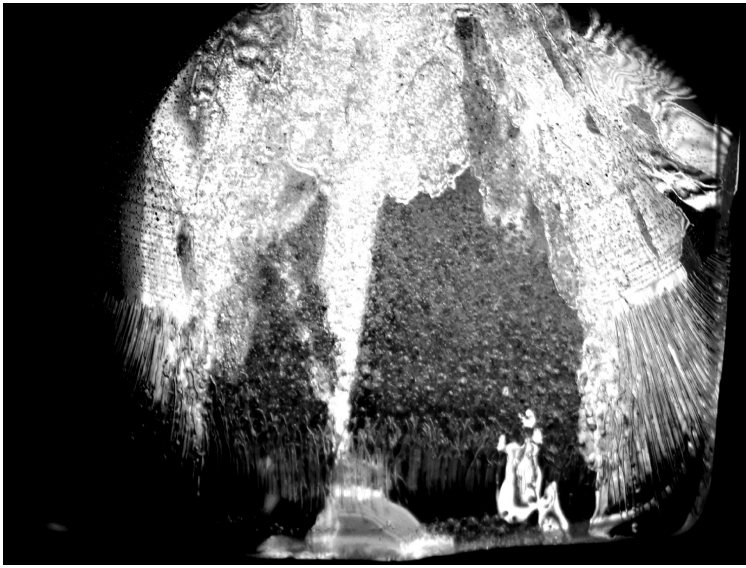
**Рис. 3.28. Морфология газонасыщенной зоны фильтрации газа, расположенной над штуцером подачи газа. Съёмка шлифа в проходящем свете.**

**Фото А.Н. Хименкова**

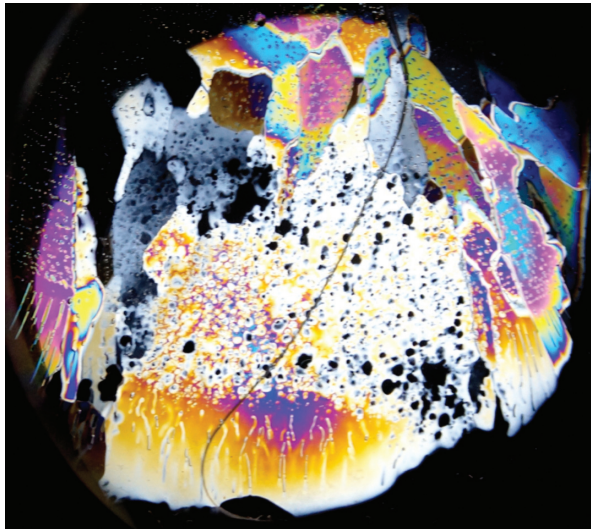
Структура льда зоны внедрения газа резко отличается от структуры первичного льда (см. рис. 3.29). Первичная параллельная слоистость, соответствующая цикличности льдообразования при первичном промерзании, нарушена. Границы кристаллов деформированы и частично разрушены.

На рис. 3.29, 3.30 показана структура льда на контакте со штуцером подачи газа. В центре зона прорыва газа слоя льда, примыкающего к штуцеру подачи газа. В центре фотографии обширная зона фильтрации газа и перестройки первичной структуры льда. В правой и левой части снимка видна первичная слоистость, связанная со всесторонним промерзанием воды в контейнере. В правой и левой нижней части снимка наблюдаются области фильтрации газа сквозь лёд. В центре нижней части снимка остатки первичного льда. Как и в предыдущем образце, фильтрация газа во льду сопровождается частичной и избирательной перестройкой структуры льда, пластическими и разрывными деформациями.





**Рис. 3.29. Структура нижней части образца в районе штуцера подачи газа. Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова**



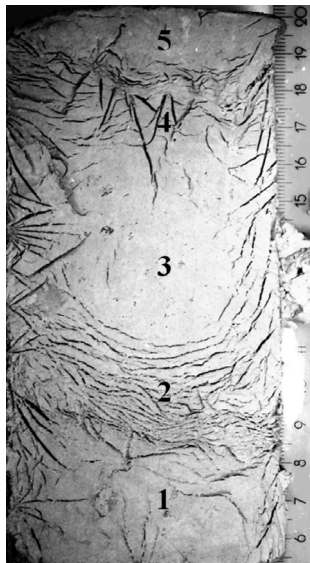
**Рис. 3.30. Структура нижней части образца в районе штуцера подачи газа. Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова**

### **3.7.3. Исследование фильтрации газа в грунтовых образцах**

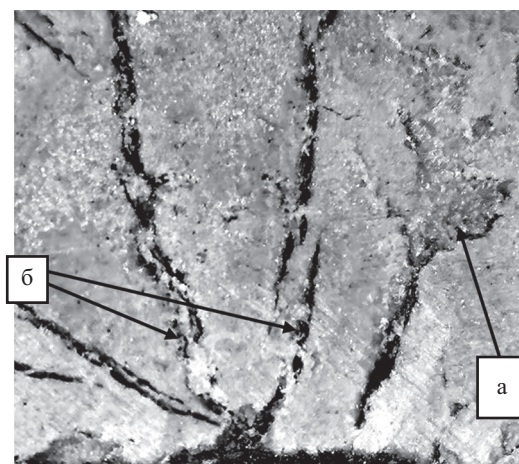
На первом этапе исследования фильтрации газа в мёрзлых грунтах при приготовлении образца использовался глуховецкий каолин с начальной суммарной влажностью около 50%, незначительно превышающей верхний предел пластичности.

В нижнем, 2–3-сантиметровом слое (рис. 3.31, слой 1) криотекстура преимущественно массивная. В районе контакта с газоподводящим штуцером наблюдаются субвертикальные, расходящиеся от центра слоистые текстуры, неполностью заполненные сублима-

ционным льдом (рис. 3.32, 3.33). Лёд в некоторых субвертикальных шлирах толщиной около 1 мм расположен отдельными зонами в виде мелких кристаллов размером около 0,1 мм. Наблюдается разделение субвертикальных шлиров на несколько более мелких, выраженных в виде изгибающихся полос в грунте. На участках, где плоскость субвертикального шлира совпадает с плоскостью среза образца, видна поверхность, покрытая мелкими угловатыми кристаллами (сублимационный лёд) (см. рис. 3.32).



**Рис. 3.31. Вертикальный срез образца каолина, подготовленного методом послойного намораживания. В центре нижнего края образца располагался штуцер подачи газа. 1–5 — слои с различным криогенным строением. Фото П.А. Соболева**

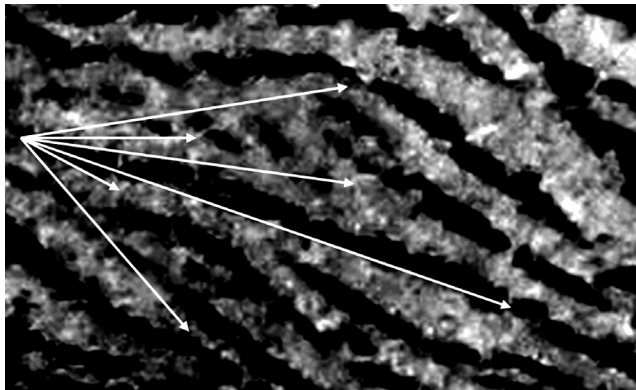


**Рис. 3.32. Нижняя часть образца (вертикальный срез), примыкающая к штуцеру подачи газа:  
а — сублимационный лёд, заполняющий трещину, ориентированную в плоскости среза; б — волнистые деформации вертикальных шлиров. Фото А.Н. Хименкова**



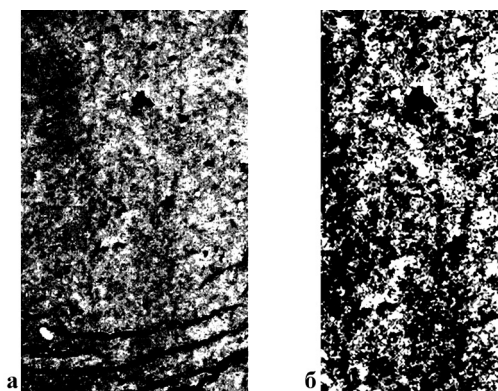
**Рис. 3.33. Криогенное строение нижней части образца каолина.**  
**Фото П.А. Соболева**

Выше слоя с массивной криотекстурой располагается слой толщиной 3–4 см со слоистой криотекстурой (рис. 3.33, 3.34, слой 2). Толщина шлиров льда до 1 мм, толщина грунтовых прослоев от 1 до 2–3 мм. Шлировые текстуры в центральной части образца ориентированы горизонтально. К краям угол наклона слоёв возрастает до 70–80° (см. рис. 3.31, 3.33). В зоне слоистых криотекстур наблюдается большое количество ветвящихся, искривлённых, субвертикально ориентированных каналов толщиной в доли миллиметра (см. рис. 3.34). Каналы разрывают шлиры льда и сдвигают их, не разрушая их общую ориентацию. Прослеживается связь каналов в слоистых текстурах с аналогичными образованиями в нижележащем слое (см. рис. 3.33).



**Рис. 3.34. Фильтрационные каналы, прорывающие первичные слоистые криогенные текстуры. Съёмка в отражённом свете. Фото А.Н. Хименкова**

Выше зоны слоистых криотекстур залегает слой с массивным криогенным строением толщиной 5–6 см (см. рис. 3.35, слой 3). После обработки снимков удалось выявить наличие многочисленных, вытянутых в вертикальном направлении каналов, связанных с каналами из ниже залегающих слоистых криотекстур (слой 2).



**Рис. 3.35. Фотография слоя массивной криотекстуры (слой 3) после обработки: а — фото всего слоя, в нижней части фотографии видны горизонтальные шлиры льда (слой 2); б — увеличенный фрагмент. Съёмка в отражённом свете. Фото А.Н. Хименкова**

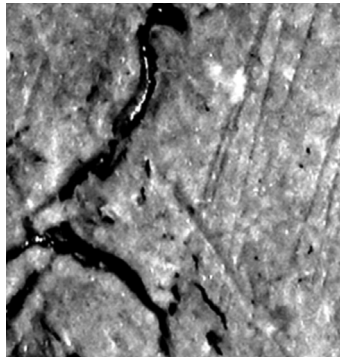
Над слоем с массивной криотекстурой залегает слой слоисто-сетчатых криотекстур толщиной 2–3 см (слой 4), перекрытый верхним слоем массивных криотекстур толщиной 1–2 см (слой 5). Оба этих слоя пронизаны многочисленными каналами. Каналы являются продолжением аналогичных образований, характерных для нижнего слоя массивной криотекстуры (рис. 3.36). Они пересекают границы между слоями, деформируют первичное криогенное строение. Часть из них приурочена к субвертикальным шлирам, часть представляет собой изогнутые, субвертикально ориентированные линейные образования толщиной в доли миллиметра, частично заполненные льдом или без льда (рис. 3.37). Они подходят непосредственно на поверхность образца.



**Рис. 3.36. Верхняя часть образца. Вертикальный срез. Слой слоисто-сетчатых криотекстур (слой 4) и перекрывающий его слой массивной криотекстуры (слой 5). Фото П.А. Соболева**

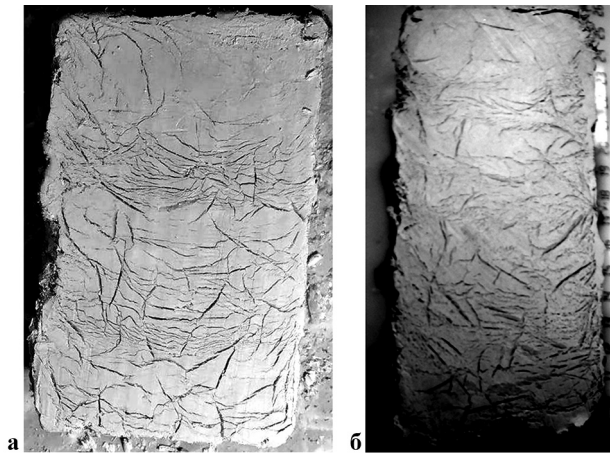
Был проведён эксперимент, при котором два образца каолина помещались в одну морозильную камеру и промораживались в одинаковых условиях. После промораживания и доведения температуры до  $-9^{\circ}\text{C}$  в один из них подавался газ с давлением  $4\text{ кг/см}^2$ . Затем температура в обоих образцах повышалась до значений, при которых начиналась фильтрация газа ( $-0,5^{\circ}\text{C}$ ).





**Рис. 3.37. Верхняя часть образца (фрагмент рис. 3.36). Деформированный субвертикальный шпир в верхней части образца с газовыми полостями. Фото А.Н. Хименкова**

Текстурные исследования показали, что первичное криогенное строение в обоих мёрзлых образцах в целом совпадает и представляет собой чередование зон слоистых, сетчатых и массивных криотекстур (рис. 3.38). Фильтрация газа в одном из образцов, не нарушая общий рисунок криотекстур, тем не менее, значительно повлияла на его строение.



**Рис. 3.38. Мёрзлые образцы каолина:**  
**а — образец без газа; б — образец с газом. Фото П.А. Соболева**

В образцах без газа шпирь льда имеют чёткие ровные границы с вмещающим грунтом (рис. 3.38, а, 3.39).

В нижней части газонасыщенного образца, вблизи штуцера подачи газа, общий рисунок ледяных шпиров сохраняется. При этом в грунте наблюдаются зоны пластических и разрывных деформаций, дробящих массив на отдельные блоки; вытянутые в субвертикальном направлении каналы, частично заполненные льдом (рис. 3.40). В нижней части образца, примыкающей к штуцеру подачи газа, грунт разрушен на отдельности размером 2–3 мм. Сам грунт усеян мелкими (доли мм) ячейками (рис. 3.29), представляющими собой углубления различной морфологии размером в доли миллиметра. В местах разрывных и пластических деформаций плотность распределения ячеек увеличивается (рис. 3.29).





Рис. 3.39. Вертикальный срез. Нижняя часть образца без газа. Фото П.А. Соболева

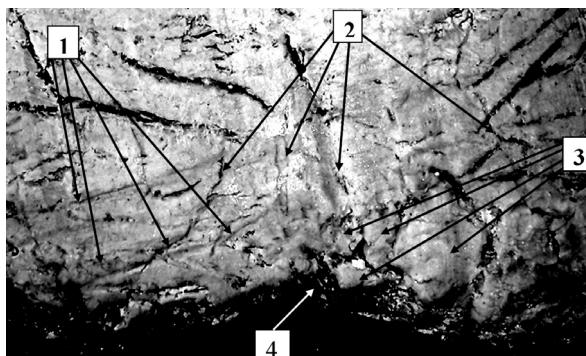


Рис. 3.40. Вертикальный срез. Нижняя часть газонасыщенного образца. Деформационные образования грунта вблизи штуцера подачи газа: 1 — пластические деформации; 2 — трещины; 3 — грунтовые блоки, разделённые трещинами; 4 — место контакта штуцера с грунтом. Фото А.Н. Хименкова

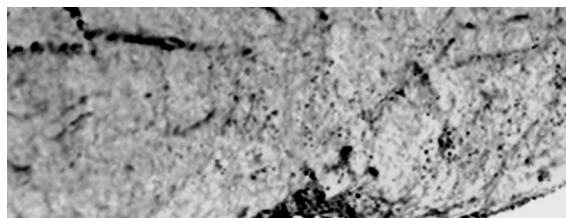


Рис. 3.41. Распределение газовых включений в нижней части образца. Фото А.Н. Хименкова

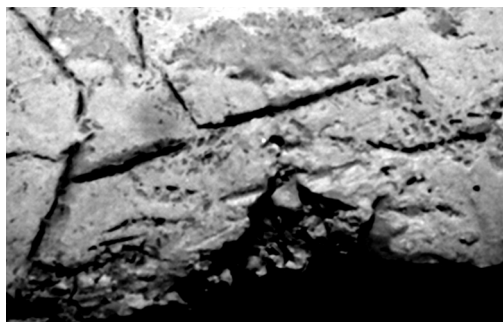


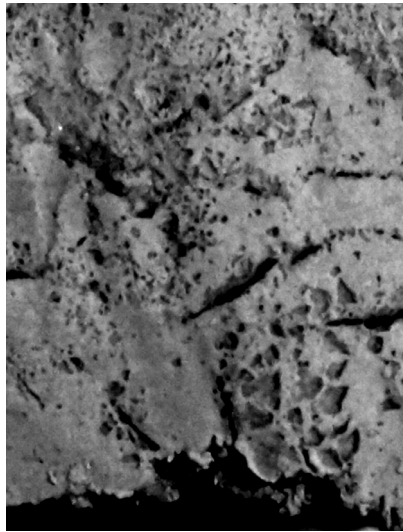
Рис. 3.42. Фрагмент рис. 3.41. В зоне примыкания штуцера наблюдается дробление грунта. Фото А.Н. Хименкова

Наблюдается серия субвертикальных каналов и приуроченных к ним газовых ячеек угловатой формы (рис. 3.41, 3.42). Многие ячейки имеют коническую форму, при этом заострённая часть направлена вверх (рис. 3.43). И сгущение ячеек, и их форма и ориентация свидетельствуют о том, что мелкие газовые пузырьки проникали в грунт под давлением снизу.



**Рис. 3.43. Фрагмент рис. 6.28. Срез в плоскости субвертикального шлира. Фото А.Н. Хименкова**

Срез грунта, сделанный в горизонтальной плоскости, показал, что непосредственно вблизи штуцера наблюдается уменьшение ячеек по мере удаления от штуцера. Конические ячейки, ориентированные острой частью по направлению от штуцера, сменяются веерообразными структурами (рис. 3.44). Данное распределение и морфология ячеек также иллюстрируют вектор давления газа в горизонтальном направлении, обращённый в сторону от штуцера.



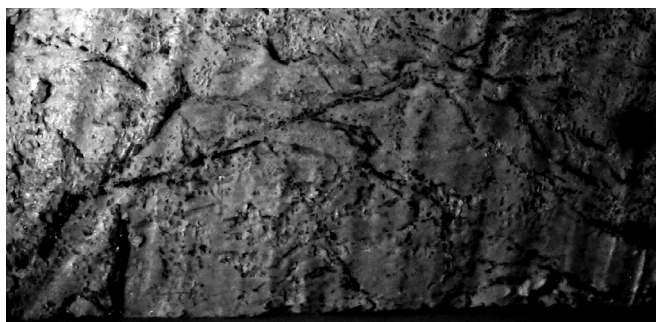
**Рис. 3.44. Горизонтальный срез в нижней части образца с газом в зоне, примыкающей к контакту штуцера подачи газа и грунта. Фото А.Н. Хименкова**

На расстоянии 3–5 см количество газовых включений резко возрастает (рис. 3.45). Ячейки равномерно распространены как вблизи шлиров, так и по всему массиву образца.

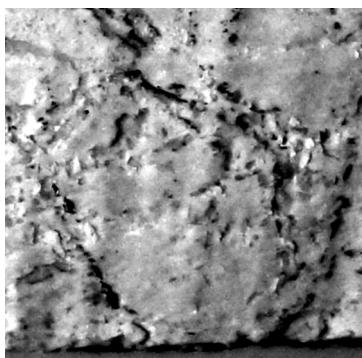
На расстоянии 4 см от нижнего края образца в горизонтальном срезе помимо прямых ледяных шлиров наблюдаются многочисленные извилистые каналы, фрагментарно заполненные льдом со следами пластических деформаций, к которым приурочены мелкие ячейки (рис. 3.46, 3.47).



**Рис. 3.45. Вертикальный срез на расстоянии 3–5 см от нижнего края.  
Фото А.Н. Хименкова**

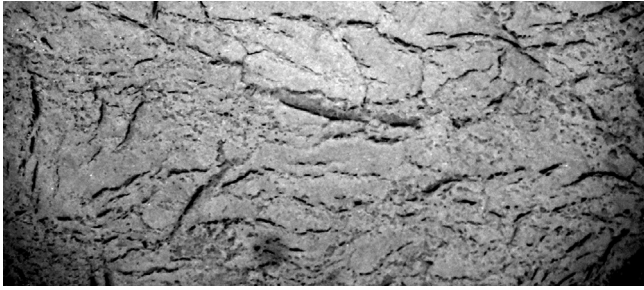


**Рис. 3.46. Горизонтальный срез в нижней части образца с газом в 4 см  
от штуцера подачи газа. Фото А.Н. Хименкова**



**Рис. 3.47. Увеличенный фрагмент рис. 6.33. Горизонтальный срез.  
Извилистые каналы и мелкие шлиры со следами пластических деформаций.  
Фото А.Н. Хименкова**

В средней части образца, насыщенного газом, наблюдается дифференциация в распределении ячеек. Содержание газовых включений в центральной зоне уменьшается, в краевых частях остаётся высоким (рис. 3.48).

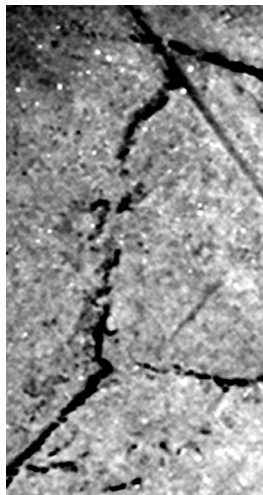


**Рис. 3.48. Вертикальный срез. Средняя часть образца с газом. Фото П.А. Соболева**

В слое с массивной криотекстурой, расположенной в верхней части образца, газовые включения приурочены в основном к вертикальным ледяным шлирам. В грунте наблюдаются локальные пластические деформации, представляющие собой волнистые или петлеобразные нитевидные образования (рис. 3.49, 3.50).



**Рис. 3.49. Вертикальный срез. Верхняя часть образца с газом. Фото П.А. Соболева**



**Рис. 3.50. Фрагмент рис. 3.49. Строение вертикального шлира. Фото А.Н. Хименкова**



В средней части образца без газа ледяные шлиры сохраняют ту же морфологию, что и в нижней части. Границы шлиров ровные, чёткие (рис. 3.51). Какие-либо ячеистые структуры не наблюдаются.



**Рис. 3.51. Вертикальный срез. Средняя часть образца без газа. Фото П.А. Соболева**

Шлиры в верхней части образцов без газа имеют субвертикальную ориентировку, чёткие резкие границы с вмещающим грунтом. На участках массивного сложения поверхность среза ровная, без признаков деформаций и ячеек (рис. 3.52).



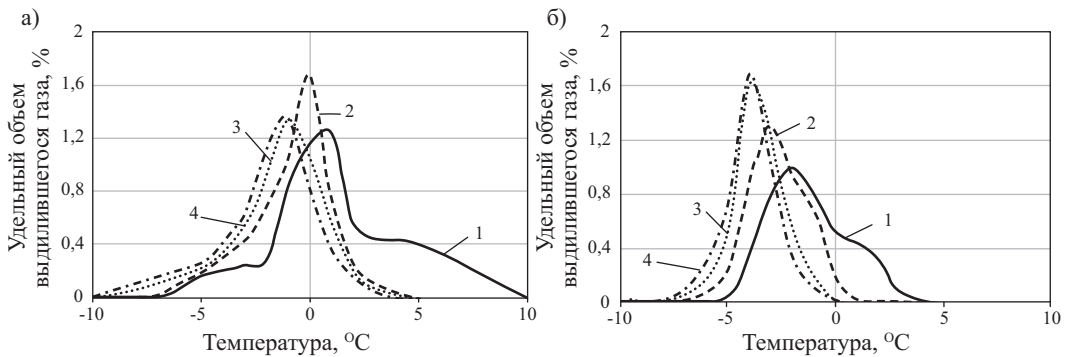
**Рис. 3.52. Вертикальный срез. Верхняя часть образца без газа. Фото П.А. Соболева**

### **3.7.4. Изучение динамики выделения газа из мёрзлых грунтов при изменении температуры и давления**

Сотрудниками Лаборатории грунтоведения Института геоэкологии РАН было проведено изучение динамики газовыделения из мёрзлых грунтов [Карпенко и др., 2020]. Исследования проводились на грунтах южной части полуострова Ямал. Эксперименты проводились на пылеватых песках нарушенного сложения и суглинках естественного сложения. Естественная влажность пылеватых песков составляет 24–26%, плотность 1,90–1,91 г/см<sup>3</sup>, степень льдонасыщения 0,88...0,92. Суглинки представлены тугопластичной и полутвердой разновидностями с естественной влажностью 21–30%, плотностью 1,90–2,04 г/см<sup>3</sup>, числом пластичности 10–15%, степенью льдонасыщения 0,91–0,93 (таблица). Экспериментальные исследования проводились в приборах трёхосного сжатия. Конструкция приборов обеспечивает возможность герметизации образца грунта при проведении испытаний, приложения к нему заданного объёмного давления и дренажа выделяющихся в ходе опыта газов через специальный канал. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.53. В ходе испытаний удалось выяснить, что внешние нагрузки оказывают значительное влияние на процесс газовыделения в мёрзлых грунтах при повышении температуры. В песчаных грун-



тах температура начала выделения газовых включений при повышении величины объёмного сжимающего давления постепенно снижается до  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (при давлении 0,2 МПа). Наибольшая интенсивность газовыделения наступает при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  при давлении 0,05 МПа,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  при 0,1 МПа и  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  при 0,2 МПа. При этом динамика выделения газа при действии сжимающих нагрузок имеет более выраженный пик максимальной интенсивности газовыделения, и газовыделение прекращается при более низкой температуре. В суглинках температура начала выделения газа постепенно снижается при росте величины объёмного сжимающего давления от  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  при давлении 0,05 МПа до  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  при давлении 0,2 МПа. Наибольшая интенсивность газовыделения наступает при температуре  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  при давлении 0,05 МПа,  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  при 0,1 и 0,2 МПа. При этом максимум объёма выделяющихся газов возрастает при увеличении сжимающего давления.



**Рис. 3.53. Зависимость объёма газа, выделившегося под действием сжимающих нагрузок (1 — 0,001 МПа, 2 — 0,05 МПа, 3 — 0,1 МПа, 4 — 0,2 МПа), от температуры:**  
**а — пылеватый песок; б — суглинок [Карпенко и др., 2020]**

### 3.7.5. Обсуждение результатов лабораторного моделирования миграции газа сквозь льды и мёрзлые породы

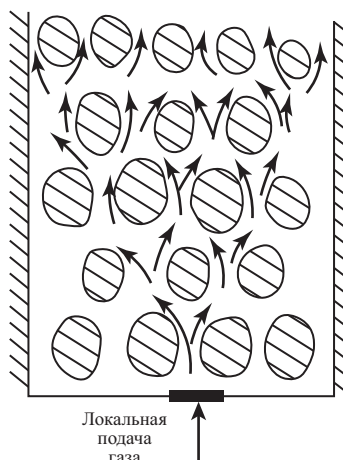
В ходе проведённых исследований впервые удалось зафиксировать фильтрацию газа сквозь льды и мёрзлые грунты и изучить сопровождающие её процессы. Было установлено, что фильтрация газа во льдах и грунтах происходит только при определённых соотношениях давлений и температур. При температуре  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне давлений газа  $1\text{--}4\text{ кг/см}^2$ , в которых проводились эксперименты, фильтрация не наблюдалась. Только при повышении температуры до значений, близких к области фазовых переходов, она начинала проявляться. Соотношения давлений газа и температуры образца, при которых начиналась фильтрация газа, у каждого грунта были разными. В образцах льда с засолённостью  $20\text{ г/кг}$  фильтрация происходила при температуре  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении  $1\text{ кг/см}^2$ . В образце с засолённостью менее  $5\text{ г/кг}$  и образце пресного льда фильтрация начиналась при давлении  $2,0\text{--}2,5\text{ кг/см}^2$ . В образце каолина давление газа, при котором была зафиксирована фильтрация, составляло  $4\text{ кг/см}^2$ , при этом температура образца была  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Изучение мёрзлых образцов каолина, подвергшихся напорному воздействию газа, показало, что в них при пропускании газа под давлением формируются многочисленные разрывные и пластические деформации. Наиболее выражены они вблизи штуцера подачи газа. При этом по всей высоте образцов формируется сеть субвертикально ориентирован-

ных каналов, берущих своё начало из зоны примыкания штуцера к грунту. Отдельные каналы прослеживаются на всю высоту образцов, большинство прослеживается фрагментарно. Морфология каналов различна, в некоторых случаях они представляют собой полости, частично заполненные мелкими кристаллами льда, в других выражаются в виде вытянутых углублений на поверхности образца, иногда они выделяются в виде более светлых или тёмных полос, вытянутых в вертикальном направлении. Каналы могут рассекать ледяные шпирь или формировать вытянутые газовые полости вдоль ледяного шпиря. При всем разнообразии форм каналы образуют единую систему, неравномерно пронизывающую образцы каолина снизу доверху. Важно отметить, что границы намораживаемых при подготовке образца слоёв не являются преградой для выделяемых каналов, они без разрывов переходят из слоя в слой.

Проведённые исследования позволяют сделать некоторые предварительные выводы. Подача газа под давлением приводит к возникновению локальных деформаций, по которым разрозненные потоки газа в виде мелких пузырьков (в доли мм) расходятся от центра, где находится штуцер, к краевым частям образца. От сформировавшейся системы субвертикальных ветвящихся каналов пузырьки газа распространяются по всему массиву образца. Движение газовых пузырьков представляется в виде хаотических колебаний, способствующих выбору наиболее ослабленных зон. Поэтому образовавшиеся каналы имеют изогнутую, червеобразную форму. В высокотемпературных условиях (температура образца около  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) лёд является более твёрдым компонентом по сравнению с мёрзлым грунтом, поэтому первичный рисунок ледяных шпиров в целом сохранился, хотя первичные ледяные элементы частично и были деформированы. При этом на контактах ледяных шпиров с грунтом наблюдается увеличение количества газовых ячеек

Механизм распределения газового потока в мёрзлом грунте подобен механизму гидравлической дисперсии, процессу рассеивания вещества в пористой или трещиноватой среде на границе жидкостей с разными концентрациями [Ленченко, 2004]. Оба процесса обусловлены неоднородностью поля скоростей движения вещества, обусловленной извилистостью поровых каналов в породе и разной площадью их реального сечения (рис. 3.54). Можно предположить, что при движении газа сквозь мёрзлые образцы будут развиваться схожие процессы.



**Рис. 3.54. Рассеивание газа в мёрзлом грунтовом образце, подаваемого из локального источника (с использованием материалов [20])**

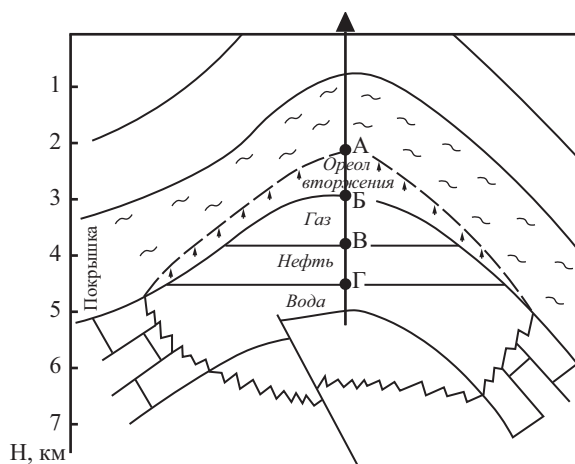
Повышение температуры в тонкодисперсном грунте до значений, близких к фазовым переходам, приведёт к резкому возрастанию в нем незамёрзшей воды. Вследствие этого воздействие газа, находящегося под давлением, не только вызовет локальные деформации мёрзлого грунта и ледяных элементов, но и может воздействовать на рыхлосвязанную воду. Согласно представлениям В.М. Гольдберга и Н.П. Скворцова, в глинах связанная вода заполняет весь объём мелких пор и большую часть крупных. Под воздействием приложенного давления связанная вода «продавливается». Такое продавливание начинается в крупных порах, т. е. той части воды, которая наименее связана с твёрдой поверхностью. По мере увеличения перепада давления в движение будет вовлекаться и более связанная вода в мелких порах [Гольдберг, Скворцов, 1986].

А.Х. Мирзаджанзаде, М.М. Хасановым и Р.Н. Бахтизиным был доказан факт перетока газа при разработке газовых месторождений в первоначально непроницаемых пластах. Механизм фильтрации газа в этом случае представляется следующим. В газонасыщенных породах с высоким содержанием воды, удерживаемой за счёт капиллярных сил, поровые каналы перекрыты водяными барьерами, а газ находится в диссипированном состоянии. До достижения некоторого порогового предельного значения перепада давления движения газа через пористую породу не происходит. При перепаде давления, превышающего пороговое, части барьеров, представленные рыхлосвязанной водой, деформируются и открывают часть поровых каналов для фильтрации [Мирзаджанзаде и др., 1999]. В мёрзлых породах барьером является промерзание воды в капиллярах породы. После повышения температуры породы до значений, соответствующих интенсивным фазовым переходам, количество рыхлосвязанной воды в капиллярах резко возрастает. Газ, находящийся под давлением, частично продавливая и отжимая её, мигрирует в массиве образца. Данный механизм объясняет некоторые элементы наблюдаемого криогенного строения образцов, подвергшихся воздействию напорного газа. Возможно, ледяные прерывистые, волнистые образования, частично заполняющие вертикальные трещины, сформировались при оттаивании и замерзании рыхлосвязанной воды (рис. 6.31, 6.33, 6.34) в области сброса давления. В низкотемпературных образцах количество незамёрзшей воды минимально, и применяемые в опытах давления ( $2\text{--}4\text{ кг/см}^2$ ) не в состоянии протолкнуть газ сквозь грунт. При повышении температуры до значений, близких к фазовым переходам, количество незамёрзшей воды резко возрастает, и используемые давления позволяют газу, выжимая наименее связанную воду, по образовавшимся каналам двигаться в объёме мёрзлой породы. В этом случае следует предположить формирование вытянутых или ветвящихся каналов.

Наши эксперименты хорошо коррелируются с данными, полученными исследователями кафедры геофизиологии МГУ им. М.В. Ломоносова. К мёрзлому образцу льдонасыщенного суглинка (при  $t -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), который был жёстко закреплён и не имел возможности деформироваться (распучиваться), подводилась под давлением вода. В этом случае при гидростатическом давлении инъецируемой воды  $2\text{--}3\text{ кг/см}^2$  на противоположном верхнем конце образца наблюдалось выдавливание пленочной (незамёрзшей) воды, которая затем замерзала, образовав на поверхности образца прослой льда толщиной до 1 см за период эксперимента 3–5 сут. [Основы геофизиологии. Ч. 1..., 1995].

Газ, подаваемый в нижнюю часть образца, в начале действует на грунт (лёд) как своеобразный штамп. В слое грунта (льда), примыкающем к штуцеру, формируется зона с многочисленными пластическими и разрывными деформациями. Сплошной поток газа в данной зоне трансформируется и по системе трещин и деформаций в грунте поступает в вышележащие слои в виде мелких ветвящихся флюидов. Сформировавшаяся вблизи шту-

цера подачи газа область аналогична ореолу вторжения жидких и газовых флюидов, внедряющихся в вышележащую толщу из области аномально высокого пластового давления. Здесь образуется как бы сильно раздутый «желвак» аномально высокой упругоёмкости среди нормально уплотнённых пород. В ореоле вторжения, как и в зоне грунта, примыкающей к штуцеру подачи газа, увеличивается пористость, уменьшается плотность, повышается газонасыщенность. Мёрзлый грунт здесь сильно деформирован, разбит трещинами и зонами пластических деформаций.



**Рис. 3.55. Схема строения зоны аномально высокого пластового давления [Аникеев, 1971]**

Выше зоны внедрения в образце возникает постепенно увеличивающаяся зона непрерывного фильтрационного потока общей направленности, в котором газ движется из области с большим давлением в область с меньшим давлением. Сформировавшееся фильтрационное пространство неоднородно, в различных его частях возникают локальные градиенты давления, обуславливающие изменения направления движения отдельных газовых струй. При этом образуется сеть расходящихся от центра (точка нахождения штуцера, подающего газ) веерообразных каналов. Подобные образования наблюдаются при воздействии газа на вязкую жидкость. А.В. Шнайдером описано формирование в модели пористой среды «язычков» — древовидных структур, образуемых газовой фазой при вытеснении газом жидкости. В этом случае формируются вытянутые газовые «ветвящиеся отростки», возникающие за счёт неустойчивости фронта вытеснения вязкой жидкости газом [Шнайдер, 2006]. В ходе проведения экспериментов в горизонтальных срезах была обнаружена сеть остроконечных ячеек, образовавшихся вблизи штуцера, ориентированных вершинами острых углов в направлении от штуцера. Размеры ячеек по мере удаления от штуцера уменьшаются, а затем сменяются веерообразными образованиями, состоящими из тонких расходящихся каналов. Аналогичные остроконечные ячейки, тоже ориентированные острым углом в противоположную от штуцера сторону, обнаружены и в вертикальном шлере. Рисунок газовых ячеек иллюстрирует движение газовых пузырьков, проталкиваемых под давлением сквозь мёрзлый грунт. Газ, подаваемый в нижнюю часть мёрзлого грунтового образца, вследствие извилистости поровых каналов и разной площади их реального сечения будет рассеиваться, искать наиболее слабые зоны и продавливаться по ним. При этом формируются ветвящиеся отростки и древовидные формы, аналогичные описанному выше воздействию газа на вязкую жидкость.

В изучении фильтрации газа получены первые результаты, которые позволяют сформулировать некоторые предварительные выводы.

Газ начинает фильтроваться, если обеспечены определённые соотношения давления газа и прочности вмещающих пород. Вопрос о возможности фильтрации газа сводится в конечном итоге к анализу условий возникновения давлений газа, обеспечивающих деформацию породы хотя бы на локальном участке. Как известно, прочность многолетнемёрзлых пород и льдов в значительной мере определяется температурой. Свойства высокотемпературных мёрзлых пород резко отличаются от низкотемпературных. При повышении температуры в мёрзлых породах начинает развиваться система парагенетически связанных процессов: увеличение содержания незамёрзшей воды, появление рассольных ячеек, формирование микротрещин за счёт неравномерных тепловых деформаций минерального скелета и льда, объёмного изменения газовых включений. С увеличением температуры давление «защемлённого» газа в порах будет расти. Это приведёт к дополнительным деформациям минерального скелета или льда [Роман и др., 2017; Роман, 2002]. Установлено, что при повышении температуры в мёрзлых породах одна и та же величина относительной деформации достигается при более низком напряжении. Например, при повышении температуры от  $-20$  до  $-5$  °C аналогичных величин деформаций можно достичь при напряжениях, меньших в 3–4 раза [Ершов, 1990]. Породы переходят из категории твёрдомёрзлых в пластичномёрзлые, при этом газопроницаемость многолетнемёрзлых пород и льдов резко возрастает. Возникающие под воздействием повышающегося внутреннего давления пластические и разрывные деформации создают в толще породы ослабленные зоны, по которым начинается перемещение газового флюида. Проникая в породу, газ, находящийся под давлением, продолжает процесс её разрушения и деформирования. Постепенно формируется фильтрационно-деформационная зона, продвигающаяся от зоны повышенного давления вглубь массива породы.

Миграция газа в мёрзлых породах осуществляется путём фильтрационно-деформационного механизма. Он заключается в совместном взаимодействии двух групп процессов. Под воздействием повышенного давления газа (причины возникновения самого давления в данном случае не рассматриваются) в массиве мёрзлой породы (льда) под влиянием комплекса процессов развивается система парагенетически связанных деформаций (ослабленных зон). Газ под давлением проникает вглубь породы, расширяет ослабленные зоны. Это приводит к образованию трещин и зон локальных пластических деформаций, что, в свою очередь, вызывает усиление фильтрации и т. д. При этом массив грунта в целом сохраняет первичное строение, поскольку при фильтрации газа происходят только локальное смещение и трансформация его отдельных элементов. Например, в образце каолина шлировые текстуры оказались локально разорваны и в местах разрывов немного сдвинуты, но общий рисунок криогенного строения не изменился.

Если мёрзлая порода содержит газ, находящийся под давлением, то, как показали наши лабораторные исследования, он начинает фильтроваться даже сквозь льдонасыщенный грунт. В результате проведённых экспериментов было установлено, что фильтрация газа в мёрзлых образцах обусловлена различными процессами и реализуется при разных давлениях. Фильтрационно-деформационный механизм может реализовываться при незначительных давлениях газа (в наших опытах  $2\text{--}4$  кг/см<sup>2</sup>).

В образцах льда с засолённостью  $20$  г/кг фильтрация начиналась при температуре  $-3$  °C и давлении  $1$  кг/см<sup>2</sup>. В этом случае фильтрация осуществлялась в виде газлифтового механизма. При высокой минерализации воды во льду формируются многочисленные рас-



сольные ячейки. При низких отрицательных температурах ячейки разъединены, поэтому фильтрация газа при используемых в экспериментах давлениях не происходит. При повышении температуры рассольные ячейки начинают сливаться, образуя сеть соединяющихся каналов. Двигающийся пузырёк газа, толкая перед собой жидкость, выдавливает её наверх. Формируется газово-жидкостный поток, переносящий жидкость в область меньшего давления. Вследствие этого механизма на поверхности образца из выдавленной воды сформировался слой рыхлого засолённого льда [Хименков и др., 2019]. При промерзании засолённых осадков формируются структуры, в которых незамёрзшая вода скапливается в центре порового пространства, формируя каналы в структуре замёрзшего грунта (рис. 43а). Вместе с пузырьками воздуха, включёнными в состав мёрзлых пород, система каналов незамёрзшей воды создаёт своеобразную транспортную сеть (рис. 43б), обеспечивающую движение углеводородов внутри мерзлоты. Под воздействием высокого давления восходящего потока газа нарушается сплошность мерзлоты и формируются каналы утечки газа [Шахова, Семилетов, 2014].

В образце с засолённостью менее 5 г/кг и образце пресного льда фильтрация происходила при температуре около  $-2^{\circ}\text{C}$  и давлении 2,0–2,5 кг/см<sup>2</sup>. При этих условиях наблюдается развитие многочисленных разрывных и пластических деформаций, зон дробления, сколов, трещин. Структура кристаллов локально была значительно перестроена. При удалении от источника газа фильтрация осуществляется преимущественно в виде искривлённой цепочки газовых пузырьков. Пузырьки газа, находящегося под давлением, выбирают ослабленные зоны и проникают по ним вглубь образца. По проделанному каналу поступают следующие пузырьки. В результате формируется сеть многочисленных изгибающихся, соединяющихся и ветвящихся газовых каналов, имеющих общее направление вверх. В местах, где движение газовых пузырьков затруднено, происходит их накопление и развитие каналов и полостей червеобразной формы.

В образце каолина давление газа, при котором была зафиксирована фильтрация, составляло 4 кг/см<sup>2</sup>, при этом температура образца была  $-0,5^{\circ}\text{C}$ . В результате формируется сеть многочисленных изгибающихся, соединяющихся и ветвящихся газовых каналов, имеющих общее направление, пронизывающих мёрзлый массив и деформирующих ранее сформировавшиеся криотекстуры. Сами газонасыщенные зоны имеют различную морфологию: вытянутые цепочки газовых пузырей, изометричные скопления газовых пузырей, вытянутые газовые полости, сотовые газовые структуры, разделённые ледогрунтовыми оболочками. При высоком содержании незамёрзшей воды газ, находящийся под давлением, может выдавливать наименее связанную воду в область меньших давлений, где она замерзает, после чего процесс повторяется. В результате формируются извилистые каналы, к которым приурочены вытянутые изогнутые ледяные элементы, чередующиеся с газонасыщенными участками.

## Выводы

При неравномерном промерзании в результате криогенного напора на границе мёрзлых и талых пород происходит перераспределение воды и газа, вследствие чего возникают области аномально высоких давлений, формирующих флюиды из водонасыщенного грунта, воды и газа, проникающие в сформировавшиеся мёрзлые породы.

Нагрев многолетнемёрзлых пород до температур, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ , обуславливает ослабление структурных связей в них и, как следствие, уменьшение их прочности. При этом могут получить развитие различного рода процессы в виде вязкопластического тече-

ния льда и ледогрунта, появления линз и слоёв минерализованных вод и их внедрения во вмещающие породы, фильтрации напорных газовых флюидов. В результате формируются новые геологические тела — криогенные газодинамические геосистемы.

Диссоциация газовых гидратов создаёт локальное повышение давления в толще пород, которое реализуется в напорных процессах (фильтрации, пластических и разрывных деформациях, течении льда, взрывах и др.).

Разработка флюидодинамического подхода в геокриологии необходима для проведения палеогеографических реконструкций и создания криостратиграфических реперов. До сих пор не разработана система показателей, позволяющих чётко разделить внутригрунтовые и погребённые льды и ледогрунты.

Разработка флюидодинамического направления обуславливает необходимость рассмотрения нетрадиционных для геокриологии объектов, связанных с флюидными образованиями в криолитозоне. Разработку данного направления затрудняет отсутствие соответствующей понятийно-терминологической базы, разработанных классификаций, систематизированных признаков.

В качестве первоочередных задач мы видим разработку следующих конкретных аспектов проблемы:

- выделение и систематизация новых для геокриологии — «флюидогенных» объектов (флюиды, геофлюидная система, каналы транзита флюидов, флюидная разгрузка);
- изучение закономерностей распределения «флюидогенных» образований в криолитозоне;
- выявление роли флюидов в общей систематике многолетнемёрзлых пород;
- изучение взаимодействия флюидов с вмещающими криогенными породами;
- создание системы частных математических моделей, описывающих ФДС с возможностью построения в будущем общей модели;
- разработка методов изучения и моделирования криогенных флюидодинамических геосистем;
- изучение условий возникновения потоков флюидов различного генезиса при техногенном воздействии на многолетнемёрзлые породы.

В ходе лабораторных исследований было установлено:

- газонепроницаемые при низких отрицательных температурах мёрзлые грунты в ходе повышения температуры, до определённых границ (для каждого вида грунта границы будут индивидуальны) оставаясь в мёрзлом состоянии, начинают пропускать газ под давлением;
- фильтрация газа в мёрзлых образцах и льдах обусловлена различными процессами:
- в засолённом льду с многочисленными рассольными ячейками миграция газа реализуется путём газлифтового механизма. Двигающийся пузырёк газа толкает перед собой жидкость, при этом формируется газово-жидкостный поток, переносящий жидкость в область меньшего давления; в пресном льду газ, находя ослабленные зоны, проникает по ним и образует цепочки газовых пузырьков, постепенно уменьшающихся в сторону меньших давлений; там, где проникновение газа затруднено, газовые пузырьки сливаются и образуют скопления червеобразных и ветвящихся каналов; давление газа деформирует и частично разрушает первичное строение льдов и мёрзлых грунтов, образуя зоны пластических деформаций и разрывных нарушений;
- в ходе фильтрации в мёрзлых грунтах формируются новообразования, представляющие собой газовые включения различной морфологии и размеров;

- изучаемые в лабораторных условиях процессы миграции газа в образцах мёрзлого грунта обусловлены фильтрационно-деформационным механизмом, заключающимся в совместном действии процессов деформации пород под давлением и фильтрации газа по формирующимся при этом ослабленным зонам;
- комплекс парагенетически связанных фильтрационно-деформационных процессов, создавая локальные зоны повышенной проницаемости, обуславливает резкое усиление миграции газовых флюидов в мёрзлых породах;
- миграция газов при повышении температуры в образцах мёрзлых грунтов (в диапазоне отрицательных значений) может происходить при высокой льдистости и различном криогенном строении.

Результаты, полученные в ходе лабораторного изучения фильтрации газа в мёрзлом грунте, хорошо коррелируются с данными о мерзлотных образованиях, связанных с фильтрацией газа в многолетнемёрзлых породах при формировании воронок газового выброса [Хименков, Станиловская, 2018; Хименков и др., 2018].

Полученные результаты имеют важное теоретическое и практическое значение в понимании процессов, происходящих в криолитозоне при локальном или глобальном повышении температуры за счёт естественных или техногенных воздействий. В этом случае в многолетнемёрзлых породах получают развитие две группы процессов. Одна уменьшает прочность пород за счёт увеличения количества связанной воды, появления рассольных ячеек, развития деформаций при тепловом расширении и др. Другая связана с усилением воздействия на мёрзлые породы содержащихся в них газов, имеющих различный генезис: биохимический газ, содержащийся в газовых карманах; газ, выделяющийся при разложении газогидратов (биохимический, катагенетический (термогенный) или смешанный); катагенный газ, поступающий с больших глубин, и др. При достижении давлений, превышающих предел прочности высокотемпературных многолетнемёрзлых пород, в них развиваются деформации, по которым и происходит фильтрация газа. Данные процессы ещё не изучены в полной мере. Проведённые эксперименты показали, что лабораторное моделирование фильтрации газа в мёрзлых породах является эффективным методом изучения данного природного явления. Дальнейшие исследования позволят продвинуться в понимании проблем, связанных с развитием взрывных процессов (выбросов газа) при бурении скважин в многолетнемёрзлых породах, выбросов углеводородных газов на шельфе арктических морей, формированием воронок газового выброса, поступлением парниковых газов в атмосферу в арктической зоне.

## Библиография

1. Абдрахимов М.З., Траскин В.Ю., Перцов Н.В. и др. Исследование разуплотнения кристаллических пород сверхглубоких скважин методами физико-химической механики // Глубинное строение и геодинамика кристаллических щитов европейской части СССР. Апатиты, 1992. С. 128–136.
2. Аникеев К.А. Прогноз сверхвысоких пластовых давлений и совершенствование глубокого бурения на нефть и газ. Л.: Недра, 1971. 168 с.
3. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II, № 4. С. 42–50.
4. Бешенцев В.А. Пресные подземные воды Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона (формирование химического состава и техногенная трансформация): автореф. ... дис. д. Тюмень, 2009. 24 с.

5. Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Ч. 2 //
6. Бурение и нефть. 2014. № 10. С. 4–8.
7. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н., Никонов Р.А., Сизов О.С. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озёрах // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2 (34). С. 31–47.
8. Бордуков Ю.К. Геохимические поля в криолитозоне западной части Енисей-Хатангского прогиба в связи с поисками нефти и газа: автореф. дис. ... к. г.-м. н. М.: ВНИИ-ЯГГ, 1985. 24 с.
9. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на Крайнем Севере. Л.: Госстройиздат, 1963. С. 492.
10. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР: справочник / под ред. д. г.-м. н. Л.М. Зорькина. М.: Недра, 1989. 382 с.
11. Вялов С.С. Реологические свойства и несущая способность мёрзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 191 с.
12. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 160 с.
13. Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Полякова Е.И. Температура, состав и возраст отложений шельфа Карского моря в районе геокриологического стационара Марре-Сале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 4. С. 3–16.
14. Загоровский Ю.А. Роль флюидодинамических процессов в образовании и размещении залежей углеводородов на севере Западной Сибири: автореф. дис. ... к. г.-м. н. Тюмень, 2017. 23 с.
15. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М.: Стройиздат, 1988. 352 с.
16. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Недра, 1990; 2002. 450 с.
17. Истомин В.А., Нестеров А.Н., Чувилин Е.М., Квон В.Г., Решетников А.М. Разложение гидратов различных газов при температурах ниже 273 К // Газохимия. Сентябрь-октябрь 2008 года.
18. Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В., Буханов Б.А., Станиловская Ю.В., Бадец К. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазоХимия. 2018. № 2. С. 33–42.
19. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 2. С. 15–25.
20. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2: Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под общ. ред. Ю.Б. Бадю, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО Газпром экспо, 2013. 424 с.
21. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Котов П.И., Собин Р.В. Исследование динамики выделения газа из мёрзлых пород при изменении температуры и давления // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2020. № 4. С. 15–20.
22. Лейбман М.О., Плеханов А.В. Ямальская воронка газового выброса // Холод'ОК. 2014. № 2 (12). С. 9–15.
23. Лейбман М.О., Кизяков А.И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. 2016. № 2. С. 15–24.

24. Ленченко Н.Н. Динамика подземных вод. М.: МГГУ, 2004. 65 с.
25. 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, 1989. № 2. С. 118–128.
26. Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Уфа: ГИЛЕМ, 1999. 464 с.
27. Основы геокриологии. Ч. 1: Физико-химические основы геокриологии. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
28. Рокос С.И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа: автореф. дис. ... к. г. н. Мурманск, 2009. 24 с.
29. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. 426 с.
30. Роман Л.Т., Мерзляков В.П., Малеева А.Н. Влияние степени водогазонасыщения на температурные деформации мерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 3. С. 24–31.
31. Савченко В.П. Формирование, разведка и разработка месторождений газа и нефти. М.: Недра, 1977. 413 с.
32. СН 91-60 Технические условия проектирования оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах. М.: Госстройиздат, 1960. 64 с.
33. Старобинец И.С., Муругова Р.Н. Экранирующая и проводящая роль пород криолитозоны по отношению к миграционным углеводородам // Геология нефти и газа. 1985. № 1. С. 24–27.
34. 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. URL: [http://e-notabene.ru/arctic/article\\_27524.html](http://e-notabene.ru/arctic/article_27524.html)
35. Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Ч. 2: Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы // Арктика и Антарктика. 2018. № 2. С. 48–70.
36. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Гагарин В.Е., Соболев П.А. О фильтрации газов в многолетнемерзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне // Арктика и Антарктика. 2019а. № 3. С. 16–38.
37. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А. Лабораторное моделирование фильтрации газа в многолетнемерзлых породах // Арктика и Антарктика. 2019б. № 4. С. 52–73.
38. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А. Фильтрация газа в мерзлых грунтах // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2020. № 3. С. 97–103.
39. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
40. Чабан П.Д. О газовых гидратах в вечномерзлых россыпях // Колыма. 1991. № 6. С. 18–19.
41. Чувилин Е.М., Гребенкин С.И., Сакле М. Влияние влагосодержания на газопроницаемость пород в мерзлом и талом состояниях // Криосфера Земли. 2016. Т. XX, № 3. С. 71–78.
42. Чувилин Е.М., Соколова Н.С., Спасенных М.Ю. Метан в мерзлоте — ресурс или опасность? <https://goarctic.ru/work/metan-v-merzlote-resurs-ili-opasnost/>. 2019.



43. Шахова Н.Е. Метан в морях Восточной Арктики: автореф. дис. ... д. г.-м. н. М.: Дальнаука, ДВО РАН, 2010. 48 с.
44. Шахова Н.Е., Семилетов И.П. Метан в морях Восточной Арктики: избранные результаты исследования (1994–2014). <https://docplayer.ru/37852131-Metan-v-moryah-vostochnoy-arktiki-izbrannye-rezultaty-issledovaniya-shahova-n-e-semiletov-i-p.html>.
45. Шнайдер А. Течение двухфазных смесей в пористой среде при волновом воздействии: автореф. дис. ... к. в.-м. н. Тюмень: Тюмен. гос. ун-т, 2006. 19 с.
46. Шушерина Е.П. Сопротивление мерзлых дисперсных пород и льда разрыву в области низких температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) // Мерзлотные исследования. 1974. Вып. 14. С. 179–189.
47. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Оленченко В.В., Потапов В.В., Кушнаренко О.Н., Плотников А.Е., Синицкий А.И. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. 2014. Вып. 5 (59). С. 14–23.
48. Якушев В.С. Одна из возможных причин газовых выбросов в толщах многолетнемерзлых пород // Геология нефти и газа. 1989. № 4. С. 45–47.
49. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
50. Якушев В.С. Влияние литологии криолитозоны на устойчивость реликтовых газогидратов в Арктике // Труды ИПНГ РАН. Серия: Конференции. М., 2017. Вып. 2 (1). С. 172–173.
51. Arenson L.U., Sego D.C. The effect of salinity on the freezing of coarse-grained sands // Can. Geotech. Journ. 2006. V. 43. P. 325–337.
52. Buldovich S., Khilimonyuk V., Bychkov A., Ospennikov E., Vorobyev S., Gunar A., Gorshkov E., Chuvilin E., Cherbunina M., Kotov P., Lubnina N., Motenko R., Amanzhurov R. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin Results of detailed studies and modeling 5<sup>th</sup> European Conference on Permafrost — Book of Abstracts, 23 June — 1 July 2018a, Chamonix, France. 97–98.
53. Burges, M., Judge, A.S., Taylor, A., Allen, D.V. Ground temperature studies of permafrost growth at a drained lake site, Mackenzie Delta (MD). In Proceedings of the 4th Canadian Permafrost Conferences, Calgary, AB, Canada, 2–6 March 1982, pp. 3–11.
54. Chuvilin E., Sokolova N., Davletshina D., Bukhanov B., Stanilovskaya J., Badetz C., Spasennykh M. Conceptual Models of Gas Accumulation in the Shallow Permafrost of Northern West Siberia and Conditions for Explosive Gas Emissions // Geosciences 2020, 10, 195; doi:10.3390/geosciences10050195.
55. 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), p. 67.
56. Majorowicz J., Osadetz K., Safanda J. Models of Talik, Permafrost and Gas Hydrate Histories — Beaufort Mackenzie Basin, Canada Energies 2015, 8, 6738–6764; doi:10.3390/en8076738, Received: 17 March 2015 / Accepted: 23 June 2015 / Published: 30 June 2015
57. Taylor A.E., Dallimore S.R. and Wright J.F. Thermal impact of Holocene lakes on a permafrost landscape, Mackenzie Delta, Canada. In: Kane D.L. and Hinkel K.M., (ed.), Ninth International Conference on Permafrost, 1998; 2: 1757–1762.
58. Yakushev V.S., Semenov A.P., Bogoyavlensky V.I. et al. Experimental modeling of methane release from intrapermafrost relic gas hydrates when sediment temperature change // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 149. P. 46–50.

## ГЛАВА 4.

# ВОРОНКИ ГАЗОВОГО ВЫБРОСА НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ КАК ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА ГАЗОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

### Введение

Одними из самых ярких явлений, связанных с газонасыщенными многолетнемёрзлыми породами, являются воронки газового выброса. В стабильных условиях данные породы могут существовать длительное время. Но при нарушении равновесных условий (повышение температуры, сброс внешнего давления и др.) в мёрзлых породах формируются зоны высоконапорных, т. е. обладающих аномально высоким пластовым давлением, природных газов. При этом не имеет значения происхождение самого газа. Он может быть подмерзлотным, глубинным (катагенетическим); сформироваться в результате жизнедеятельности микроорганизмов в талых и мёрзлых породах (биохимическим) или образоваться при диссоциации газогидратов. Могут различаться причины, обуславливающие развитие аномально высоких давлений газа: климатический разогрев многолетнемёрзлых пород; промерзание замкнутых таликов, локальный прогрев под поверхностными водоёмами; движение под напором глубинных газовых флюидов. Главным условием образования воронок газового выброса является нарушение равновесия между прочностью перекрывающего газонасыщенную зону слоя мёрзлых пород и возникающим в ней давлением газа. При достижении определённых значений давления в мёрзлом массиве начинает развиваться комплекс процессов, приводящих к деформациям и нарушениям его сплошности и в конечном итоге к развитию взрывных процессов. Выброс газа относится к физическим взрывам и является конечным итогом длительной истории формирования, миграции и накопления газового флюида в локальных зонах. На этапе, предшествующем непосредственно газовому выбросу, в толще мёрзлых пород формируется своеобразная газодинамическая геосистема, включающая зону генерации газа, зону транзита и зону накопления. Согласно глубоко разработанной в приложении к геомеханическим условиям подземных горных выработок энергетически-силовой теории внезапных газодинамических выбросов источником силы и энергии для них является газ. В обобщённом виде в развитии данных геосистем наблюдается несколько стадий [Петухов, Линьков, 1978]:

- 1) различная по продолжительности подготовительная стадия;
- 2) саморазвивающийся лавинно-непрерывный процесс разрушения части горнопородного массива с последующим выбросом обломочных продуктов разрушения в потоке расширяющегося газа и их инерциальное движение под действием запасённой ими кинетической энергии;
- 3) затухающее газовыделение из полости выброса.

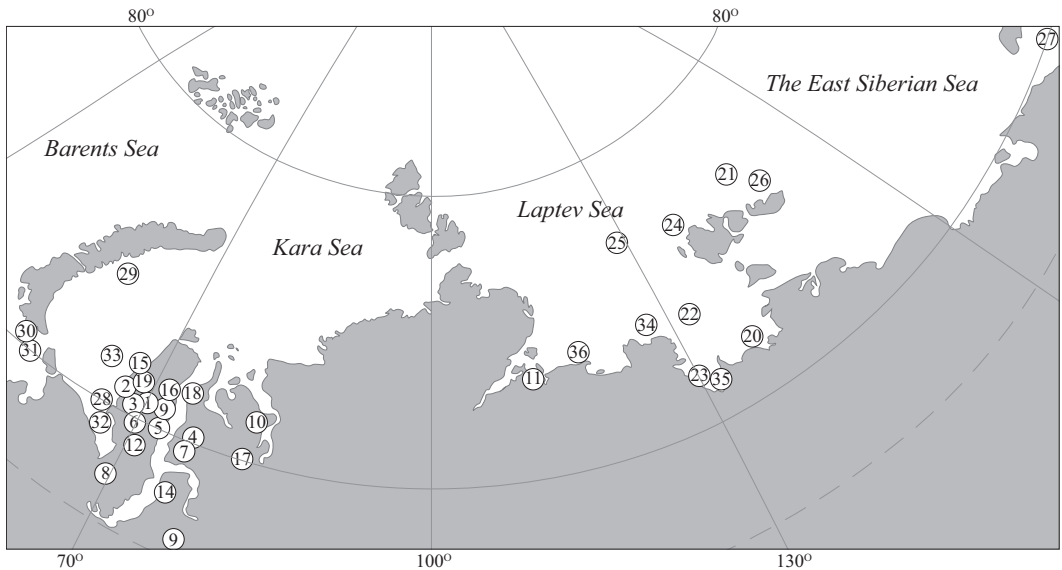
Авторы отмечают, что деление на стадии характеризует резкие, последовательно накладываются друг на друга изменения в деформировании породы при динамическом явлении. Все эти стадии наблюдаются при формировании воронок газового выброса.

Разнообразные геологические условия (состав, строение, условия, глубина залегания и др.) обуславливают различие строения данных геосистем, динамику, стадии и жизненный цикл их развития. Образование воронок газового выброса непосредственно связано с про-

блемами газопроявлений при бурении скважин на северных месторождениях и шельфе арктических морей, а также с проблемой поступления парниковых газов в атмосферу в районах распространения многолетнемёрзлых пород, обострившейся в последние десятилетия.

#### 4.1. Воронки газового выброса в многолетнемёрзлых породах на севере Западной Сибири

Следует отметить, что воронки газового выброса представляют только часть газовых флюидов, выделяющихся из многолетнемёрзлых пород. Е.Н. Чувилиным с соавторами в статье «Davletshina D. et al. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic» были собраны и проанализированы данные по газовым выбросам в Российской Арктике, выявленным к 2020 г. (рис. 4.1). В данной публикации указывается местоположение выхода газа, форма проявления (подводный сип, воронка газового выброса, газопроявление в скважине), параметры (горизонтальные и вертикальные размеры сипов, воронок газового выброса, глубина газопроявления), предполагаемый генезис газа [Chuvilin et al., 2020].



**Рис. 4.1. Карта газовых выбросов в Российской Арктике [Chuvilin et al., 2020]**

##### Перечень газовых выбросов в Российской Арктике:

1 — полуостров Ямал, озеро Нейто. Газовые шлейфы на поверхности воды, проталины во льду. Глубинный газ Нейтинского месторождения; 2 — полуостров Ямал, кратерное озеро. Кратеры и валы на дне озера. Возможно, глубинные газодляные флюиды; 3 — полуостров Ямал, группа озёр южнее Бованенковского месторождения. Голубая вода, проталины во льду. Активный выброс газа, возможно, глубинного происхождения; 4 — полуостров Гыдан, озеро в 4 км от озера Меркуто на левом берегу реки Юрибей. Кратер, окружённый валом. Продолжительный восходящий поток газа, возможно, глубинного происхождения; 5 — полуостров Ямал, 54 км к северо-востоку от Арктического месторождения, озеро Открытие. Большие кратеры (до 40 м в диаметре на дне озера). Возможно, глубинный газ из сеноманского горизонта; 6 — Ямальский кратер, полуостров Ямал, 30 км к югу от Бованенковского месторождения. Большой кратер (до 40 м в диаметре и ~70 м глубиной), окружённый хорошо выраженным валом. Обломки пород разбросаны на расстояние 120 м. Возможно, внутримерзлотный газ; 7 — полуостров Гыдан, 100 км к северо-западу от села

Антипаюта. Кратер диаметром 10–13 м и глубиной ~15 м без окаймляющего вала. Возможно, внутримёрзлотный газ; 8 — полуостров Ямал, пойма реки Еркутаяхи. Кратер диаметром 10–12 м и глубиной ~20 м с сохранившимся фрагментом вала высотой 2–3 м и обломками пород, разнесёнными на расстояние 100 м. Предположительно биогенный газ из талика и глубинный газ; 9 — полуостров Ямал, 33 км к северо-западу от Сеяхи, река Мюдрияха. Взрыв горючего газа, в результате которого образовался кратер глубиной 50–70 м в реке с рассредоточенными глыбами мёрзлой льдонасыщенной породы объёмом до 150 м<sup>3</sup>. Возможно, глубинный газ; 10 — полуостров Гыдан, к северу от Дерябинского месторождения, берег реки Монгоче. Взрыв газа с возгоранием, в результате которого образовался кратер глубиной 20 м с разбросанными крупными обломками породы. Возможно, глубинный газ; 11 — буровая скважина на севере Якутии, Анабарско-Хатангское междуречье. Газопроявления на глубине 70–120 м. Внутримёрзлотный газ; 12 — полуостров Ямал, река Юрибей. Газопроявления на глубине 10–50 м. Внутримёрзлотный газ; 13 — Тазовский полуостров, Заполярное месторождение. На глубине 50–120 м внутримёрзлотные газопроявления, возможно, реликтовые газовые гидраты; 14 — Тазовский полуостров, Ямбургское месторождение. Газопроявления на глубине 45–55 м. Внутримёрзлотный газ, возможно, реликтовые газовые гидраты; 15 — полуостров Ямал, Харасавэйское месторождение. Газовыделения на глубине 10–210 м. Внутримёрзлотный газ, возможно, реликтовые газовые гидраты; 16 — Полуостров Ямал, Южно-Тамбейское месторождение. Газопроявления на глубине 40–60 м. Внутримёрзлотный газ, возможно, реликтовые газовые гидраты; 17 — Гыданский полуостров, Пеляткинское месторождение. Газопроявления на глубине 20–30 м. Внутримёрзлотный газ; 18 — полуостров Гыдан, Салманское месторождение (Утреннее). Газопроявления на глубине 50–150 м. Внутримёрзлотный газ, возможно, реликтовые газовые гидраты; 19 — полуостров Ямал, Бованенковское месторождение. Газопроявления на глубине 20–130 м. Внутримёрзлотный газ, возможно, реликтовые газовые гидраты; 20 — море Лаптевых, дельта реки Яны. Восходящие потоки и выходы газа на морскую поверхность. Глубинный газ; 21 — Восточно-Сибирское море, остров Беннетта. Газовые шлейфы длиной до 1000 км, возможно, глубинный газ; 22 — море Лаптевых, между Семеновским островом и дельтой реки Лены. Просачивание газа, возможно, глубинный газ; 23 — море Лаптевых, Ивашкинский залив. Около 20 выходов газа, высокая концентрация метана в воздухе. Глубинный газ; 24 — море Лаптевых, остров Котельный. Просачивание газа, возможно, глубинный газ; 25 — шельф моря Лаптевых, Новосибирские острова. Кластер газовых выходов на глубине 50–90 м. Возможно, глубинный газ; 26 — море Лаптевых (между 76,5 и 77,5° с.ш. и 121–132° в.д.). Более 700 выходов газа диаметром до 1,3 км, возможно, глубинный газ; 27 — Чукотское море, Геральд-каньон и остров Врангеля. Около 90 выходов газа на глубинах 50–95 м. Глубинный газ; 28 — Карское море, в районе полярной станции Марре-Сале. Выход газа на глубине 6 м, струя газа 2 м в высоту и 15 м в ширину. Биогенный газ; 29 — Карское море, структура Университетская. Выход газа с глубины 80 м и пинго-подобные элементы. Глубинный газ; 30 — Баренцево море, около южного побережья Шпицбергена. Бурение субаквальных мёрзлых пород. Под дном на глубине 50 м выход газа; 31 — Печорское море, остров Вайгач. Газовый фонтан высотой 10 м из скважины на глубине 50 м, с зоной закипания до 200 м в диаметре на поверхности моря. Газ из субаквальных мёрзлых пород; 32 — Карское море, Байдарацкая губа. Газопроявление с глубины 10–50 м, возможно, глубинный газ; 33 — Карское море, Ленинградское месторождение. Газопроявление из скважины глубиной 200 м, возможно, глубинный газ; 34 — море Лаптевых, дельта реки Лены. Газопроявление в скважине на глубине 9 м. Газ из многолетнемёрзлых пород; 35 — море Лаптевых, залив Буорхая. Газопроявление в скважине глубиной 13–16 м. Газ из многолетнемёрзлых пород; 36 — море Лаптевых, мыс Мамонтов Клык. Газопроявление в скважине глубиной до 80 м. Газ из мёрзлой толщи [Chuvilin et al., 2020].

Выходы газа в виде подводных сипов и газопроявлений в скважинах рассматриваются в других главах. Данная глава посвящена одному из проявлений выделения газа из многолетнемёрзлых пород — воронкам газового выброса.

Первая из воронок газового выброса в многолетнемёрзлых породах была обнаружена в 2014 г. в районе Бованенковского газоконденсатного месторождения на Ямале. Со времени обнаружения первой воронки газового выброса (ВГВ) их количество увеличилось, сейчас насчитывается более 10, и их количество постоянно пополняется. Несмотря на большой интерес к этому явлению со стороны СМИ и научного сообщества, проблема их происхождения ещё далека от своего разрешения. Причиной этого является неполнота исходных материалов, кратковременность истории изучения (исследования начались с 2014 г.), отсутствие разработанной и подтверждённой результатами исследований теории. По мнению наиболее авторитетных специалистов, занимавшихся проблемой происхождения воронок газового выброса (В.И. Богоявленский [2014, 2016], М.О. Лейбман, А.И. Кизяков [2016], М.И. Эпов, И.Н. Ельцов, В.В. Оленченко [Эпов и др., 2014], С.Н. Булдович, В. Хилимонюк [Buldovich, Khilimonyuk et al., 2018a, б], А.Н. Хименков, Д.О. Сергеев, Ю.В. Станиловская [Хименков и др., 2017a, б] и др.), данные образования обязаны своим происхождением выбросу подземного газа. Названия и обозначения воронок у разных авторов различаются. Приведенная в работе нумерация воронок составлена с использованием материалов различных исследователей [Лейбман и др., 2016; Богоявленский и др., 2016; Хомутов и др., 2017] (рис. 4.2).



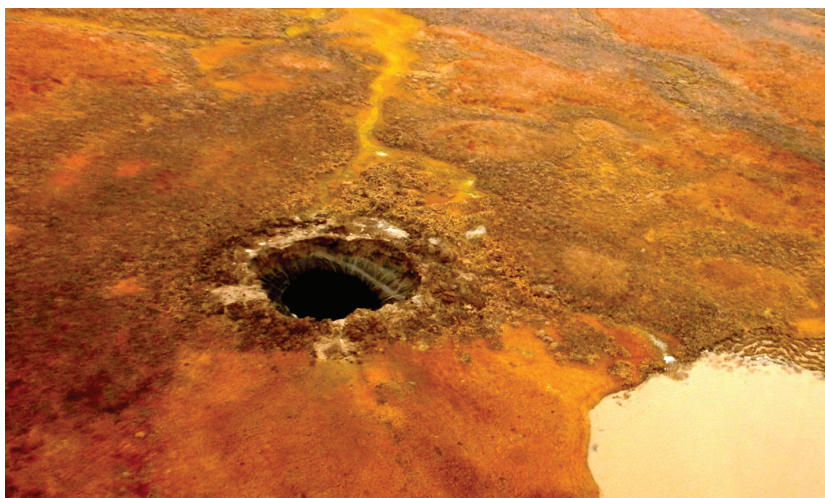
**Рис. 4.2. Схема расположения ВГВ на севере Западной Сибири [Leibman et al., 2018] с добавлениями авторов**

#### ***GEC-1 (центральный Ямал)***

К настоящему времени наибольший объём данных о ВГВ получен при изучении воронки, обнаруженной в 2014 г. и расположенной в 30 км к югу от Бованенковского ГКМ (GEC-1) (рис. 4.3). Глубина воронки около 50 м, ширина около 30 м. Разбросанный вокруг грунт свидетельствовал о взрыве, сопровождавшем её образование. Никаких следов хозяйственной деятельности вблизи воронки не обнаружено. Форма кратера — правиль-



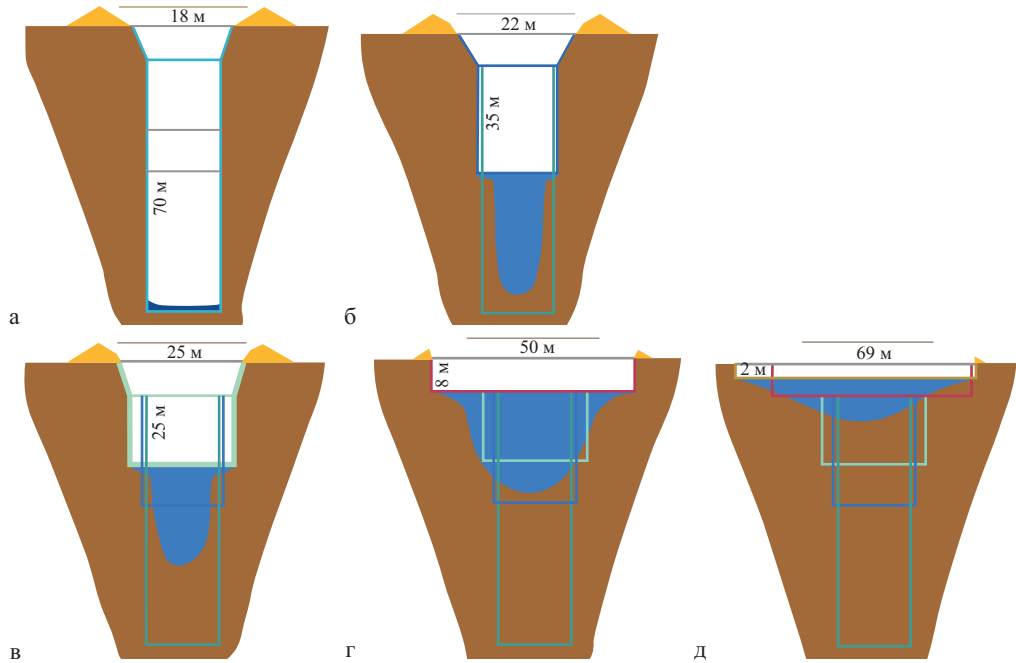
ный эллиптический цилиндр, немного расширенный у поверхности. Измерения показали, что большая полуось воронки составляет около 20 м, малая — 14 м. Глубина сезонноталого слоя по периметру составила 0,8 м. Материал, выброшенный из воронки, распределён равномерно во всех направлениях. Наибольшая концентрация обломков была обнаружена по окружности на расстоянии 140 м от центра воронки, а отдельные обломки разлетелись на расстояние более 180 м. Разрез воронки сложен практически чистым льдом. В выброшенном материале обнаружены обломки скальных пород (окатанные песчаники, сланцы) [Эпов и др., 2014]. За 2014–2016 гг. ВГВ-1 изучались многими экспедициями, по результатам исследований опубликованы десятки статей, докладов и интервью в СМИ [Богоявленский, 2014; Эпов и др., 2014; Богоявленский, Гарагаш, 2015; Лейбман, Плеханов, 2014; Лейбман, Кизяков, 2016; Кизяков и др., 2015; Оленченко и др., 2015; Сизов, 2015; Стрелецкая и др., 2017; Хилимонюк и др., 2016; Хименков и др., 2017а; Хименков и др., 2017б и др.].



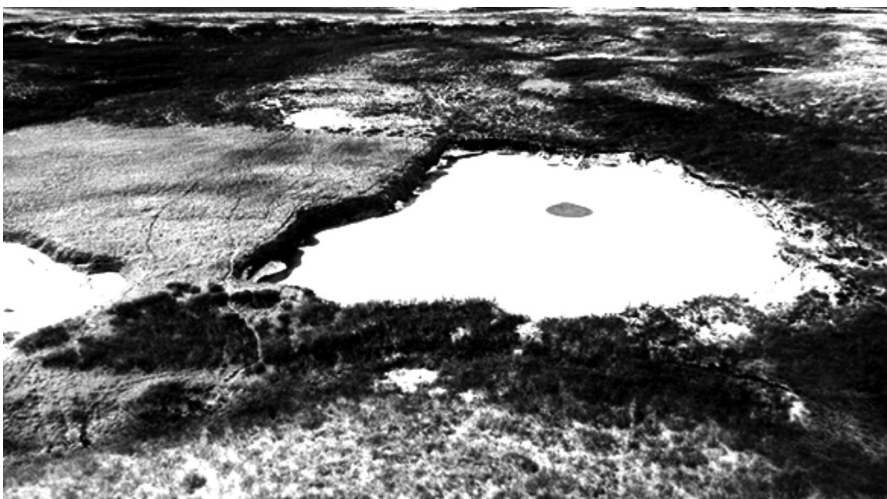
**Рис. 4.3. Воронка, расположенная в 30 км к югу от Бованенковского ГКМ.**  
**Фото В.В. Оленченко**

После образования воронка стала интенсивно заполняться водой. В июле 2014 г. глубина водоёма на дне Ямальского кратера равнялась 9,6 м. Расстояние от бровки бруствера воронки до поверхности донного озера превышало 50 м. В ноябре 2014 г. расстояние до поверхности воды уже составляло 26 м, к сентябрю 2015 г. почти вся ВГВ была заполнена водой. Плановые размеры ВГВ резко выросли, от 20–25 м в июле 2014 г. до 47–54 м к концу лета 2015 г., и продолжали увеличиваться в дальнейшем (рис. 4.4, 4.5). Невысокие (до 6 м) «берега» озера внутри ВГВ продолжают отступать, а остатки бруствера обваливаются в озеро. Можно предположить, что в течение следующих одного-двух лет бруствер будет полностью разрушен и в результате ВГВ будет выглядеть как обычное тундровое озеро [Хомутов и др., 2017].

В 2017 г. воронка превратилась в озеро, ежегодно расширяющееся и изменяющее свою форму и глубину. На октябрь 2017 г. озеро на месте воронки выглядит следующим образом (рис. 4.5). На месте, соответствующем ГЕС-1, видна незамёрзшая полынья, приуроченная к выходу газа из донных осадков.



**Рис. 4.4.** Параметры озера, сформировавшегося на месте Ямальского кратера: а — июль 2014 г., б — октябрь 2014 г., в — сентябрь 2015 г., г — октябрь 2016 г., д — сентябрь 2017 г. Батиметрическая съёмка, проведённая в озере, сформировавшемся на месте Ямальского кратера, показала уменьшение его глубины: 34 м в ноябре 2014 г., 24 м в июле 2015 г., 9 м летом 2016 г. и 4,9 м в сентябре 2017 г. [Лейбман др., 2016]



**Рис. 4.5.** Озеро на месте Ямальской воронки. Фото М.О. Лейбман.  
Архив Института криосферы Земли;  
<https://ria.ru/science/20171207/1510311618.html>

В ходе исследований, проведённых сотрудниками Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН в период с 5 по 11 сентября, было установлено, что произошёл прорыв перемычки, отделяющей озеро воронки от соседнего термокарстового озера, приведший к его спуску (рис. 4.6, 4.7) [Лейбман, 2016; <http://www.ikz.ru/archives/4081>].



**Рис. 4.6. Динамика изменения размеров Ямальского кратера [Лейбман и др., 2016]**

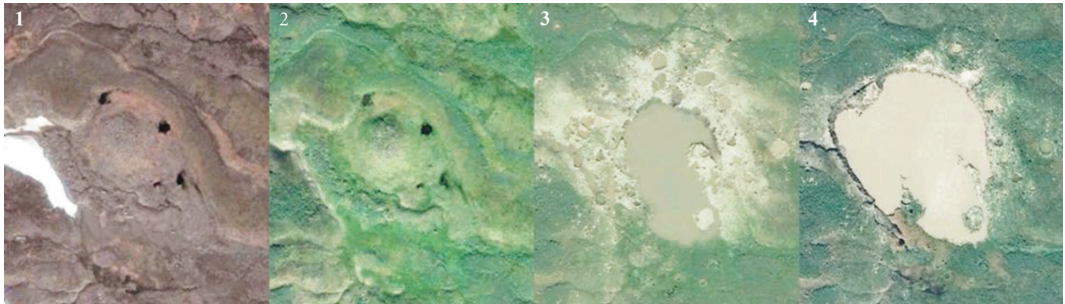


**Рис. 4.7. Озеро воронки газового выброса Ямальский кратер и спущенное озеро за ним. Фото А.В. Хомутова [Хомутов и др., 2017]**

Исследования, проведённые летом и осенью 2014 г., показали высокое содержание метана в воздухе внутри воронки и в пузырьках воздуха во льду [Стрелецкая и др., 2017]. Вода в озере Ямальского кратера характеризуется повышенным содержанием метана: 960 ppm вблизи дна и 450 ppm у поверхности, что много выше, чем фоновые озёра, и концентрацией растворённого органического углерода в 3–4 раза выше, чем в фоновых озёрах. Изотопный состав метана свидетельствует о его биогенном генезисе и в озёрах, и в пластовом льду, и в воде озёр ВГВ [Лейбман и др., 2018].

### ***ГЕС-2 (центральный Ямал)***

К западу от озера Нюдимдато (1,2 км) 21 июля 2013 г. обнаружено озеро, формирование которого некоторые исследователи связывают с газовым выбросом [Богоявленский и др., 2015; Сизов, 2015]. Оно расположено в 20 км к северу от Ямальского кратера и 10 км к югу от Бованенковского ГКМ. Ретроспективный анализ космоснимков Quick Bird (QB) 2009–2010 гг. (рис. 4.8), проведённый В.И. Богоявленским, показал, что на месте озера в 2009–2010 гг. существовал крупный бугор пучения диаметром около 60–63 м и площадью около 3000 м<sup>2</sup>. В 2013 г. на его месте уже располагался водоём размером 100×60 м и глубиной до 6 м, вокруг которого наблюдались многочисленные (более 35) небольшие озёра округлой формы диаметром до 8 м с брустверами выброшенной породы [Богоявленский, 2018]. К лету 2014 г. размеры водоёма незначительно сократились (120×80 м) [Сизов, 2015]. По состоянию на 1 сентября 2016 г. озеро имело размеры 120×95 м и было заполнено водой до самой кромки пологой части юго-западного берега (см. рис. 4.8) [Богоявленский, 2018].



**Рис. 4.8. Космические снимки воронки:**

**1 — QB 4 июля 2009 г., 2 — QB 30 июля 2010 г., 3 — WV-2 21 июля 2013 г., 4 — WV-3 27 июня 2016 г. [Богоявленский и др., 2017]**

В северной части озера с высоким крутым (до 6–8 м) берегом под маломощным (1–5 м) почвенным покровом было обнаружено протяжённое (около 40 м) обнажение подземного пласта льда (рис. 4.9). Верхняя кромка льда находится на глубине 1–3 м ниже поверхности земли, а нижняя — однозначно ниже уровня воды в озере. В нижней части обнажения залегает кристально чистый лёд с многочисленными трещинами, мощность которого максимальна в центральной (северной) части и минимальна в краевых частях подковообразного обнажения (см. рис. 4.9).

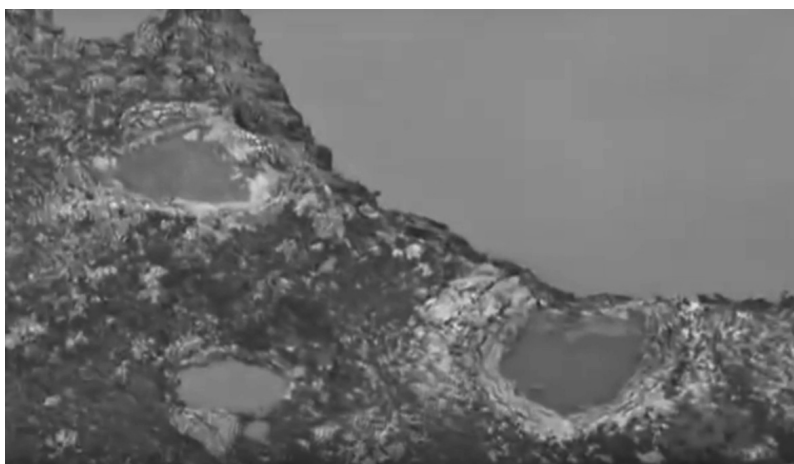
В связи с отсутствием обуглившихся фрагментов растительности с высокой степенью вероятности можно говорить о пневматическом характере взрыва без воспламенения газа. По характеру распространения кусков выброшенной породы (белёсый цвет суглинистой



породы вокруг озера), небольших новообразованных озёр и углублений можно говорить об их формировании за счёт выброшенных обломков льдонасыщенной породы. Наибольшее количество мелких водоёмов обнаружено вокруг основного озера и в северо-западной части полигона (рис. 4.10). Разлёт крупных обломков породы наблюдается на удалении от озера до 60 м, максимальное удаление достигает 370 м.



**Рис. 4.9. Остаток ледяного ядра булгуннях. Фото И.В. Богоявленского**



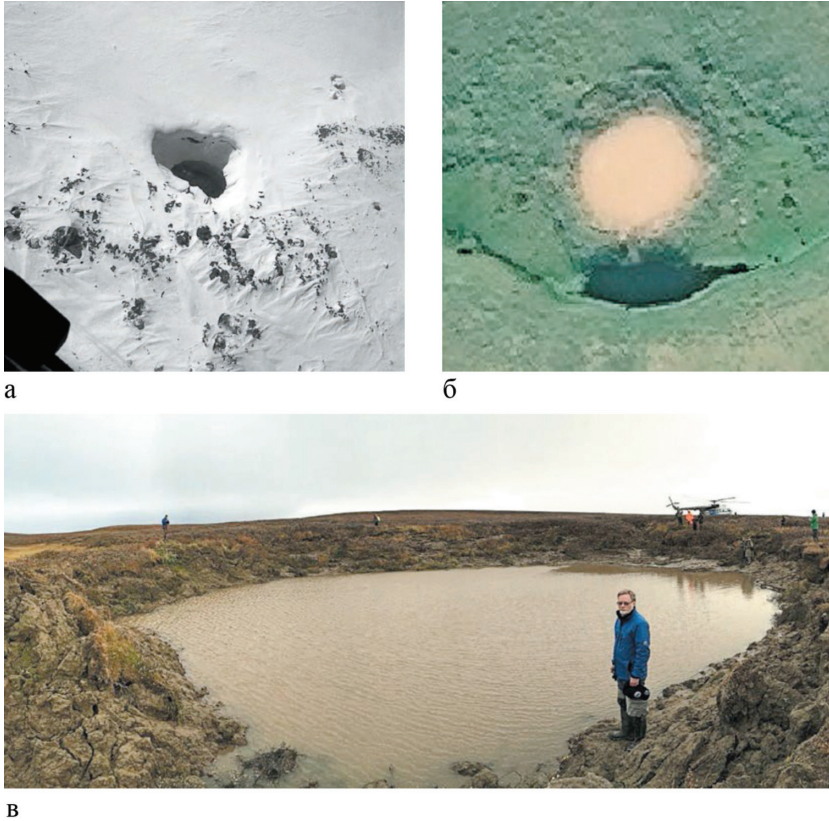
**Рис. 4.10. Небольшие озёра, сформировавшиеся при выбросе крупных обломков. Фото И.В. Богоявленского**

Вокруг большинства небольших озёр, глубина которых не превышает 1–1,5 м, а диаметр меняется в широком диапазоне от 0,2 до 8 м, наблюдаются хорошо сохранившиеся брустверы. О.С. Сизовым был сделан вывод, что при образовании озера произошло несколько разновременных выбросов газа разной мощности. О.С. Сизов считает, что при формировании озера газовыделение не сопровождалось мгновенным мощным выбросом, а происходило в ходе постепенного разрушения ледяного ядра и расширения термоэрозийного углубления устойчивым некоторое время потоком газа [Сизов, 2015].



**ГЕС-3 (центральный Ямал)**

Воронка расположена в 10 км западнее воронки Богоявленского, в 1,6 км от железной дороги Обская — Карская. Первоначально воронка была обнаружена пилотом С.А. Никитенко 27 апреля 2013 г. Судя по брустверу выброшенной породы и нескольким более мелким углублениям в почве от упавших кусков выброшенного льда, можно предположить, что выброс газа произошёл в летнее время 2012 г. По состоянию на август-сентябрь 2015 г. воронка была почти заполнена водой и превратилась в озеро (рис. 4.11) [Богоявленский и др., 2017].



**Рис. 4.11. Воронка газового выброса:**

**а — фотография из вертолета 27 апреля 2013 г. (С.А. Никитенко),**

**б — космоснимок WV-27 августа 2015 г., в — панорамная фотография с бруствера 4 сентября 2015 г. [Богоявленский и др., 2017]**

**AntGEC (юго-запад Гыданского п-ва)**

Воронка обнаружена оленеводами 27 сентября 2013 г. в 90 км от села Антипаюта Тазовского района Ямала-Ненецкого автономного округа, её координаты 69,795° с.ш. 75,035° в.д. Территория расположена в южной части Гыданского п-ва в пределах Солетско-Ханавейского ГКМ. Антипаютинская воронка представляет собой круглое углубление диаметром 10–12 м. Она расположена на периферии останца третьей террасы, на склоне врезанной в него балки. Вблизи воронки наблюдаются песчаные раздувы (рис. 4.12). Образованию Антипаютинской воронки предшествовало существование бугра высотой около 2 м, диаметром основания около 20 м [Кизяков и др., 2017].



**Рис. 4.12. Антипаютинская воронка (AntGEC). Фото М. Лапсуя**

Основной выброс грунтового материала при взрыве был направлен в сторону прилегающей ложбины (рис. 4.12–4.14). На дне ложбины сосредоточено большое количество выброшенной породы, наблюдаются углубления, связанные с ударным воздействием крупных обломков. К 2016 г. на месте кратера образовалось озеро шириной 35–37 м, максимальная глубина которого не превышает 3,5 м (см. рис. 4.13, 4.14) [Богоявленский, 2018].



**Рис. 4.13. Антипаютинская воронка на полуострове Гыдан (конец августа 2016 г.). Фото М.О. Лейбман**



**Рис. 4.14. Озеро, образовавшееся на месте взрывной воронки. На переднем плане маленькие водоёмы, образовавшиеся на месте ударного воздействия крупных обломков. Фото А.В. Хомутова**

При съёмке в июне 2016 г. в краевой части озера обнаружен разрушающийся сезонный бугор пучения (рис. 4.15), сформировавшийся в мелководной прибрежной части озера, на месте смерзания покровного льда водоёма с влагонасыщенными осадками. Предполагается, что его возникновение обусловлено поступлением газа, выделяющегося из-под дна озера [Богоявленский, 2018].



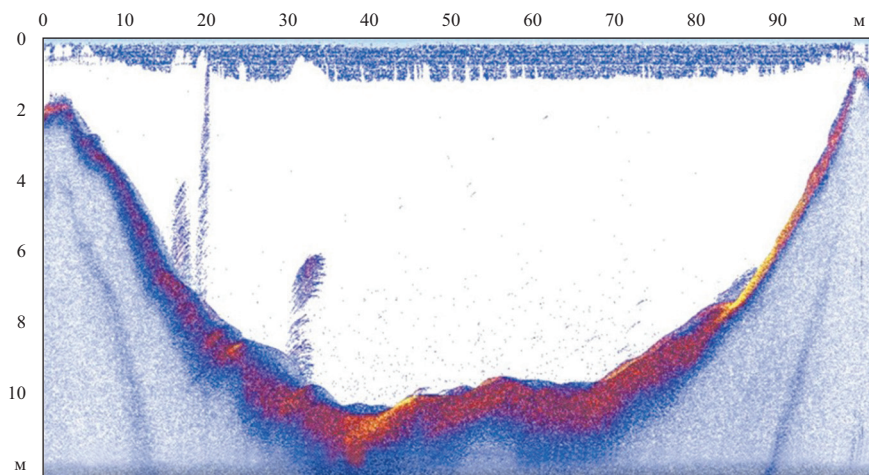
**Рис. 4.15. Сезонный бугор пучения в краевой части озера [Богоявленский, 2018]**

Антипаютинская воронка значительно отличается от других подобных образований. Все они располагаются на ровных или слабонаклонных склонах, поросших более или менее густыми зарослями кустарника ивы, сложенных преимущественно суглинистыми грунтами, часто с пластовыми льдами близко к поверхности. Антипаютинская воронка расположена практически на бровке террасовидной поверхности вблизи эрозионной долины, сложенной песчаными породами. Вблизи воронок растительность уничтожена песчаным раздувом [Хомутов и др., 2017]. Анализ космоснимков показал, что на месте воронки выраженного бугра не было обнаружено [Кизяков и др., 2017].

### ***SeYkhGEC (северо-восточный Ямал)***

По свидетельству жителя посёлка Сеяха Михаила Окотэтто, Сеяхинская воронка образовалась 28 июня 2017 г., примерно в 10.30 по местному времени. Она находится на расстоянии 34 км на северо-запад от посёлка Сеяха Ямальского района, в русле реки Мордыхи. Координаты воронки — 70° с.ш. 72° в.д. Измерения эхолотом установили наибольшую глубину реки — 2–3 м. Прямые промеры глубины в центре воронки показали глубину более 20 м (рис. 4.16). Подток газа из глубин продолжался и после взрыва, проявляясь в виде бурления воды на поверхности (рис. 4.17). По данным проведённых исследований, выделяющийся газ является метаном. В интервью газете «Красный Север» от 03.07.2017 В.И. Богоявленский сообщил о трёх выходах метана из воронки [<https://www.ks-yanao.ru/novosti/desant-izuchivshiy-mesto-vzryva-v-seyakhe-nashyel-novyuy-voronku.html>].





**Рис. 4.16.** Эхолотационный профиль с газовыми факелами на затопленном речной водой Сеяхинском кратере [Богоявленский и др., 2019]



**Рис. 4.17.** Выход газа в русле реки [<http://www.yamalpro.ru/2017/07/03/iz-novoy-yamalskoy-voronki-prodolzhaet-sochitsya-metan/>]

Средний диаметр верхней затопленной части кратера (по уровню воды ниже брусве-ра) — 85 м, а его глубина — свыше 50 м [Богоявленский, 2018]. Взрыв сопровождался возгоранием вырвавшегося газа. Горение, по наблюдению местных жителей, продолжалось около получаса. О пожаре свидетельствуют обгоревшие трава и песок. Возгорание газа усилило мощность взрыва, раскидавшего замёрзший грунт и блоки мёрзлых пород в радиусе 200 м. Анализ ориентировки вытянутых углублений, оставшихся от разлетевшихся в результате взрыва мелких обломков породы (рис. 4.18), позволил определить центр их разлёта (рис. 4.19), совпавший с выходом газа.



**Рис. 4.18.** На переднем плане углубление от падения обломка из взорвавшегося кратера и выброшенный из углубления грунт. Скриншот видео [\[http://www.yamalpro.ru/2017/07/03/iz-novoy-yamalskoy-voronki-prodolzhaet-sochitsya-metan/\]](http://www.yamalpro.ru/2017/07/03/iz-novoy-yamalskoy-voronki-prodolzhaet-sochitsya-metan/)

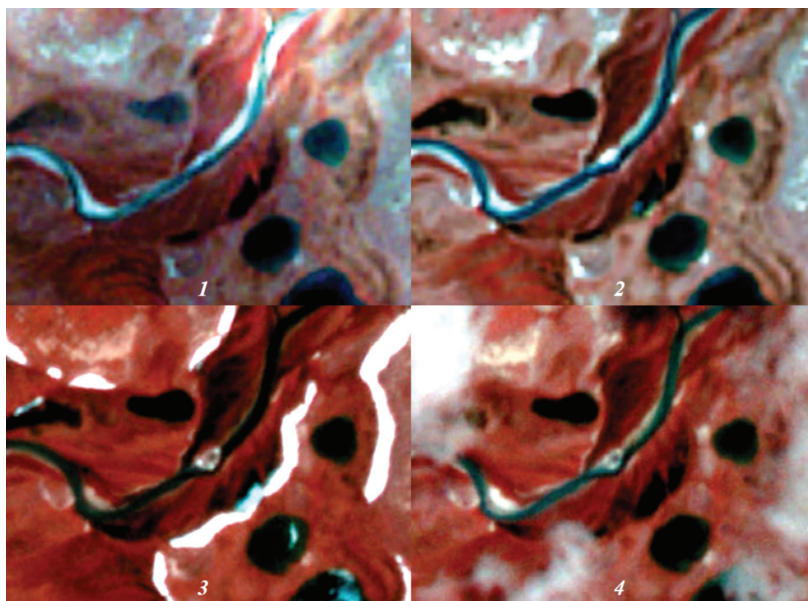
Местные жители сообщили, что взорвалась «сопочка». Установленный центр разлёта обломков и выхода газа находится в русле реки. Устранить это противоречие можно, предположив, что после взрыва русло реки, огибавшее «сопочку», стало проходить по центральной части кратера. Часть крупных обломков на момент съёмки перегораживала русло. Возможно, вначале бугор начал развиваться в субаквальных условиях, что вызвало смещение русла реки и её огибание растущей «сопочки».



**Рис. 4.19.** Определение места взрыва: прямые линии проведены по направлениям вытянутых выемок; пунктир — граница выброса крупнообломочного материала (внешняя граница кратера). Скриншот видео [\[http://www.yamalpro.ru/2017/07/03/iz-novoy-yamalskoy-voronki-prodolzhaet-sochitsya-metan/\]](http://www.yamalpro.ru/2017/07/03/iz-novoy-yamalskoy-voronki-prodolzhaet-sochitsya-metan/)

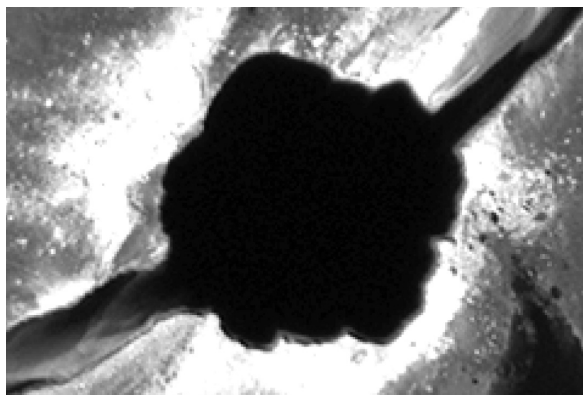
Анализ космического снимка места расположения воронки (рис. 4.20) показал наличие бугров, располагающихся на месте будущего кратера и развивающихся в русле реки.





**Рис. 4.20. Космоснимки площади выброса газа:**  
1, 2 — Sentinel-2 4 сентября 2015 г. и 17 июня 2016 г., 3, 4 — PlanetScope 18 и 27 июня 2017 г. [Богоявленский и др., 2019]

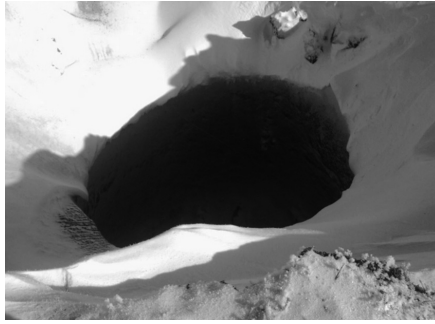
Летом 2018 г. на месте газового выброса сформировалось изометричное расширение русла (рис. 4.21).



**Рис. 4.21. Космоснимок водоёма, сформировавшегося на месте воронки газового выброса WV-1 20 июля 2018 г. [Богоявленский и др., 2019]**

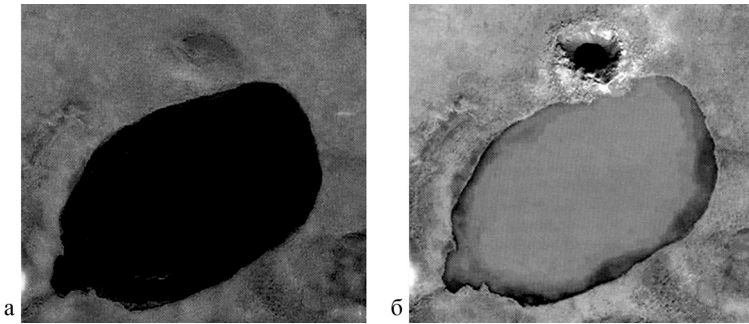
#### ***УeníГЕС (восточная часть п-ва Гыдан)***

Воронка расположена на юго-западном побережье Енисейского залива, поблизости от Дерябинского газового месторождения. По описаниям она находится на левом берегу реки Монгоче, в 10–15 км от устья, в 110 км по прямой от поселка Носок. Была обнаружена на Таймыре жителями посёлка Носок Сергеем Лапсуем и Станиславом Яптунэ в апреле 2013 г. Диаметр обнаруженной воронки составляет около 4 м при глубине около 100 м (рис. 4.22).



**Рис. 4.22. Воронка ВГВ-4 (апрель 2013 г.). Фото С. Яптунэ**

Анализ спутниковых снимков (рис. 4.23) показывает, что на месте кратера в 2009 г. располагался бугор пучения диаметром 20–25 м [Сизов, 2015; Богоявленский и др., 2016].



**Рис. 4.23. Снимки территории формирования воронки газового выброса со спутника DigitalGlobe:**  
**а — 1 августа 2009 г., б — 19 июля 2013 г. [Богоявленский и др., 2016]**

Воронка имеет правильную круглую форму. Непосредственно к ней примыкает вал из крупных глыб породы светлого цвета и льда. Мелкие обломки разбросаны на расстояние в несколько сотен метров (рис. 4.24). В непосредственной близости от воронки обломки мёрзлой породы и льда достигают размеров до  $3 \times 5$  м (рис. 4.25). Судя по внешнему виду обломков и отсутствию следов термического разрушения, выброс произошёл в период отрицательных температур.



**Рис. 4.24. Глыбы льда, разбросанные вокруг воронки. Фото С. Яптунэ**



**Рис. 4.25. Глыбы льда в непосредственной близости от воронки. Фото С. Яптуноэ**

По данным О.С. Сизова [Сизов, 2015], размеры воронки по состоянию на июль 2013 г. составили: диаметр — 35 м по внешней границе и 20 м — по внутренней. За полтора года (два летних сезона 2013–2014 гг.) 4-метровая воронка превратилась в частично заполненный водой округлый котлован (рис. 4.26) [Епифанов и др., 2014]. На момент полевого обследования (лето 2014 г.) диаметр котлована составлял примерно 70 м, глубина — от 12 до 18 м [Сизов, 2015]. За два летних сезона в результате таяния многолетней мерзлоты и обрушения (оползания, размыва) стенок воронки её диаметр увеличился более чем в 15 раз, а глубина уменьшилась на три четверти. Данных о содержании метана в районе воронки нет.



**Рис. 4.26. Котлован диаметром около 65 м, образовавшийся на месте 4-метровой «Дерябинской» воронки за два летних сезона (август 2014 г.). Фото В.А. Епифанова**

### ***ErkGEC (южный Ямал)***

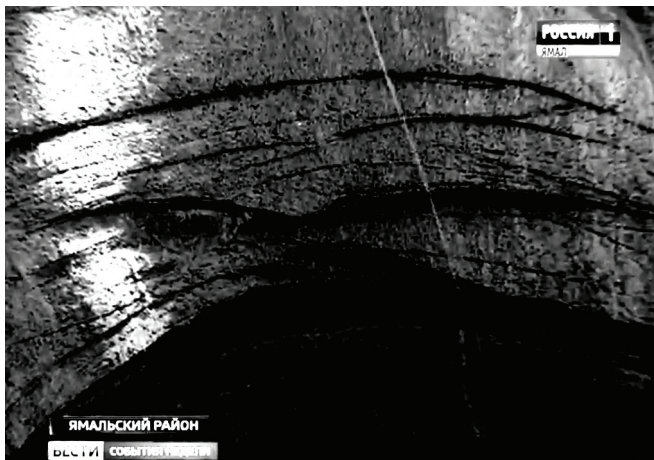
Воронка обнаружена группой исследователей под руководством А. Соколова летом 2017 г. в пойме реки Еркутаяхи (рис. 24, 25), в 220 км на север от Салехарда и 30 км восточнее арктического научно-исследовательского стационара Еркута (рис. 4.27). По словам А. Соколова: «Там абсолютно ничего не было, было ровное место. В прошлом году его выпятило, и было видно, что почва наверху надломленная. Абсолютно новое образование 2016 года — это точно. И вот в 2017 году, как нам сказали ненцы, зимой, но это может быть и январь, и март, и апрель — в общем, когда был снег, оно взорвалось, и там был

огонь» [[http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post\\_9.html](http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post_9.html) от 3 июля 2017 г.]. Диаметр обнаруженной воронки на момент первого обследования составлял 8 м, глубина около 20 м. Она расположена на обводнённой поверхности в непосредственной близости от старичного озера, в полосе кустарника (рис. 4.27).



**Рис. 4.27. Расположение Еркутинской воронки в пойме реки Еркутаяхи. Скриншот видео А. Соколова [[http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post\\_9.html](http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post_9.html)]**

Верхняя часть Еркутинской воронки сложена слоистыми песками мощностью 3–4 м. Ниже залегает горизонт, состоящий из перемежающихся слоёв чистого льда и ледогрунта (рис. 4.28, 4.29).



**Рис. 4.28. Слоистость пластового льда, вскрывающегося в Еркутинской воронке. Скриншот видео А. Соколова [[http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post\\_9.html](http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post_9.html)]**

В краевой части воронки наблюдается локальная зона деформированного льда. Здесь слои льда, выгнутые вверх, образуют кольцевую структуру из вертикально ориентированных трещин (рис. 4.29). Над ней расположена зона перемятых обожжённых пород.





**Рис. 4.29. Ледяные слои, «задранные» вверх, расположенные под зоной обожжённых пород. Скриншот видео А. Соколова [http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post\_9.html]**

В начале декабря 2017 г. на Еркутинской воронке работала экспедиция в составе представителей департамента по науке и инновациям ЯНАО, Сколковского института науки и технологий, учёных регионального центра изучения Арктики и Сообщества молодых мерзлотоведов России. Специалисты зафиксировали изменения, произошедшие с воронкой с июля 2017 г. За полгода воронка заметно изменилась. В июле 2017 г. диаметр воронки составлял 10–12 м, глубина — 20 м. Зимой диаметр увеличился до 17,5 м (рис. 4.30). На глубину 8–10 м воронка заполнилась водой.



**Рис. 4.30. Еркутинская воронка, вид сверху (декабрь 2017 г.). Фото А. Соколова**

Летом 2018 г. Еркутинская воронка превратилась в водоём округлой формы (рис. 4.31), таких на Ямале множество.

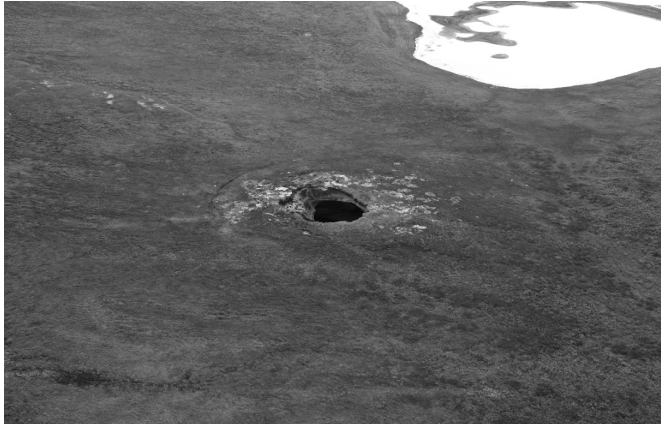


**Рис. 4.31. Еркутинский кратер (июнь 2018 г.). Скриншот видео А. Соколова [https://www.youtube.com/watch?v=8iCVkT1kHi8&feature=youtu.be]**



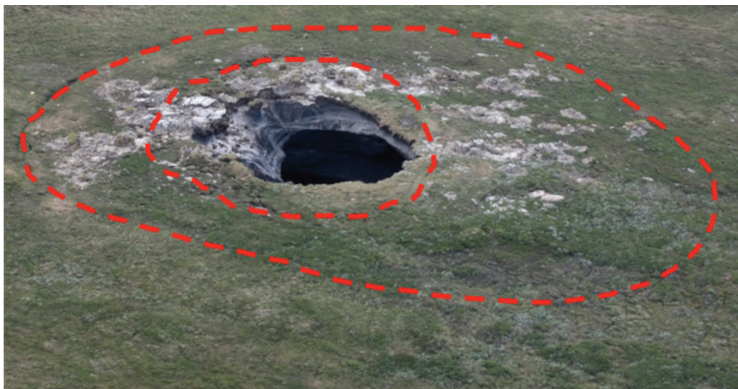
***Воронка Осокина (местоположение неизвестно)***

Фотография данной воронки была сделана А.Б. Осокиным из вертолёта 26 июня 2013 г. на п-ве Ямал (рис. 4.34). Точное её местоположение не установлено.



**Рис. 4.34. Воронка, п-в Ямал (26.07.2013 г.). Фото А.Б. Осокина**

Воронка размерами примерно 20×30 м и глубиной около 30–40 м расположена в ложбине, выходящей к озёрной котловине (см. рис. 4.34). Непосредственно под маломощным заторфованным почвенным слоем залегает слоистая ледогрунтовая толща, в которой и сформирована воронка. Стенки воронки острые, неровные, не затронутые процессами термоденудации. В нижней части наблюдается расширение. Полость сухая. Грунт разбросан вокруг воронки неравномерно. В стороне нагорной части склона сосредоточены наиболее массивные блоки. Здесь в непосредственной близости от воронки грунт отброшен и перевернут, растительный покров оказался внизу. При этом обнажилась широкая полоса ледяного массива, формирующего борта воронки. На противоположной стороне грунтовые блоки меньше и расположены они дальше, чем на предыдущем участке. Судя по тому, что грунт уже оттаял, но ещё не оплыл даже на выступающих участках (рис. 4.35), взрыв произошёл в весенне-зимний период, предшествовавший съёмке. Вокруг воронки наблюдаются минимум две серии концентрических трещин, сформировавшихся при оседании грунта после взрыва (см. рис. 4.35).



**Рис. 4.35. Концентрические трещины, сформировавшиеся вокруг воронки. Фото А.Б. Осокина**

В нижней части воронка расширяется. Хотя никаких признаков существования бугра пучения, предшествующего взрыву, не наблюдается, наличие серии кольцевых просадочных трещин (см. рис. 4.34, 4.35) позволяет предположить, что небольшое поднятие все же было сформировано.

#### ***Воронка, обнаруженная в 2020 г.***

В 2020 г. корреспондентами телевидения была обнаружена видеосъемка новой воронки газового выброса, обнаруженной в центральной части полуострова Ямал (рис. 4.36, 4.37, 4.38). Кратер данной воронки имеет круглую форму. По своему строению она похожа на Ямальский кратер. Верхняя часть представляет собой конус, сложенный глинистыми осадками с сетчатыми криотекстурами, в которых преобладают вертикальные шлиры (рис. 4.37, 4.38). С глубины около 10 м кратер представляет собой цилиндр с вертикальными стенками, состоящими из льда. Диаметр верхней, расширенной, части кратера составляет около 50 м, диаметр нижней цилиндрической части около 30 м. Глубина кратеров достигает нескольких десятков метров.



**Рис. 4.36. Воронка газового выброса, обнаруженная в 2020 г. на п-ве Ямал. Скриншот видео [<https://yandex.ru/video/preview?filmId=>]**



**Рис. 4.37. Криогенное строение глинистой толщи в стенке конусообразной части кратера (см. рис. 4.36) (сетчатые криотекстуры с преобладанием вертикальных шлиров). [<https://edition.cnn.com/2020/09/04/world/craters-tundra-siberia-trnd-scen/index.html>]**



**Рис. 4.38. Воронка газового выброса, обнаруженная в 2020 г. на п-ве Ямал.**

**Фото М. Лукашкина**

[[https://www.nakanune.ru/service/photo.php?path=image\\_big\\_182052.jpg&title64=wu7w](https://www.nakanune.ru/service/photo.php?path=image_big_182052.jpg&title64=wu7w)]

#### **4.2. Существующие гипотезы формирования воронок газового выброса**

Анализ материалов исследования воронок газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири, позволил сделать некоторые обобщения.

1. Все воронки приурочены к так называемым тёплым мерзлотным ландшафтам вблизи водоёмов. GEC-1 расположена на стыке хасырея и нижней части склона, поросшего кустарником; GEC-2 сформировалась в долине ручья; GEC-3 и YeniGEC сформированы на берегу водоёма; SeYkhGEC образовалась непосредственно вблизи русла реки; ErkGEC образовался в пойме реки, вблизи старичного озера в полосе кустарника; AntGEC сформирован на месте хорошо прогреваемого песчаного раздува, на бровке террасовой поверхности, разрушаемой термоэрозийными процессами; воронка Осокина расположена на днище ложбины, покрытой кустарником.

2. Все обнаруженные воронки имеют округлую форму, размер большинства воронок 10–20 м (до 50 м) в поперечнике и глубина 20–70 м.

3. Для всех воронок (стенки или выброшенный материал) характерно наличие льдистых пород или пластовых льдов.

4. Вокруг всех воронок наблюдается концентрический разброс грунта. Радиус разброса может превышать 100 м, что свидетельствует о значительных давлениях газа при взрыве.

5. На некоторых участках (GEC-1, GEC-2, AntGEC, YeniGEC, SeYkhGEC, ErkGEC) непосредственно перед взрывом зафиксированы бугры пучения высотой 2–6 м. Выявленное время существования бугров составляет от 2 лет (ErkGEC) до 70 лет (GEC-1). По косвенным данным (результатам дендрологических исследований, устным сообщениям местных жителей) скорость роста бугров перед взрывом может колебаться от 0,7 см/год (GEC-1) до 200 см/год (ErkGEC). В местах выхода газа на мелководных образовавшихся озёр могут формироваться сезонные бугры пучения (AntGEC) (Богоявленский, 2018).

6. В воронках (GEC-1, SeYkhGE) [Стрелецкая и др., <https://www.ks-yanao...>], в которых удалось сделать анализ газового состава, обнаружен метан. Это совпадает с составом газа в образцах многолетнемёрзлых пород Бованенковского месторождения, отобранных в параметрических скважинах. Здесь метан составляет 98,4–99,9% [Криолитозона..., 2013]. В то же время в верхней части ледяных стенок GEC-1 преобладает углерод [Vorobyev et al., 2019].

7. Некоторые взрывы сопровождались возгоранием газа (SeYkhGEC, ErkGEC).

По мнению специалистов, занимавшихся проблемой происхождения воронок газового выброса: В.И. Богоявленского [2015], М.О. Лейбман, А.И. Кизякова [2016], М.И. Эпова, И.Н. Ельцова, В.В. Оленченко [2014], С.Н. Булдовича, В. Хилимонюк [2018], А.Н. Хименкова [2017], Е.Н. Чувиллина [Chuvilin et al., 2020] и др. — данные образования обязаны своим происхождением выбросу подземного газа. При этом по поводу происхождения самого газа единой позиции пока не выработано. По генезису он может быть катагенетическим и поступать из глубинных подмерзлотных горизонтов, биохимическим, образующимся в результате жизнедеятельности микроорганизмов, и смешанным.

Кратко рассмотрим основные гипотезы происхождения воронок газового выброса, сформировавшиеся к настоящему времени.

**В.И. Богоявленский** [Богоявленский, 2018]. Многолетнемёрзлые породы являются региональным флюидоупором, мешающим вертикальной миграции газа. Под действием неоднородности пластовых давлений происходит миграция газа в субгоризонтальном направлении с последующим прорывом на поверхность земли или в водную толщу через ослабленные зоны (разломы, термокарстовые озёра с таликами, бугры пучения) [Богоявленский, 2014; Богоявленский, 2015]. По данным автора, GEC-1 и GEC-2 приурочены к зоне аномально высокого теплового потока. В целом для данной гипотезы следует отметить слабую проработку геокриологической составляющей (структурно-текстурные особенности строения многолетнемёрзлых пород и льдов, последовательную смену мерзлотных процессов).

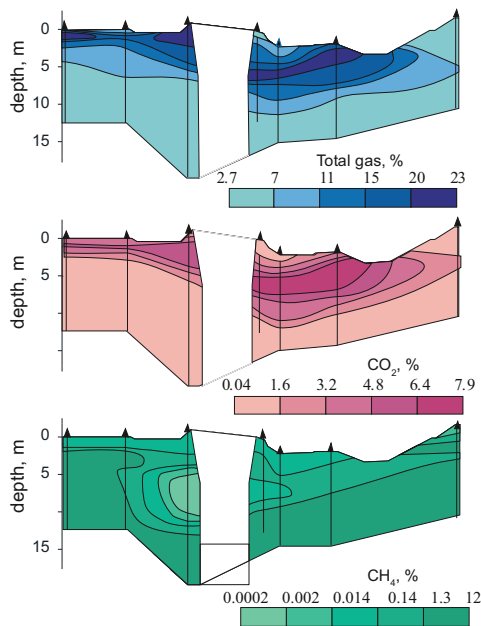
**М.О. Лейбман, А.И. Кизяков и др.** [Лейбман, Кизяков, 2016]. Положительный экстремум лета 2012 г. привёл к повышению температуры в слое гидратосодержащих мёрзлых пород, к высвобождению газа при диссоциации газогидратов (в основном метана) и образованию воронок газового выброса. Для подтверждения данной гипотезы необходимо выяснить, может ли аномальный прогрев в течение 1–2 летних сезонов повлиять на разложение газогидратов, залегающих на глубине около 60 м, а также на накопление и движение газа в многолетнемёрзлых породах. Измерения температуры грунтов в районе Марре-Сале показывают, что таких резких колебаний не наблюдается [Дубровин и др., 2015]. Гипотеза М.О. Лейбман базируется на представлениях о влиянии кратковременного прогрева верхней части многолетнемёрзлых пород за счёт летних температур воздуха. При этом отсутствует анализ температурных кривых в глубоких скважинах. Не берётся во внимание стадийность протекания процессов. Не используются данные по строению воронок. Не учитываются данные геофизики о строении толщи многолетнемёрзлых пород. В то же время данная гипотеза универсально подходит при рассмотрении заключительной стадии всех других гипотез. Если представить, что на фоне нарастающих давлений в кровле мёрзлых пород происходит накопление деформаций и её прочность со временем уменьшается, то сезонное повышение температуры на глубине около 10 м приведёт к резкому падению прочностных свойств мёрзлой кровли, что может спровоцировать взрыв и образование воронки.

**И.Д. Стрелецкая** [Стрелецкая и др., 2017]. По материалам исследования Ямальского кратера (GEC-1) высказано предположение, что метан мог концентрироваться и заполнять полость, которая фиксируется по наличию «грота» высотой около 5 м и радиусом 2 м, прослеживающегося от дна кратера. При образовании воронки метан полностью вышел на поверхность и смешался с воздухом. Необходимо оценить причины появления этих пустот, обосновать и оценить механизмы формирования и возможность длительного существования.

**С. Булдович, В. Хилимонюк, А. Бычкова и др.** [Buldovich et al., 2018]. Формирование Ямальского кратера (GEC-1) связано с взрывным разрушением подозёрного талика. Толщина мёрзлых грунтов над таликом на момент его разрушения составляла от 7 до 9 м.



Талик представлял собой водно-грунтовую газонасыщенную смесь с растворённым газом (в основном углекислым) бактериального происхождения. Верхнюю часть талика занимал слой газа. Гипотеза авторов базируется на анализе образцов, отобранных с глубин 10–17 м, и соответствует только верхней части кратера. Первоначальная глубина Ямального кратера (GEC-1) составляла около 60 м. Распространение выводов, сделанных для верхней части кратера, на большие глубины требует дополнительного обоснования. Материалы, представленные на конференции геокриологов в Шамони и позднее опубликованные [Supplementary Materials..., 2018], свидетельствуют о том, что мощность талика под озером не превышала 10–15 м. На рис. 4.39 представлены данные по содержанию газа в отложениях, вскрытых скважинами. Отложения, в которых прослеживается повышенное содержание газа формируют линзовидное тело мощностью около 10 м. Наибольшее общее содержание газа приурочено к центральной части линзы. Данный слой соответствует двустороннему промерзанию подошёрного талика. Сходное строение наблюдается и в отношении содержания углекислого газа. В нижней и верхней части линзы его количество уменьшается. В подстилающих линзу отложениях общее содержание газа и углекислого газа наименьшее. В отношении содержания метана наблюдается обратная зависимость в центральной части линзы его содержание наименьшее, а в подстилающих осадках наибольшее (см. рис. 4.39).



**Рис. 4.39. Содержание газа в подземном льду [Supplementary Materials..., 2018].** Общая концентрация газа представлена в % при нормальных условиях, нормированных к объёму подземного льда. Для  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  — в % в газовой смеси при нормальных условиях. Судя по результатам анализа содержания газа, мощность подошёрного талика не превышала 10–15 м. Ниже породы оставались в мёрзлом состоянии. Промерзание талика и дало наблюдаемую картину. Линза льдистой слоистой мёрзлой породы с повышенным содержанием углекислого газа, соответствующая талику под озером, вложена в массив с повышенным содержанием метана



Исследования, проведённые летом и осенью 2014 г., показали высокое содержание метана в воздухе внутри воронки и в пузырьках воздуха во льду в нижней части кратера [Стрелецкая и др., 2017]. Такие же результаты получены М.О. Лейбман с соавторами, по данным которых содержание метана в воде озера, образовавшегося на дне Ямальского кратера, значительно превышает значения в воде обычных озёр (примерно 500–900 ppm по сравнению с 15 ppm в среднем для окружающих озёр). Предложенный С. Булдовичем и др. механизм формирования воронок газового выброса, несомненно, может иметь место, но для предложенных условий он выполняется в ограниченных диапазонах (верхние 10–15 м).

**М.И. Эпов, И.Н. Ельцов, В.В. Оленченко и др.** [Эпов и др., 2018]. Причиной появления Ямальского кратера (ВГВ-1) стало разрушение газогидратов на глубине 60–80 м. Источником повышенного теплового потока может быть крупная нефтегазоносная структура, тепловой поток от которой разогрел газогидраты в верхней части разреза. Кроме того, на исследуемой площади были выявлены геоморфологические и геофизические признаки тектонических нарушений, в узле пересечения которых расположен кратер. Разложение газогидратов в толще мёрзлых пород под действием теплового потока вполне возможно. Остаётся невыясненным, каким образом с глубины 60 м мёрзлая порода могла быть выброшена на поверхность. По расчётам В.П. Мёрзлякова [Хименков и др., 2017] на данной глубине для выброса грунтового массива необходимо давление около 10 МПа. При разложении газогидратов при отрицательных температурах создаваемое давление не превышает 2,6 МПа [Истомин и др., 2018]. Для других воронок повышенный тепловой поток не доказан. Поэтому данная гипотеза требует дальнейшего подтверждения.

**Е.Н. Чувилин с соавторами.** Гипотеза Е.Н. Чувилина, опубликованная в 2020 г., связывает формирование воронок газового выброса с возникновением подозёрного талика и последующим его промерзанием. К талику приурочено накопление биогенного газа. В зоне гидратосодержащих высокотемпературных мёрзлых пород происходит диссоциация газогидратов с выделением напорных газов. К таликовой зоне приурочены каналы поступления катагенного глубинного газа. Газ различного генезиса накапливается в таликовых осадках и концентрируется при промерзании талика. После достижения определённого давления газа в промерзающем талике на поверхности формируется бугор пучения с последующим взрывом. К сожалению, справедливые допущения не подкрепляются фактическим материалом [Chuvilin et al., 2020].

**А.Н. Хименков и др.** [Хименков и др., 2017]. Воронки газового выброса являются результатом саморазвития локальных газодинамических геосистем, являющихся частью геосистем газонасыщенных многолетнемёрзлых пород. Развитие данных локальных геосистем носит вероятностный характер, поскольку зависит от множества различных природных факторов. В каждом отдельном случае история развития воронки газового выброса выясняется путём структурных исследований криогенного строения стенок воронок и обломков выброшенной мёрзлой породы, а также изучения строения кернов скважин, пробуренных вблизи взрыва, и материалов геофизических исследований. Только в этом случае выводы о механизмах и процессах формирования каждой отдельной воронки могут основываться на фактическом материале, а не исходить из общих теоретических представлений.

При изучении воронок газового выброса чаще всего обращают внимание на морфометрические показатели (ширина, глубина) и их изменение во времени. Несомненно, данные параметры позволяют охарактеризовать масштабы подземного взрыва, зафиксировать его конечный результат, выявить динамику изменения размеров образовавшихся воронок. Однако процессы и структурные изменения породы, подготавливающие взрыв, с помощью

измерения размеров образовавшихся конечных форм выявить и оценить невозможно. Следует учитывать, что породы, соответствующие объёму воронки, являются лишь небольшой локальной частью геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород. Находясь в устойчивом термодинамическом состоянии, данная геосистема может длительно стабильно существовать. Газовые карманы в многолетнемёрзлых породах, в которых газ находится в свободном состоянии, гидратосодержащие мёрзлые породы, газонасыщенные субаквальные осадки, потоки глубинного газа, разгружающиеся на поверхности, — все эти геосистемы существуют столетия и тысячелетия. Но если равновесные условия нарушаются: повышается температура мёрзлых пород, уменьшается внешнее давление (при бурении, понижении уровня моря, таянии ледника) — начинается всестороннее промерзание осадков или формируется мёрзлый барьер на пути глубинного газа. Эти изменения приводят к чередованию комплексов процессов, меняющих структуру первичной газонасыщенной геосистемы. В ней формируется локальная, неустойчивая геодинамическая геосистема, развитие которой в конечном итоге приводит к физическому взрыву и образованию воронки газового выброса. Проиллюстрируем данное положение на примере анализа истории формирования Ямальского кратера (сами результаты структурных исследований будут даны в разделе 4.3).

Основным источником газа, обуславливающим взрывные процессы в многолетнемёрзлых грунтах, являются гидратосодержащие многолетнемёрзлые породы, а причиной нагрева, выводящего их из равновесного состояния, — озёра, широко распространённые в Западной Сибири. Подготовка взрыва происходит в несколько этапов [Хименков, Станиловская, 2018] (рис. 4.40).

1. Исходным толчком, вызвавшим все последующие события, является локальный прогрев толщи многолетнемёрзлых пород (ММП). Под поверхностным водоёмом формируются талик и зона растепления мёрзлых пород с более высокими отрицательными температурами, чем в окружающих многолетнемёрзлых породах. Под действием локального нагрева под поверхностным водоёмом в мёрзлых породах происходит повышение температуры в пределах отрицательных значений. В области локального прогрева ММП под озёрами температуры многолетнемёрзлых пород находятся в диапазоне  $-1 \dots -3$  °C.

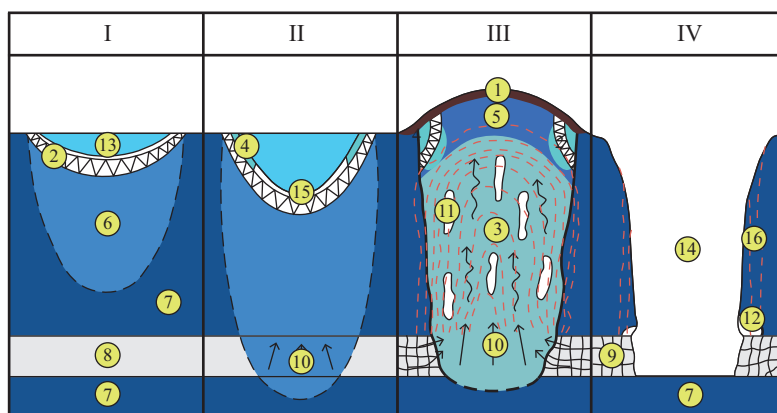
2. После того как температуры в слое газогидратов, залегающих на глубине 60–80 м [Оленченко и др., 2015], превысят значения, обеспечивающие их устойчивое состояние, начинается процесс диссоциации с выделением метана с начальным давлением 2,2–2,6 МПа [Истомин и др., 2018].

3. Газ, находящийся под давлением, начинает фильтроваться в наименее прочные мёрзлые породы высокотемпературной зоны, одновременно деформируя их. Между фильтрацией газов и пластическими деформациями устанавливается парагенетическая связь, обуславливающая саморазвитие геосистемы. Газ под давлением проникает в мёрзлую породу, что значительно ослабляет её прочность и вызывает пластические деформации льда. Появившиеся трещины и дислокации ускоряют фильтрацию газа. Отвод газа (за счёт фильтрации) стимулирует процесс диссоциации газогидратов и выравнивает давление газа до прежнего уровня. Данный процесс поддерживает высокое давление в фильтрующихся газовых пузырьках. Постепенно в области единого фильтрационного пространства формируется ледогрунтовой газонасыщенный шток, пронизывающий массив многолетнемёрзлых пород. По всей высоте штока давление в пузырьках газа будет соответствовать значениям, наблюдающимся в зоне диссоциации. Высокое давление в массиве многолетнемёрзлых пород с одновременным давлением снизу приведёт к движению ледогрунтового штока. При этом, как в штоке, так и в контактирующих слоях вмещающих пород форми-

руется зона кольцевых трещин, ориентированных параллельно потоку. Данная зона является дополнительным каналом поступления газа в верхние горизонты.

4. Движение газонасыщенной ледогрунтовой массы вверх приводит к пластическим деформациям верхнего слоя талых пород (талика), его выпучиванию и промерзанию. В результате образуется низкотемпературный газонепроницаемый прочный 6–8-метровый слой многолетнемёрзлой породы, являющийся экраном для движущегося снизу газового потока. При деформации экранирующего горизонта под воздействием давления снизу развивается бугор пучения.

5. После того как пластические деформации мёрзлой кровли достигнут предельных значений, происходят её разрыв и выброс ледогрунтового материала, насыщенного газом, находящимся под повышенным давлением [Хименков и др., 2017; Хименков, Станиловская, 2018].



**Рис. 4.40. Стадии развития Ямального кратера (I, II, III, IV):**

1 — покровный горизонт; 2 — слой льда между талыми и мёрзлыми породами; 3 — мёрзлый газонасыщенный ледогрунт со следами пластических деформаций; 4 — инфильтрационно-сегрегационный лёд; 5 — газонепроницаемая кровля ММП; 6 — зона повышения температуры в ММП под озером; 7 — ММП вне отопляющего воздействия озера; 8 — слой гидратосодержащих ММП; 9 — зона разуплотнения в слое гидратосодержащих ММП, примыкающая к кратеру; 10 — направление движения флюидов; 11 — газовые флюиды; 12 — гроты и каверны в нижней части кратера; 13 — озеро; 14 — кратер, сформировавшийся после выброса газонасыщенного ледогрунта; 15 — талик; 16 — субвертикальная слоистость в мёрзлой породе и льду (оформление Д. Волкова)

Различные начальные условия, а также разнообразие и интенсивность протекающих в период подготовки взрыва процессов обуславливают различные сценарии развития воронок газового выброса: от выхода газа в подозёрный талик (в случае большого глубокого озера) до взрыва без образования бугра (в случае залегания газогидратов на небольшой глубине и их быстрого разложения).

Подводя итог рассмотрению гипотез формирования воронок газового выброса, следует отметить, что на сегодняшний день ни одна из них не подкреплена достаточным количеством исходных геологических данных. Прежде всего отсутствуют данные о строении и морфологии криогенных образований, формирующих мёрзлые породы воронок газового

выброса. Это не позволяет проследить смену процессов, связанных с историей развития локальной газодинамической геосистемы и подготовкой физических взрывов в многолетнемёрзлых породах. Недостаточно данных об источнике поступления газа. Отрывочны сведения о строении слагающих воронки мёрзлых пород и льдов. Имеются лишь единичные данные о структуре льда. В наиболее полном виде эти данные имеются для Ямальского кратера (GEC-1), но и в этом случае единой позиции по поводу его происхождения нет.

#### 4.3. Стадийность развития воронок газового выброса

Несмотря на разнообразие естественных взрывных процессов в криолитозоне, сценариев и условий их подготовки, можно выделить некоторые общие, присущие всем черты. Прежде всего обязательно наличие флюида (*fluidus* — текучий). В нашем случае мы рассматриваем в роли флюидов воду, газ и их сочетание. Анализ материалов по строению гидролакколитов, наледных бугров пучения, воронок газового выброса позволил выработать общую схему развития взрывных процессов в криолитозоне.

Первой стадией подготовки взрывного процесса является формирование области возникновения флюида. При промерзании таликов образуются замкнутые пространства, в которых происходит криогенная концентрация газа. Для массива гидратосодержащих мёрзлых пород это области повышения температуры, где возможны диссоциация газогидратов и выделение газа, находящегося под высоким давлением. В засоленных мёрзлых грунтах газ может накапливаться в криопэгах. По тектоническим трещинам газ может поступать из-под мерзлотных горизонтов.

Вторая стадия связана с перераспределением флюида из области первичного накопления в область меньшего давления. При этом формируется зона транзита. Для промерзающих талых пород поток грунтовых вод направлен в сторону растущих бугров пучения (сезонных или многолетних). Для области распространения криопэгов зона транзита обеспечивает отжимание засоленных вод в области с меньшим давлением. Для гидратосодержащих пород это участки высокотемпературных многолетнемёрзлых пород, по которым газ отжимается из зоны диссоциации в область меньших давлений (как правило, к поверхности). Участки проникновения флюидов из-под слоя многолетнемёрзлых пород приурочены к зонам повышенных тепловых потоков.

Третья стадия связана с формированием зоны накопления флюида. Чаще всего эта зона локализуется на небольшой глубине, под кровлей низкотемпературных или льдонасыщенных многолетнемёрзлых пород.

Четвертая стадия связана с возникновением пластических деформаций газо- и водонепроницаемой кровли, при повышении давления в области накопления флюида. Внешне области пластических деформаций проявляются в виде бугров пучения. После того как давление преодолеет прочность кровли, происходит взрыв.

Выделенные стадии отражают общую последовательность событий, подготовки естественных взрывных процессов, но не пространственное расположение зон, соответствующих разным фазам. Например, при промерзании внутригрунтового водного потока 1-я, 2-я и 3-я фазы располагаются в пределах одной зоны. При промерзании талика 1-я и 2-я фазы расположены в одних границах. При быстром нарастании давления 4-я фаза может быть слабовыраженной.

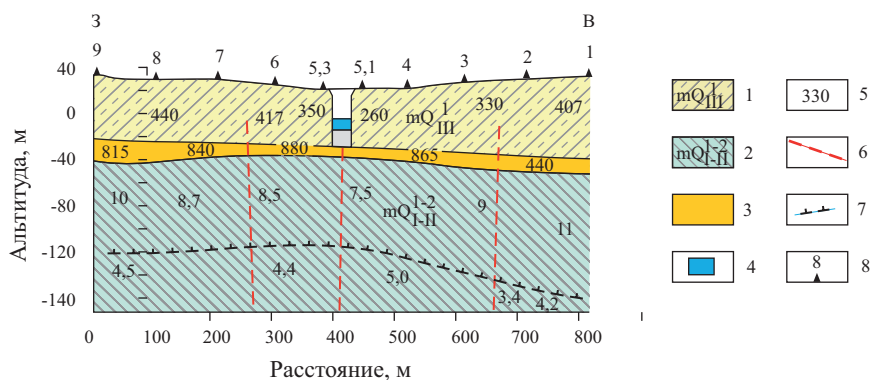
Как указывалось выше, только структурные исследования строения мёрзлых пород, слагающих стенки воронки, позволят проследить изменения, происходящие в локальной геосистеме, и выявить историю её развития. Данный подход предполагает, что даже при

наличии первичной гипотезы следует сверять и уточнять её (а может, и пересматривать), учитывая результаты структурных исследований строения мёрзлых пород (стенок кратера, кернов скважин, пробуренных около воронки, обломков выброшенной породы). Ниже будут рассмотрены материалы изучения криогенного строения различных воронок газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири.

Поскольку общая последовательность процессов формирования воронок газового выбросов похожа, то стадийность их развития будет рассмотрена на примере наиболее изученного Ямальского кратера (ГЕС-1) (рис. 2.1) с добавлением данных по другим аналогичным объектам [Лейбман, Плеханов, 2014; Богоявленский, 2015; Оленченко и др., 2015; Богоявленский, Гарагаш, 2015; Эпов и др., 2014; Кизяков и др., 2015; Лейбман, Кизяков, 2016; Сизов, 2015; Хилимонюк и др., 2016; Хименков и др., 2017; 26 и др.].

### 4.3.1. Геология

Наиболее обоснованной причиной возникновения Ямальского кратера является локальное разложение гидратов в толще льдонасыщенных мёрзлых пород. Геофизиками Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука по данным зондирования становлением поля на глубине 60–80 м выявлен коллектор газогидратов (рис. 4.41) [Эпов и др., 2014; Оленченко и др., 2015]. Л.Б. Волкомирской с коллегами в ходе обследования георадарами ГРОТ 12 и ГРОТ 12Н на глубине 50–70 м были выделены линзовидные прослои песка с предположительно газогидратными включениями [Волкомирская, 2015]. Полученные независимо друг от друга данные позволяют обоснованно предположить наличие слоя газогидратов на глубине 60–70 м. Это дает возможность выбрать в качестве наиболее обоснованной причины формирования Ямальского кратера диссоциацию газогидратов при повышении температуры. Источником повышения температуры в гидратосодержащих многолетнемёрзлых породах является формирование поверхностного водоёма и талика под ним мощностью 10–15 м [Хилимонюк и др., 2016; Buldovich et al., 2018; Supplementary Materials..., 2018].



**Рис. 4.41. Геологический разрез в районе Ямальского кратера:**

**1** — супеси и суглинки высокольдистые, с пластовым льдом; **2** — суглинок, нижнесреднеплейстоценовые морские отложения ямальской серии; **3** — коллектор газогидратов; **4** — вода в кратере; **5** — удельное электрическое сопротивление пород; **6** — разлом; **7** — нижняя граница многолетнемёрзлых пород; **8** — пункт измерения процесса становления электромагнитного поля [Оленченко и др., 2015]



### 4.3.2. Структурные элементы воронок газового выброса, связанные с историей их формирования

#### Гроты и каверны

В нижней части Ямальского кратера обнаружена серия гротов и каверн (рис. 4.42, 4.43). На момент обнаружения в июле 2014 г. они представляли собой скопления округлых углублений в нижней части стенки кратера размером от 20–30 см до 2–3 м, разделённые ледогрунтовыми перегородками (см. рис. 4.41, 4.42). Уже к концу лета 2014 г. вследствие протаивания перегородок мелкие гроты слились и образовали обширные единые полости (гроты) (рис. 4.43). Над зоной каверн и гротов породы и криогенные текстуры деформированы. Здесь первичная слоистость образует куполообразную облекающую структуру, в которой наблюдаются многочисленные пластические и разрывные деформации (рис. 4.44, 4.45). Наиболее вероятной причиной деформирования слоистости над гротами является воздействие области высокого давления, появление которой логично связать с разложением газовых гидратов. Зона каверн и гротов приурочена к газогидратному слою [Эпов и др., 2014; Оленченко и др., 2015] и разуплотнённому слою выветрелых пород [Волкомирская и др., 2015]. Следует отметить, что образования, аналогичные зоне каверн и гротов Ямальского кратера, обнаружены на участках выбросов газа (за счёт разложения газогидратов) в окрестностях острова Беннетта (Новосибирские острова) и в Охотском море. Здесь, в районе газового фонтана, исследованы характерные формы: провальные воронки, ямы, поддонные ниши и пещеры, образующие систему сообщающихся гротов [Дядин, Гущин, 1998].



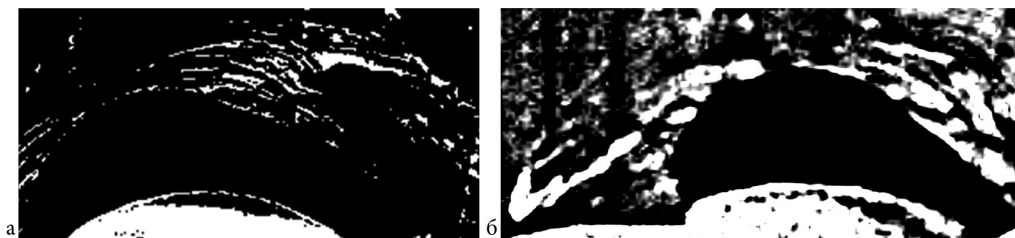
**Рис. 4.42. Каверны и гроты в зоне разложения газогидратов Ямальского кратера (июль 2014 г.). Фото В.А. Пушкарёва**



**Рис. 4.43. Мелкие каверны, парагенетически связанные с гротами. Фото В.А. Пушкарёва**



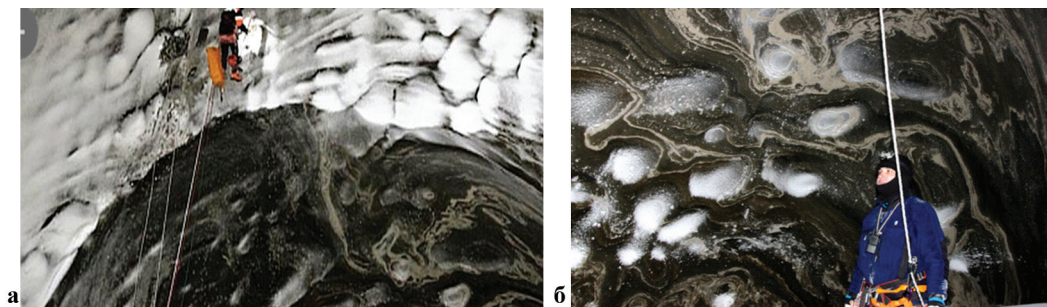
**Рис. 4.44.** Состояние грота на ноябрь 2014 г. Фото В.А. Пушкарёва



**Рис. 4.45.** Деформация первичной слоистости над гротом

#### Газовые флюиды

В ледяных стенках каверн и гротов наблюдается густая сеть изгибающихся, ветвящихся лент, соответствующих каналам газовых флюидов, направленных по углом 60–70 °С к центру кратера. Здесь же встречаются шарообразные образования с повышенным содержанием газовых включений. В большинстве случаев ленты обтекают шарообразные газовые образования, при этом формируются разнообразные складчатые формы (рис. 4.46, б). Газовые флюиды подходят к вертикальным стенкам, где соединяются с серией ячеек, неравномерно распределённых по всей поверхности кратера (рис. 4.44, 4.45, а).



**Рис. 4.46.** Газовые флюиды в стенках грота в нижней части Ямальского кратера: а — зона контакта газовых флюидов с ячеистой структурой на стенке кратера; б — строение газовых флюидов (стенка грота). Фото В.А. Пушкарёва (ноябрь 2014 г.)

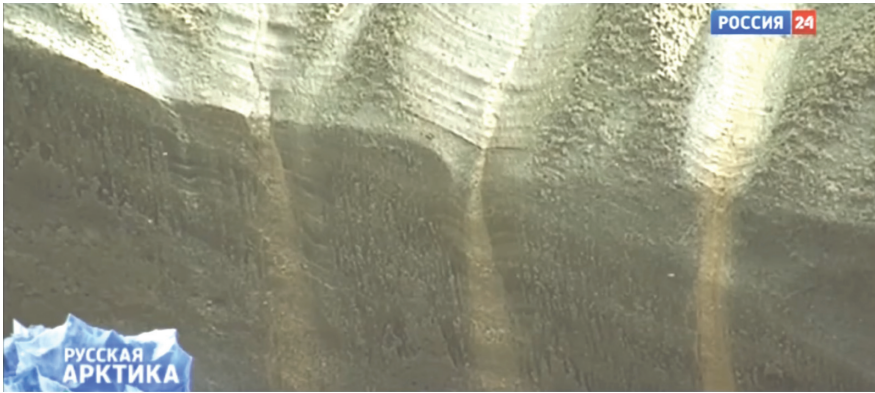
Зоны каверн и гротов и приуроченная к ним сеть газовых флюидов соответствуют формированию стадии первичного накопления газа, находящегося под высоким давлением. Возникновение данной области связано с разложением газовых гидратов, залегающих на глубине 60–80 м.

### 3 стадия. Формирование газонасыщенной области над зоной диссоциации газогидратов

Газонасыщенные мёрзлые породы, залегающие выше зоны диссоциации газогидратов, были удалены при образовании Ямальского кратера. Данные об их строении и процессах формирования можно получить изучая стенки кратера. Оставшийся после взрыва и поэтому доступный для изучения слой газонасыщенного слоистого ледогрунта, формирующий стенки кратера, имеет небольшую мощность (первые метры). Если в 2014 г. данный слой прослеживается на всей поверхности, то к середине лета 2015 г. он практически полностью оттаял. Это свидетельствует о том, что зона газонасыщенного ледогрунта лишь незначительно превышает границы кратера. Стенки кратера являются периферией существовавшего до взрыва геологического тела. Можно обоснованно предположить, что само тело представляет собой газонасыщенный, сильно дислоцированный ледогрунтовый шток диаметром около 15 м и высотой около 50 м.

#### Строение стенок кратера

Лёд, формирующий стенки кратера, слоистый, с прослоями вертикально ориентированных минеральных включений алевритового состава [Кизяков и др., 2015]. Слои льда толщиной 0,5–2,5 см чередуются с минеральными слоями толщиной 0,2–1 см. На рис. 4.47, 4.48 изображена слоистость льда в стенке кратера в месте перегиба от воронкообразной верхней части к вертикальной цилиндрической.

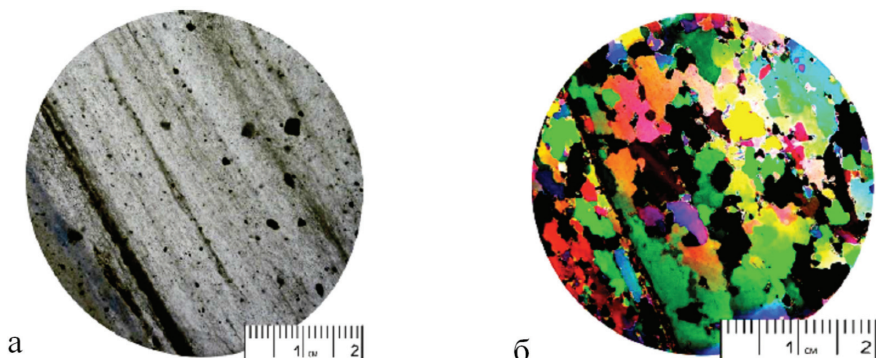


**Рис. 4.47. Субвертикальная слоистость льда, окаймляющего Ямальский кратер (июль 2014 г.). Скриншот видео [https://www.youtube.com/watch?v=BCvqHHRO-Q4]**

Кристаллы льда в слоях удлинённые, ориентированы длинной стороной в направлении общей слоистости (рис. 4.48–4.50). Во льду наблюдаются включения мелких пузырьков газа диаметром около 0,01 см, расположенных хаотично или параллельно включениям. Образцы льда, отобранные в зоне слоистого льда и проанализированные Э.И. Галеевой с соавторами [Галеева и др., 2016], показали, что слоистость обусловлена вязкопластическим течением льда. Деформации сдвига приводят к деформации льда пластовой залежи, фор-



мированию вертикального штока с многочисленными складками, вторичной слоистости (кливажу), ориентированной под углом до  $60^\circ$  к горизонтально залегающей первичной слоистости. Изучение структуры слоистого льда Ямальского кратера показало чёткое деление льда на слои толщиной около 1,5 см. Кристаллы в слоях удлинённые, ориентированы длинной стороной в направлении общей слоистости (см. рис. 4.48) [Галеева и др., 2016].



**Рис. 4.48. Лёд из воронки газового выброса (Ямальский кратер): а — снимок в проходящем свете; б — снимок в поляризованном свете [Галеева и др., 2016]**

#### **Кольцевая структура, приуроченная к стенкам кратера**

Рассмотренная выше слоистость стенок Ямальского кратера формирует вертикально ориентированную слоистость, которая в горизонтальном срезе представляет собой кольцевую структуру (см. рис. 4.49, 4.50) [Лейбман, Кизяков, 2016; Стрелецкая и др., 2017].



**Рис. 4.49. Кольцевая структура, облекающая Ямальский кратер. Штриховкой обозначено направление субвертикальных слоёв в зоне, прилегающей к стенкам кратера, сплошной линией — нижняя граница деятельного слоя. Фото В.В. Оленченко**

Аналогичная кольцевая структура наблюдается в стенках Антипаютинской воронки (AntGEC), обнаруженной на юго-западе Гыданского п-ва (см. рис. 4.12). Лёд, слагающий стенки этой воронки, имеет многочисленные следы пластических деформаций. По краю воронки образовалась кольцевая зона с вертикально ориентированной слоистостью (рис. 4.50).



**Рис. 4.50. Кольцевая структура вокруг Антипаютинского кратера. Фото М. Лапсуя**

#### **Газовые включения**

Главным элементом строения стенок кратера является сплошное распространение газовых пузырей, проявляющихся в виде округлых ячеек размером от нескольких сантиметров до десятков сантиметров и глубиной до 5–10 см. Распределение ячеек по поверхности стенок неравномерно, они могут образовывать изометричные скопления или выстраиваться в цепочки субвертикальной ориентировки (рис. 4.51).



**Рис. 4.51. Ячеистый лёд в стенке Ямальского кратера (июль 2014 г.). Фото В.И. Богоявленского [Богоявленский и др., 2015]**

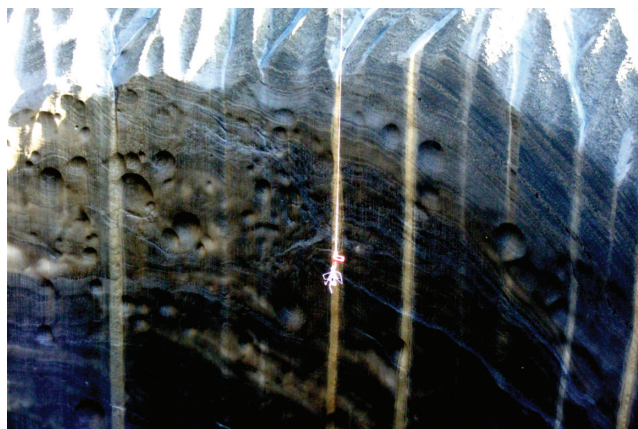
Многие ячейки имеют вытянутую в вертикальном направлении форму с утолщением в верхней части, что придаёт им каплевидную форму (рис. 4.52). В стенках ячеек прослеживается несколько ледогрунтовых слоёв. Можно предположить, что при своём движении сквозь слоистую ледогрунтовую толщу газовые пузыри сохраняли свою форму. Горизонтальные ледяные слои, распространённые в стенках кратера, деформируются восходящим потоком газа (4.52)





**Рис. 4.52. Морфология газовых ячеек в стенках Ямальского кратера. В левом нижнем углу слой льда деформирован в месте контакта с газовым пузырьм**

Кроме изометричных газовых ячеек стенки кратера пронизаны субвертикальными, субгоризонтальными ветвящимися трещинами и волнистыми лентами, заполненными газонасыщенным льдом (рис. 4.53).



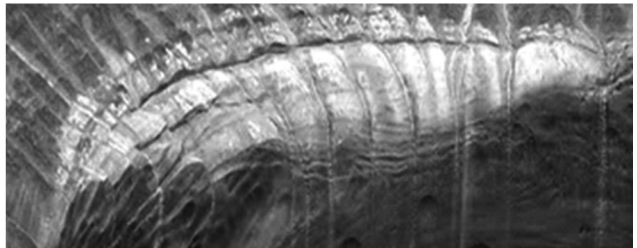
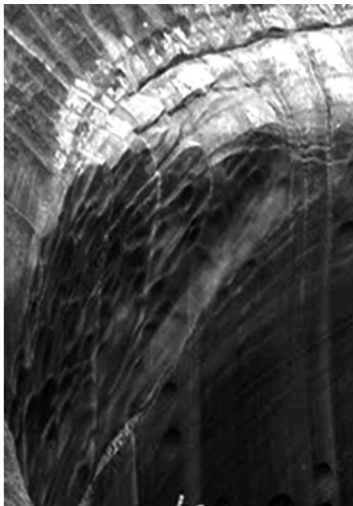
**Рис. 4.53. Строение газонасыщенной толщи. Фото В.В. Оленченко**

### **Сотовый лёд**

При этом строение газонасыщенного слоя неоднородно, а сами ячейки распределены неравномерно. Иногда они образуют сгущения. На этих участках они формируют сотовую структуру (рис. 4.54). На небольшом участке размером 3×4 м при взрывном образовании воронки сотовая структура была срезана в двух плоскостях (рис. 4.55), что дало возможность наблюдать её строение в объёме. Вытянутые вверх ячейки похожи на сдавленные пчелиные соты. Контакт с мёрзлой породой резкий, со следами деформаций. Между поверхностью кратера и сотами наблюдается слой белого слоистого льда переменной толщины, от 2–3 до 20–30 см, и длиной до 2–3 м. Между льдом сотового льда и вмещающей породой наблюдаются трещины.

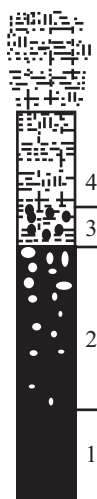


**Рис. 4.54. Слой ячеистого льда толщиной около 0,5 м, формирующий часть стенки кратера (июль 2014 г.). Фото В.В. Оленченко**



**Рис. 4.55. Строение слоя ячеистого льда в верхней части кратера: а — вертикальный срез зоны ячеистого льда; б — горизонтальная поверхность зоны ячеистого льда (июль 2014 г.) (фрагменты рис. 4.66). Фото В.В. Оленченко**

Формирование сотового льда воронок по своему механизму близко к процессам, происходящим в вулканической магме. Вулканическая магма представляет собой высоковязкую массу, пронизанную системой связанных пор и каналов, по которым с опережающей скоростью движется газ. При увеличении количества газовых пузырьков в лаве осуществляется переход жидкости с пузырьками в состояние пены. При приближении пузырьков к состоянию плотной упаковки отдельный пузырек в этом состоянии окружен уже не жидкостью в тонкой перегородке, а качественно иной средой — пенной структурой (рис. 4.56) [Слезин, 1998].



**Рис. 4.56. Возможные структуры двухфазного потока в канале вулкана:**  
**1 — магма без пузырьков; 2 — пузырьковый режим; 3 — режим «разрушающейся пены» (пористая «канальная» среда); 4 — поток газозвеси.**

- 1. Гомогенная зона, в которой по каналу течет жидкость,**
- 2. Пузырьковая зона. В канале находится газово-жидкостный дисперсный поток, в котором сплошная фаза — жидкость.**
- 3. В результате частичного разрушения соприкоснувшихся пузырьков возникает пористая масса, пронизанная сквозными каналами, по которым движется газ с опережающей, но ещё не достаточной для полного диспергирования расплава скоростью.**
- 4. Зона дисперсного потока, в которой непрерывной фазой является газ — зона газозвеси. Особенно велика зона плотной газозвеси в случае крупных частиц с высокой пористостью (пемзы) [Слезин, 1998].**

Рассмотренная модель может быть применена для понимания процессов, формирующих сотовую структуру в газонасыщенном льду. Высокая температура льдистых многолетнемерзлых пород, определяющая их незначительную прочность, в сочетании со значительным насыщением газом, находящимся под большим давлением, создаёт условия для образования сотовых структур. Лёд в данном случае играет роль вязкой движущейся расплаивающейся массы, через которую под напором фильтруется газ. Вытянутые и сплюснутые ячейки свидетельствуют о движении газовых пузырей снизу вверх при одновременном сжатии. Ячеистый лёд занимает верхнее положение в газонасыщенной толще, сформировавшейся при миграции газа сквозь льдонасыщенную породу.

### **Пластические и разрывные деформации пород, слагающих стенки Ямальского кратера**

Строение стенок кратера указывает на то, что материал перераспределялся преимущественно в результате пластических деформаций и течения льда и ледогрунта. На фоне общего движения вверх на локальных участках вследствие неравномерности нагрузок происходило изменение давлений, скоростей перераспределения и направления движения материала и, как следствие, развитие пластических и разрывных деформаций (рис. 4.57, 4.58).



**Рис. 4.57. Пластические деформация и следы течения мёрзлых пород в средней части зоны вертикально ориентированной слоистости. Ямальная воронка (июль 2014 г.). Фрагмент фото М.О. Лейбман [Лейбман, Плеханов, 2014]**

Свидетельством значительных нагрузок в породах, слагающих стенки кратера, являются зоны хрупких разрушений с образованием оперяющих трещин, по которым проникали газовые включения (рис. 4.58), обнаруженных А.И. Кизяковым при исследовании стенок кратера в ноябре 2014 г.



**Рис. 4.58. Стенка кратера. Лёд разбит трещинами с грунтовыми и газовыми включениями. От основной трещины (сплошная красная линия) расходится серия оперяющих трещин (штриховые красные линии). Фото А.И. Кизякова [[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=50&v=9-3fqxa5l3g](https://www.youtube.com/watch?time_continue=50&v=9-3fqxa5l3g)]**



Часто пластические и разрывные деформации встречаются вместе. На рис. 4.59 показано внедрение газонасыщенного льда по контакту перекрывающей кровли и газонасыщенной зоны. Внедряющийся фрагмент представляет собой деформированное изометричное образование, являющееся ядром жёсткости, продавливаемым сквозь мёрзлую породу. Оно вдавлено во вмещающий слоистый ледогрунт. О силе вдавливания можно судить по трещинам, образующим клиновидный рисунок (рис. 4.60). Трещины также прослеживаются по нижней и верхней границе ядра жёсткости. Наблюдается резкое несогласие слоёв, образующихся при движении ядра жёсткости, и вмещающих слоёв, они прорваны и деформированы. Вдоль зоны движения прослеживаются режеляционные ленты сильно деформированного льда. Данный процесс соответствует заключительной стадии формирования локальной газодинамической геосистемы. Наблюдается значительное давление газа, способное в локальных зонах приводить к литодинамическим эффектам, выражающимся в деформациях и внедрении отдельных ледяных фрагментов в мёрзлые массивы. Но для разрыва кровли данного давления пока не хватает.



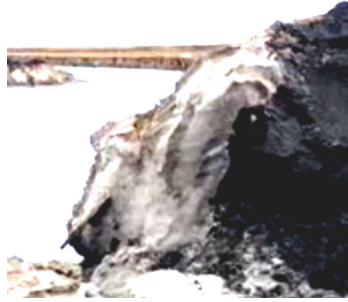
**Рис. 4.59. Пластические и разрывные деформации в верхней части при внедрении газонасыщенного льда в мёрзлую породу. Ямальский кратер. Фото А.В. Лупачёва**



**Рис. 4.60. Зона внедрения газонасыщенного льда (фрагмент рис. 4.57). Фото А.В. Лупачёва**



Подобные структуры внедрения наблюдаются и на других воронках газового выброса. Например, на Сеяхинской воронке ледогрунтовые блоки внедряются в вышележащую песчаную толщу. На рис. 4.61, 4.62 изображены поверхностные пески, подвергшиеся пластическим деформациям под воздействием давления нижележащих газонасыщенных ледогрунтов. Единственным источником силового воздействия на кровлю может быть только высокое давление внутригрунтового газа.



**Рис. 4.61. Пластические деформации песчаных пород под воздействием нижележащих газонасыщенных ледогрунтов**

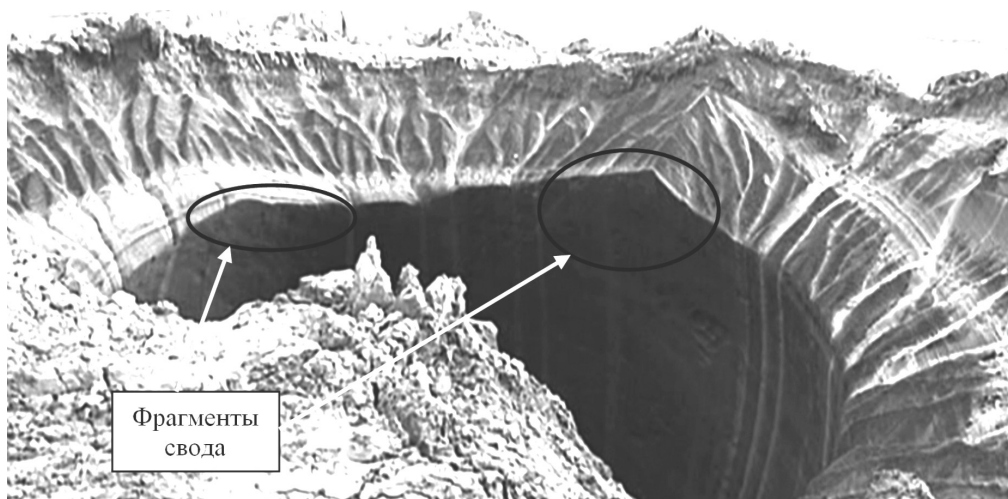
[<http://www.yamalpro.ru/2017/07/03/iz-novoy-yamalskoy-voronki-prodolzhaet-sochitsya-metan/>]



**Рис. 4.62. Блок газонасыщенного ледогрунта, проникающего в слой перекрывающих его песков. Ледогрунт усыпан мелкими ячейками, соответствующими газовым включениям [Богоявленский и др., 2019]**

### **3 стадия Куполообразная кровля газонасыщенной области**

При первичном обследовании Ямальского кратера в июле 2014 г. на границе вертикального ствола и расширяющейся части кратера на фотографиях хорошо прослеживаются остатки куполовидного свода (рис. 4.63), который, по-видимому, перекрывал слой газа, подстилающего мёрзлую кровлю. Данное образование представляет собой гладкую поверхность, нависающую над вертикальным стволом кратера. На ней видны округлые углубления (каверны), аналогичные обнаруженным на поверхности вертикального ствола (рис. 4.64). Можно предположить, что свод в виде купола сформировался на верхней границе штока газонасыщенного льда, рассмотренного ранее. Морфология поверхности свода свидетельствует о том, что между ним и газонасыщенными породами образовалась линза сжатого газа, которую можно считать зоной накопления. К августу 2014 г. остатки свода вытаяли.



**Рис. 4.63. Ямальский кратер. Фрагменты свода над газонасыщенной зоной, оставшиеся после выброса (июль 2014 г.). Фото В.А. Пушкарёва**

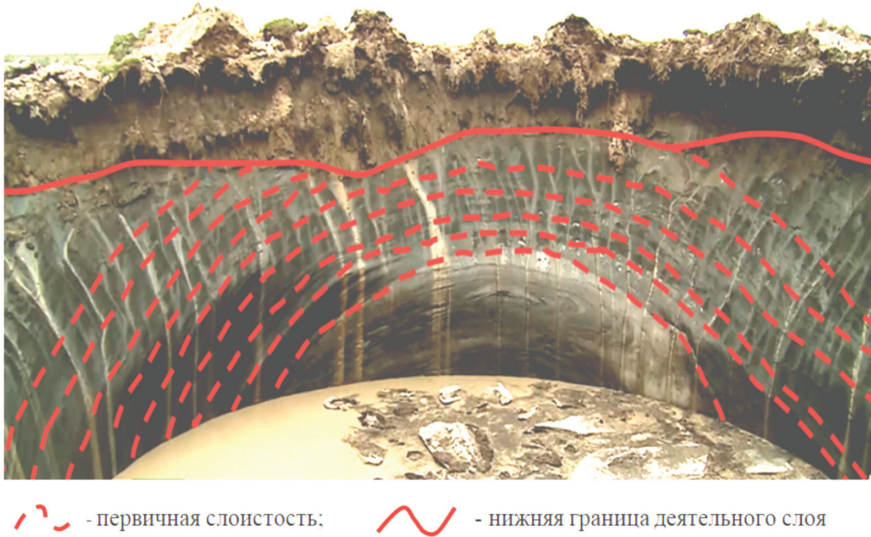


**Рис. 4.64. Каверны на поверхности свода над газонасыщенной зоной (фрагмент рис. 4.63)**

#### **4 стадия Пластические деформации кровли низкотемпературных мёрзлых пород с образованием бугров на поверхности**

Слоистые суглинки, составляющие верхнюю часть разреза мёрзлых пород Ямальского кратера, испытали мощное воздействие газонасыщенного ледогрунтового штока. Это воздействие привело к пластическим деформациям мёрзлой кровли и формированию бугра высотой около 8 м и диаметром около 50 м. На фотографии, сделанной в 2015 г., видна часть газонасыщенного штока и облегающего его слоистого суглинка (рис. 4.65). В центральной части, соответствующей вершине бугра пучения, огиб слоев максимален. В крайних частях слои опускаются и погружаются под воду образовавшегося в кратере озера.

Для Дерябинской воронки характерны аналогичные процессы. Взрыву, приведшему к формированию воронки, предшествовал этап интенсивного движения ледяного тела, деформирующего перекрывающие отложения (рис. 4.66).

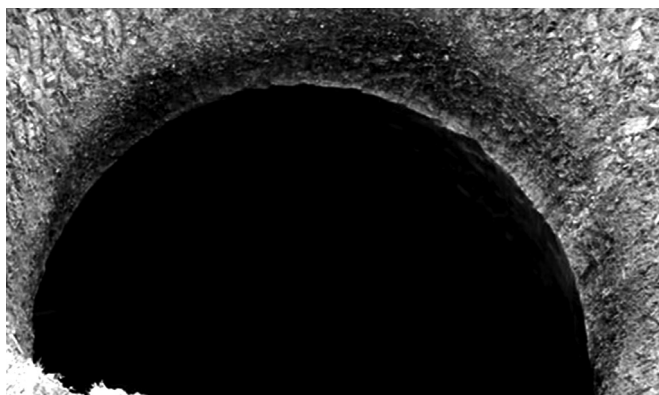


**Рис. 4.65. Куполовидная деформация кровли многолетнемёрзлых пород кратера над газонасыщенным ледогрунтовым штоком. Скриншот с видео «тайна Ямальского кратера» (26 июля 2015 г.)**  
[\[https://russian.rt.com/article/105424\]](https://russian.rt.com/article/105424)

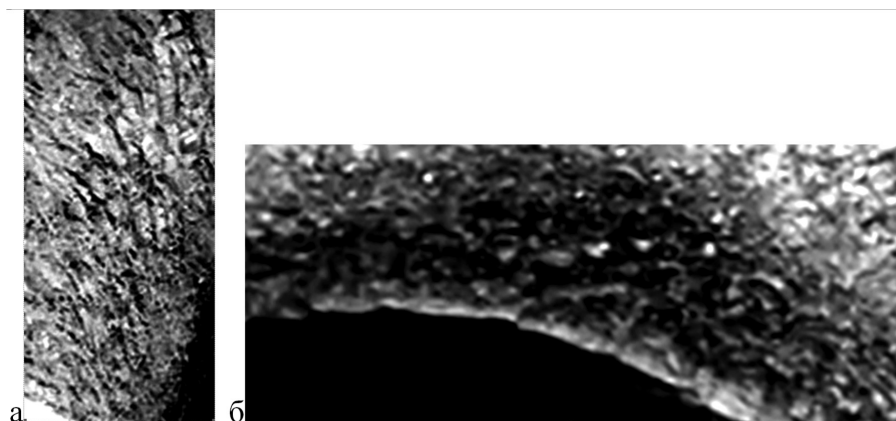


**Рис. 4.66. Дерябинская воронка. Деформации перекрывающих ледяное тело пород. Фото В. Елифанова [Елифанов, 2018]**

В одной из вновь обнаруженных в 2020 г. воронок (рис. 4.37–4.39) наблюдается зона деформации слоистости осадков и первичного криогенного строения, примыкающая к стенке цилиндрической части кратера (рис. 4.67). В этой зоне первичная слоистость осадков и шпирь льда смяты (рис. 4.68). Её наибольшая мощность около 3 м, на расстоянии 5–6 м от центральной части она выклинивается. Данная зона деформаций первичного криогенного строения соответствует зоне пластических деформаций газонепроницаемой кровли. Давление газа не только деформирует сетчатые криотекстуры, сформировавшиеся в глинистой толще, но и выжимает мёрзлые породы вверх, образуя бугор пучения. Данные процессы непосредственно предшествуют взрыву, формирующему воронку.



**Рис. 4.67. Криогенное строение мёрзлых слоистых суглинков, перекрывающих воронку, обнаруженную в 2020 г. (фрагмент рис. 4.38)**  
[<https://yandex.ru/video/preview?text=новые%20воронки%20на%20ямале%20на%20карте&path>]

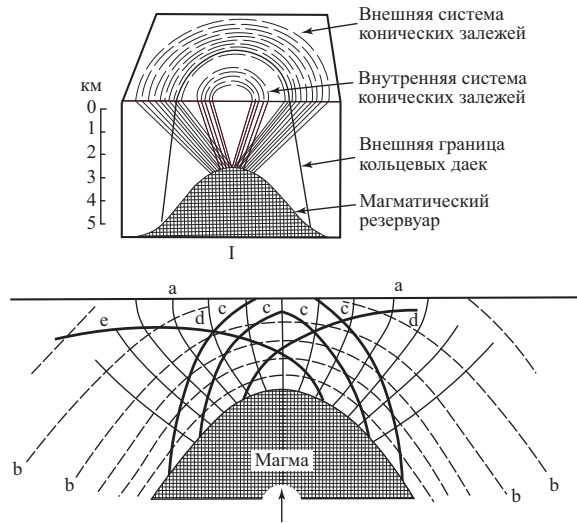


**Рис. 4.68. Фрагменты криогенного строения глинистой толщи в стенке конусообразной части кратера:**  
**а** — первичные сетчатые криотекстуры с преобладанием вертикальных шлиров; **б** — зона деформации (первичная слоистость осадков и шлиры льда смяты), примыкающая к стенке воронки  
[<https://yandex.ru/video/preview?text=новые%20воронки%20на%20ямале%20на%20карте&path>]

#### **4.3.3. Обзор работ по лабораторному моделированию процессов, связанных с течением твёрдого материала**

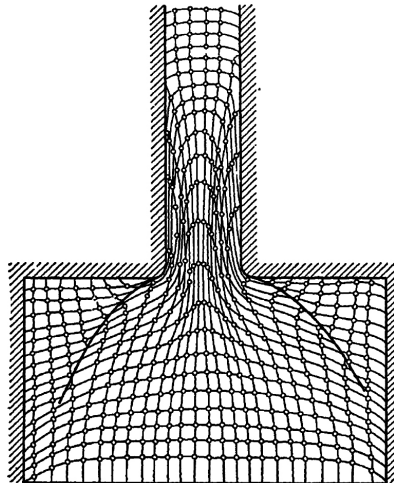
Для понимания процессов, происходящих при формировании вертикальной слоистости вокруг стенок Ямальского кратера, воспользуемся результатами исследования вулканических процессов. Часто вокруг подводящих каналов в кратере вулканов возникают зоны узких вертикальных слоёв — кольцевых даек (рис. 4.69). Кольцевые дайковые серии обусловлены вертикально направленным движением, вызванным понижением или повышением давления в вулканическом очаге [Святловский, 1971].





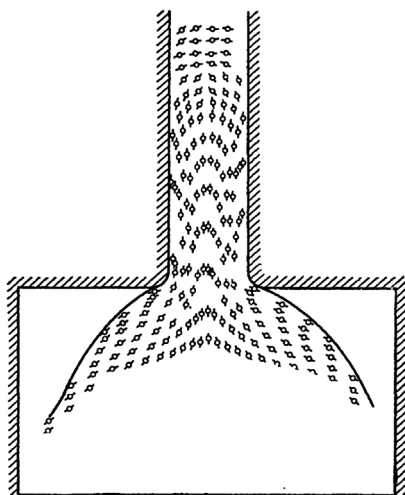
**Рис. 4.69. Блок-диаграмма конических залежей (I) и взаимоотношение напряжений с коническими залежами и кольцевыми дайками (по Е.Ш. Хиллсу) [Святловский, 1971]**

Подобные напряжения должны возникать при давлении, указанном стрелкой. Тонкие сплошные (*a*) и штриховые (*b*) линии представляют собой траектории главных напряжений (*c*). Сколовые трещины типа *d* имеют небольшое или даже обратное (*e*) падение [Святловский, 1971]. Для анализа напряжений, возникающих при движении пластической массы, воспользуемся моделью вязкопластического движения материала, продавливаемого вверх через канал круглого сечения [Надаи, 1969]. На рис. 4.70, 4.71 показаны результаты лабораторного моделирования движения вулканической массы через цилиндрический канал.



**Рис. 4.70. Деформация прямоугольной сетки линий после проведения эксперимента по определению направлений главных деформаций в медленно движущейся пластической массе, продавливаемой через узкое отверстие [Надаи, 1969]**



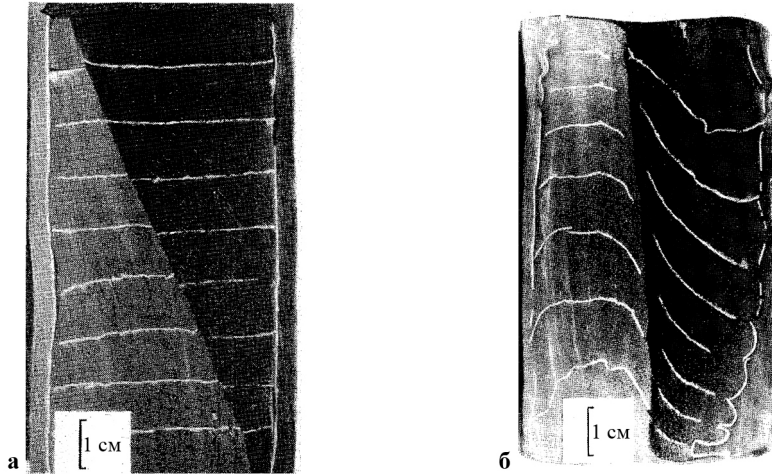


**Рис. 4.71. Ориентация направлений главных деформаций в пластической массе, продавливаемой через канал [Надаи, 1969]**

Хорошо видно, что в пластической массе, продавливаемой через цилиндрический канал, развиваются деформации и формируются текстуры, аналогичные образованиям, возникшим в стенках Ямальского кратера. Проведённые В.И. Соломатинным эксперименты, в которых на массив льда оказывалось локально ориентированное давление, при возможности бокового расширения, по нормали к действующему усилию, показали развитие структур, аналогичных описанным выше. Возникающее течение выдавливания формирует структуры макрофлюидального полосчатого сложения со слоистым расположением минеральных и газовых включений [Соломатин, 2013]. Образование кольцевой слоистой структуры вокруг кратера обусловлено продавливанием ледогрунта через сформированный в массиве многолетнемёрзлых пород цилиндрический канал. Структурно-текстурные особенности строения стенок кратера указывают на то, что перед взрывом на месте кратера располагался газонасыщенный ледогрунтовой массив в виде штока. Шток,двигающийся вверх, неравномерно деформировал первичную слоистость вмещающей сильнольдистой породы. Данные структуры наблюдаются в Ямальском, Антипаютинском, Еркутинском кратерах. Процессы, обуславливающие формирование слоя с субвертикальной ориентировкой, обрамляющего Ямальский кратер, хорошо иллюстрирует эксперимент по центрифугированию образца, состоящего из силикона различной плотности. В результате эксперимента маркерные линии, равномерно располагавшиеся перпендикулярно боковым поверхностям образца, были деформированы (рис. 4.72).

В результате давления, возникающего при центрифугировании, более плотный материал нагнетался вдоль вытянутой оси образца. В относительно неподвижном, более лёгком материале в результате растягивающих усилий при приближении к границе раздела двух сред угол наклона уменьшается практически до нуля. Вблизи границы раздела формируется узкая зона субпараллельной слоистости. В более тяжёлом материале, перемещающемся под воздействием центрифугирования, центральная часть продвигается на большее расстояние, краевые части при этом отстают (рис. 4.72). Около границы раздела двух сред также формируется узкая зона субпараллельной слоистости, соответствующая сжимающим нагрузкам. Расположение зон деформаций в данном опыте идентично рас-

положению слоёв ледогрунта по краям воронок газового выброса. Кольцевые структуры в Ямальском кратере, Антипаютинской воронке и задраные вверх слои Еркутинской воронки аналогичны деформациям образца в рассмотренном опыте. Выступающая часть в более плотном материале соответствует центральной части газонасыщенного штока, движение которого определяет рост бугра на поверхности.

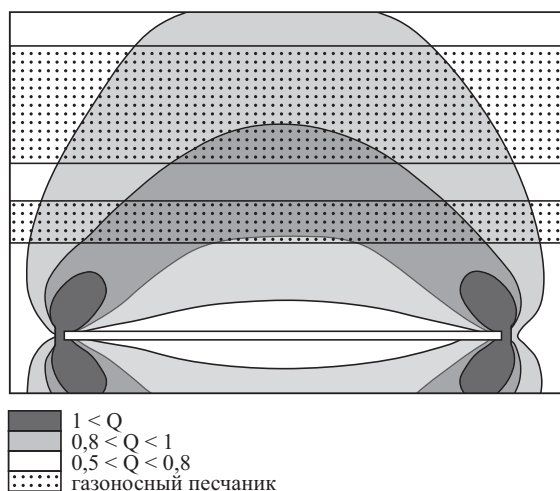


**Рис. 4.72. Деформация при центрифугировании образца силикона разной плотности; более легкий (темный), более тяжёлый (светлый): а — строение образца до центрифугирования; б — строение образца после центрифугирования [Лукьянов, 1989]**

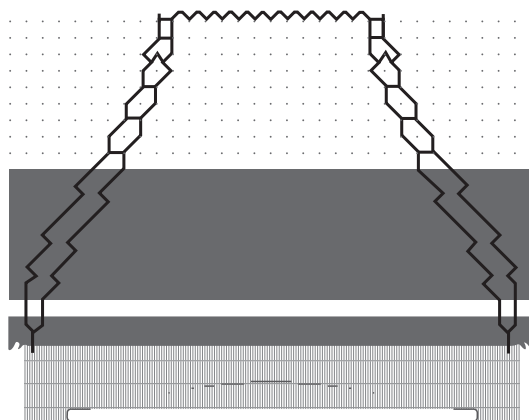
В пластах горных пород в естественном состоянии, несмотря на природную неоднородность состава и свойств, деформированность и нарушенность в результате различных геологических и тектонических воздействий, массив горных пород находится в статическом равновесии, с установившимся начальным полем напряжений. В результате проведения горных выработок и извлечения полезных ископаемых нарушается равновесное состояние породного массива. Вследствие этого возникают дополнительные поля напряжений в виде свода, под действием которых начинается фильтрация метана, содержащегося в горных породах. Использование метода конечных элементов с учётом напряженно-деформированного состояния угленосного массива позволяет выявить границы области фильтрации метана, распределение его давлений и расходов. Область начала микрорастрескивания соответствует зоне, где  $0,5 < Q < 0,8$ , а область интенсивного трещинообразования — зоне  $0,8 < Q < 1$  (рис. 4.73) [Круковская, 2004]

На рис. 4.74, 4.75 показаны результаты численного моделирования фильтрации метана в зоне влияния шахтной выработки при помощи метода конечных элементов с учётом напряженно-деформированного состояния угленосного массива.

Хорошо видны зоны скопления метана, приуроченные к границам области фильтрации, где наблюдается наибольшее микрорастрескивание породы. Здесь по контуру свода, у границ области фильтрации, метан из газоносных пород выделяется с наибольшей скоростью и в наибольших объёмах [Круковская, 2004]. Результаты данного моделирования проясняют наличие зон повышенного содержания газа в воронках газового выброса.



**Рис. 4.73. Распределение параметра  $Q$  (объёмный дебит газа) [Круковская, 2004]**



**Рис. 4.74. Распределение расходов метана [Круковская, 2004]**

Обзор работ по лабораторному моделированию процессов, связанных с движением твёрдого материала в массиве, позволяет наглядно представить особенности формирования газонасыщенного ледогрунтового штока, предшествовавшего образованию Ямальского кратера. В результате локального прогрева поверхностным водоёмом формируется высокотемпературный ледогрунтовый массив, вложенный в низкотемпературную толщу многолетнемёрзлых пород. На глубине около 60 м начинается разложение газовых гидратов, при этом создаётся область повышенного давления, обуславливающая фильтрацию газа и деформацию ледогрунта, переходящую в течение. На контакте низкотемпературной области более прочного вмещающего массива и высокотемпературной деформируемой области образуется приконтактная кольцевая зона субвертикальных деформаций. К ней, в силу её большей газопроницаемости, приурочено повышенное содержание газа. Формирование субвертикальной слоистости и повышенная газонасыщенность облегчают движение газонасыщенного штока относительно вмещающего массива низкотемпературных мёрзлых пород.

#### 4.3.4. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса

Область, включающая в себя зону разогрева многолетнемёрзлых пород под поверхностным водоёмом и зону диссоциации газогидратов, формирует область «единого фильтрационного пространства», резко отличающуюся от окружающих низкотемпературных многолетнемёрзлых пород. Газ появляется и заполняет «единое фильтрационное пространство» в том случае, когда в зоне теплового воздействия оказываются гидратосодержащие многолетнемёрзлые породы и нагрев достигает значений, выводящих их из устойчивого термодинамического состояния. В гидратосодержащих многолетнемёрзлых породах при диссоциации наблюдается увеличение порового пространства, в результате чего ранее практически непроницаемые породы могут становиться проницаемыми. В этом случае начинается диссоциация газогидратов с выделением большого объёма газа и запускаются рассмотренные выше процессы. Изучение в лабораторных условиях разложения газогидрата при повышении температуры показало, что в мёрзлых засоленных глинистых грунтах массовое разложение метастабильных гидратов может происходить даже при незначительных повышениях температуры (от  $-6,75$  до  $-6,57$  °C) [Якушев, 2018].

После начала диссоциации газогидратов формируется непрерывный фильтрационный поток, в котором газовый флюид из области с большим давлением (зона диссоциации) по зоне нагрева фильтруется в область с меньшим давлением (как правило, по направлению к поверхности). Неустановившееся «единое фильтрационное пространство» неоднородно, в различных его частях возникают градиенты давления, обеспечивающие фильтрационный массоперенос в мёрзлой породе. При разложении газогидратов соблюдается определённое равновесие между давлением и температурой. В случае неполного разложения газогидрата при изменении термобарических условий происходит восстановление температуры или давления до равновесного значения [Чувиллин и др., 2016]. В горных породах после каждого сброса давления оно возвращалось до значений, соответствующих пластовому [Хант, 1982]. В случае Ямальского кратера давление, возникающее при диссоциации газогидратов, будет поддерживаться на всём протяжении формирования газонасыщенного льда. Газ, отжимающийся в виде флюидов, будет постоянно восполняться в зоне диссоциации. Проникновение газа, находящегося под давлением, в зону высокотемпературных многолетнемёрзлых льдистых пород вызовет их неравномерную деформацию и выдавливание вверх. Проникая в трещины, газовый флюид оказывает силовое воздействие на стенки, что приводит к их расширению [Трофимов, 2012]. В лабораторных условиях в образцах с высокой гидрато- и льдонасыщенностью в результате диссоциации газопроницаемость возрастает на порядок [Чувиллин, Гребёнкин, 2018].

При общей вертикально ориентированной слоистости в строении стенок кратера наблюдается повсеместное присутствие различного рода деформаций, свидетельствующих о неоднородных и разнонаправленных локальных процессах, формирующих структуры выдавливания, течения, внедрения и др. П.А. Шумский такое строение связывает с «течением выдавливания во лёду», возникающим под влиянием ориентированного давления с возможностью бокового расширения. «...оно сопровождается интенсивным складкообразованием с возникновением макрофлюидального полосатого сложения, заметного обычно только по расположению прослоек минеральных включений или воздушных пузырьков» [Шумский, 1955, с. 367]. Данная особенность строения стенок кратера связана с общей спецификой вязкопластического течения льда, при котором периодически накапливаются напряжения, превышающие его упругость, в результате возникают локальные срывы,

вдоль которых отдельные слойки льда проскальзывают по соседним. Такие послойно дифференцированные пластические течения местами сопровождаются скачкообразным изменением скорости движения [Короновский, Якушева, 1991].

Широкое распространение вогнутых округлых углублений, формирующих вертикально ориентированные цепочки или большие изометричные скопления (ячеистый лёд), связано со спецификой деформации газовых включений в мёрзлых грунтах при ориентированном давлении. В этом случае наблюдается сплющивание воздушных пузырьков, которые приобретают форму дисков, ориентированных перпендикулярно направлению давления [Шумский, 1955]. В движущемся льду происходят миграция и слияние отдельных газовых пузырьков [Соломатин, 2013]. Зона повышенного давления, возникающая в движущемся ледогрунтовым газонасыщенном штоке, образует слоистую кольцевую структуру, являющуюся каналом проникновения газа. Сплюснутые пузырьки газа мигрируют по слоям вверх, объединяются и в итоге формируют наблюдаемое в стенках кратера распределение форм следов газовых ячеек.

Движение газонасыщенной ледогрунтовой массы вверх приводит к пластическим деформациям верхнего слоя талых пород, его выпучиванию и промерзанию. В результате возникает низкотемпературный газонепроницаемый, прочный 6–8-метровый слой, перекрывающий растущий бугор пучения.

После того как пластические деформации мёрзлой кровли достигнут определённого предела, происходят её разрыв и снятие давления (декомпрессия) в верхней части штока. Давление в газовых включениях, насыщающих ледогрунт, значительно превосходит атмосферное, но недостаточно для того, чтобы выбросить ледогрунтовый материал за пределы кратера с глубины 60 м [Хименков и др., 2017б]. Поэтому взрывной процесс начинается с верхней части штока и последовательно, но быстро, слой за слоем проникает вниз. Окружающие многолетнемёрзлые низкотемпературные породы, не подвергшиеся растеплению и обладающие большей прочностью, в данный процесс включены не будут.

В ходе формирования Ямальского кратера и других воронок газового выброса наблюдается серия сменяющих друг друга стадий, каждая из которых отличается индивидуальным набором парагенетических процессов и присущих им образований. Особенности развития геосистемы на каждой из стадий подготавливают и во многом определяют её эволюционирование на следующей.

#### **4.4. Сценарии формирования воронок газового выброса в криолитозоне в зависимости от природных условий и истории развития**

Причины, обуславливающие развитие аномально высоких давлений газа в многолетнемёрзлых породах и, соответственно, условий образования воронок газового выброса, могут различаться. К ним относятся: климатический разогрев многолетнемёрзлых пород; промерзание замкнутых таликов, локальный прогрев многолетнемёрзлых пород под поверхностными водоёмами; движение под напором глубинных газовых флюидов и др. Разнообразные геологические условия (состав, строение, условия и глубина залегания и др.) обуславливают строение формирующихся геосистем, динамику, стадии и жизненный цикл их развития. Образование воронок газового выброса реализуется в виде внезапных газодинамических выбросов, обязательным условием которых является наличие достаточно высокого (аномального) пластового давления природных газов, в связи с чем эти явления с полным основанием можно определить как газодинамические. Согласно глубоко разработанной в приложении к геомеханическим условиям подземных горных выработок энер-



гетически-силовой теории внезапных газодинамических выбросов [Петухов, Линьков, 1983] источником силы и энергии для этих выбросов является газ.

В обобщённом виде газодинамический выброс включает в себя несколько стадий развития:

- 1) различную по продолжительности подготовительную стадию;
- 2) саморазвивающийся лавинно непрерывный процесс разрушения части горнопородного массива с последующим выбросом обломочных продуктов разрушения в потоке расширяющегося газа и их инерциальное движение под действием запасённой ими кинетической энергии;
- 3) постепенно затухающее газовыделение из полости выброса. Авторы отмечают, что деление на стадии характеризует резкие последовательные накладывающиеся друг на друга изменения в деформировании породы при динамическом явлении.

Необходимым условием формирования воронок газового выброса (включая их подготовительную стадию, весьма важную, в частности, в диагностическом и прогностическом отношении) является наличие в пустотном пространстве пород достаточно большого количества высоконапорных, т. е. обладающих аномально высоким пластовым давлением, газов. При этом не имеет значения происхождение и состав самого газа, обязательным условием является достижение необходимого давления.

Для формирования воронок газового выброса необходимо выполнение ряда существенных, далеко не всегда и не повсеместно реализующихся в природе условий, важнейшими из которых являются наличие:

- источников и условий длительной интенсивной генерации значительного количества природных газов (биогенных, катагенных, выделившихся при разложении газогидратов);
- каналов миграции природных газов, образующих достаточно мощные сосредоточенные потоки;
- локального газонепроницаемого барьера в поверхностной зоне, препятствующего миграции газов;
- условий для возникновения и поддержания аномально высокого пластового давления природных газов в зоне их скопления под газоупорным барьером [Бергер, 2016].

В каждом конкретном случае следует рассматривать отдельный сценарий развития геосистемы, приводящей (или не приводящей) к формированию воронки газового выброса. Один и тот же процесс в различных природных условиях приведёт к различным результатам. При незначительном и кратковременном повышении температуры диссоциация газогидратов может быстро закончиться в результате самоконсервации. В итоге в ММП может возникнуть зона повышенной пористости за счёт небольших газовых полостей. Если гидратосодержащие ММП залегают на незначительной глубине (20–30 м), то давление газов, образовавшихся при разложении газогидратов, минуя стадию миграции в виде флюидов, может вызвать выброс кровли. При этом необязательно будет формироваться многолетний бугор пучения. Для неглубоко залегающих газогидратов то же самое может происходить в условиях, когда причиной локального повышения температуры является не термокарстовое озеро, а благоприятные ландшафтные условия («тёплые ландшафты»). При достаточной глубине и ширине озера газ, выделившийся при диссоциации, может не накапливаться в ММП, а выделяться из подошёрного талика. Это наблюдается на многих озёрах Ямала [Криолитозона..., 2013; Сизов, 2015].

Выделение газа длится от нескольких месяцев до нескольких лет, но без взрыва, поскольку есть возможность свободного выхода газа. Если скорость нарастания давления

небольшая и кровля успевает деформироваться, то формируются бугры пучения, выраженные в рельефе. При быстром возрастании давления область пластических деформаций может быть слабо выраженной. Рост давления при диссоциации газовых гидратов может происходить быстро. После того как давление в полости превысит прочность кровли, возникает выброс. При этом возможны различные варианты: от небольшого взрыва без образования бугра пучения до образования большого многолетнего бугра, предшествующего пневматическому выбросу мёрзлой кровли. В конечной фазе миграции сквозь многолетнемёрзлые породы газ или поступает в атмосферу, преимущественно через таликовые зоны и поверхностные водоёмы, или накапливается под приповерхностными низкотемпературными газонепроницаемыми мёрзлыми породами. Во втором случае повышение давления выше предела прочности пород вызывает взрыв сжатого газа. Разброс обломков породы достигает десятков, а иногда и сотен метров. Если взрыв сжатого газа сопровождается его возгоранием (а такие случаи отмечены), то сила взрыва многократно увеличивается. В случаях, когда в промерзающих таликах содержится достаточно большое количество газа, воронки газового выброса могут образовываться по типу формирования гидроакколитов. При всестороннем промерзании происходит криогенная сепарация и концентрация газа в линзе воды, подстилающей многолетний бугор пучения. В ядре всестороннего промерзания могут формироваться газогидраты. Большое содержание газа приводит при взрыве к выбросу многолетнемёрзлых пород кровли и подстилающей её воды [Buldovich et al., 2018a; Buldovich et al., 2018b].

## Выводы

Ямальский кратер является примером полного законченного жизненного цикла саморазвития геосистемы, представляющей собой локальную газонасыщенную зону многолетнемёрзлых пород. Прослежены все стадии её развития, от подготовки условий, выражающихся в повышении температуры многолетнемёрзлых пород под поверхностным водоёмом и нарушении термодинамического равновесия в зоне залегания газогидратов, до конечного разрушения и выброса пород при взрыве. Выделены границы геосистемы, рассмотрены её морфология, строение, процессы, обуславливающие её развитие.

Рассмотренная феноменологическая модель формирования Ямальского кратера является лишь частным случаем, отражающим конкретные условия развития воронок газового выброса. Газ, содержащийся в многолетнемёрзлых породах, может отличаться по генезису (подмерзлотные глубинные катагенетические газы, биохимические газы, образующиеся в результате жизнедеятельности в талых и мёрзлых породах, газы, образующиеся при диссоциации газогидратов, и др.). Различаются причины, обуславливающие развитие аномально высоких давлений газа: климатический разогрев многолетнемёрзлых пород; промерзание замкнутых таликов, локальный прогрев многолетнемёрзлых пород под поверхностными водоёмами; движение под напором глубинных газовых флюидов и др. Разнообразные геологические условия (состав, строение, условия и глубина залегания и др.) обуславливают строение формирующихся геосистем, динамику, стадии и жизненный цикл их развития.

В настоящее время ещё недостаточно знаний для построения общей теории образования такого сложного и многообразного класса явлений, какими являются воронки газового выброса. Несомненно, что потребуются нетривиальные и инновационные подходы, не укладывающиеся в русло традиционных представлений, существующих в геофизиологии. В частности, решение может быть найдено в рамках концепции флюидодинамических геосистем в криолитозоне [Хименков и др., 2018a; Хименков и др., 2018b].

## Библиография

1. Бергер М.Г. Некоторые общие вопросы изучения газодинамических и газогляциодинамических явлений // Геология и геофизика Юга России. 2016. № 1. С. 5–37.
2. Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Ч. 2 // Бурение и нефть. 2014. № 10. С. 4–8.
3. Богоявленский В.И., Гарагаш И.А. Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 12–17.
4. Богоявленский В.И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 4–10.
5. Богоявленский В.И., Мажаров А.В., Пушкарёв В.А., Богоявленский И.В. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // Бурение и нефть. 2015. № 7. С. 8–13.
6. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика. 2016. № 3 (23). С. 4–13.
7. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3 (27). С. 4–17.
8. Богоявленский В.И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1 (29). С. 48–54.
9. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Мажаров А.В., Богоявленский И.В., Никонов Р. А., Кишанков А.В., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. 2019. № 1 (33). С. 88–105.
10. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озёр с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4 (36). С. 52–68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.
11. Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Гулевич О.А., Сахтеров В.И. Результаты обследования малококонтрастных газогидратных включений на полуострове Ямал георадаром ГРОТ 12Н // Материалы V Всероссийских Армандовских чтений, V Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Всероссийская конференция «Практическая радиолокация». Муром, 2015. С. 44–50.
12. Галеева Э.И., Курчатова А.Н., Рогов В.В., Слагода Е.А. Сравнительный анализ строения полигонально-жильных и пластовых льдов // Материалы V конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. Т. 2. Ч. 5: Региональная и историческая геокриология. М.: Университетская книга, 2016. С. 291–297.
13. Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Полякова Е.И. Температура, состав и возраст отложений шельфа Карского моря в районе геокриологического стационара Марре-Сале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 4. С. 3–16.
14. Дядин Ю.А., Гущин А.Л. Газовые гидраты // Соросовский образовательный журнал. 1998. Вып. 3. С. 55–64.
15. Епифанов В.А., Лоскутов Ю.И., Минин В.А. Новый взгляд на образование алмазонасыщенных «водораздельных галечников» и инновационный метод поиска погребённых кимберлитовых тел // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 4. С. 109–127.

16. Епифанов В.А. Взрывные воронки-колодцы и климатические события в ландшафтных преобразованиях четвертичного периода // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2018. № 76. С. 5–40.
17. Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В., Буханов Б.А., Станиловская Ю.В., Бадец К. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазоХимия. 2018. № 2. С. 33–42.
18. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 2. С. 15–25.
19. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Лейбман М.А. Оценка рельефообразующего эффекта образования Антипаютинской воронки газового выброса по данным спутниковой стереосъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 67–75.
20. Криолитозона Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО «Газпром экспо», 2013. 424 с.
21. Короновский Н.В., Якушева А.Ф. Основы геологии. М.: Высшая школа, 1991. 416 с.
22. Круковская В.В. К расчету фильтрации газа в трещиновато-пористой неоднородной среде // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. Днепрпетровск: ИГТМ НАНУ, 2004. Вып. 51. С. 257–265.
23. Лейбман М.О., Кизяков А.И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. 2016. № 2. С. 15–24.
24. Лейбман М.О., Плеханов А.В. Ямальская воронка газового выброса // Холод'ОК. 2014. № 2 (12). С. 9–15.
25. Лейбман М.О., Кизяков А.И., Хомутов А.В. и др. О динамике Ямальской воронки газового выброса за 2014–2016 годы: доклад на PYRN Russia workshop on Yamal crater studies / Семинар по исследованиям Ямальской воронки (часть 2). Москва. Институт географии РАН. 16 декабря 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=ld2C1StMcqk>
26. Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Стрелецкая И.Д., Хомутов А.В., Кизяков А.И., Ванштейн Б.Г., Семенов П.Б. Связь формирования воронок газового выброса с эмиссией метана на севере Западной Сибири // Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология — 2018» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 4 (23). С. 1–4.
27. Лукьянов А.В. Эксперимент в тектонике // Экспериментальная тектоника: Методы, результаты, перспективы. М., 1989. С. 9–31.
28. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Мир, 1969. Т. 2. 863 с.
29. Оленченко В.В., Сеницкий А.И., Антонов Е.Ю., Ельцов И.Н., Кушнарченко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В., Эпов М.И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 4. С. 94–106.
30. Петухов И.М., Линьков А.М. Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. М.: Недра, 1978. С. 62–91.
31. Святловский А.Е. Структурная вулканология. М.: Недра, 1971. 232 с.
32. Сизов О.В. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. 2015. Вып. 1. С. 53–68.
33. Слезин Ю.Б. Механизм вулканических извержений (стационарная модель). М.: Научный мир, 1998. 127 с.

34. Соломатин В.И. Физика и география подземного оледенения. Новосибирск: Гео, 2013. 346 с.
35. 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.
36. Трофимов В.А. Определение давления газа в угольном пласте // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отд. вып. 1: труды Международного научного симпозиума «Неделя горняка-2012». 2012. С. 324–345.
37. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. М.: Мир, 1982. 704 с.
38. Хилимонюк В.З., Оспенников Е.Н., Булдович С.Н., Гунар А.Ю., Горшков Е.И. Геокриологические условия территории расположения Ямальского кратера // V конференция геокриологов России. М.: Университетская книга, 2016. Т. 2. С. 245–255.
39. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Газовые выбросы в криолитозоне как новый вид геокриологических опасностей // Геориск. 2017а. № 3. С. 58–65.
40. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мерзляков В.П., Типенко Г.С. Развитие взрывных процессов в криолитозоне в связи с формированием Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2017б. № 4. С. 13–37.
41. Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Ч. 2: Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы // Арктика и Антарктика. 2018. № 2. С. 48–70. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.2.26377.
42. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 1–25.
43. Хомутов А.В., Кизяков А.И., Лейбман М.О., Дворников Ю.А. Воронки газового выброса: в процессе изучения условий их формирования // ХОЛОД'ок. 2017. № 1 (15). С. 5–13.
44. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 491 с.
45. Чувилин Е.М., Буханов Б.А., Гребенкин С.И., Дорошин В.В., Иоспа А.В. Экспериментальное изучение прочности мерзлых гидратосодержащих грунтов в условиях проявления самоконсервации порового гидрата // V конференция геокриологов России. М.: Университетская книга, 2016. Т. 3. С. 180–186.
46. Чувилин Е.М., Гребенкин С.И., Давлетшина Д.А., Жмаев М.В. Изменение газопроницаемости мерзлых песчаных пород при гидратообразовании // Сборник докладов расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. Т. 2: «КДУ». М.: Университетская книга, 2018. С. 275–280.
47. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Оленченко В.В., Потапов В.В., Кушнаренко О.Н., Плотников А.Е., Синицкий А.И. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. 2014. Вып. 5 (59). С. 14–23.
48. Якушев В.С. Экспериментальное изучение метастабильных гидратов метана в мерзлых глинах // Сборник докладов расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. Т. 2: «КДУ». М.: Университетская книга, 2018. С. 280–286.



49. Buldovich S., Khilimonyuk V., Bychkov A., Ospennikov E., Vorobyev S., Gunar A., Gorshkov E., Chuvilin E., Cherbunina M., Kotov P., Lubnina N., Motenko R., Amanzhurov R. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin. Results of detailed studies and modeling. 5th European Conference on Permafrost — Book of Abstracts, 23 June — 1 July 2018a, Chamonix, France, 97–98.
50. Buldovich S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal peninsula (Russia) // Scientific reports. 2018 6. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.
51. Chuvilin E., Sokolova N., Davletshina D., Bukhanov B., Stanilovskaya J., Badetz C., Spassennykh M. Conceptual Models of Gas Accumulation in the Shallow Permafrost of Northern West Siberia and Conditions for Explosive Gas Emissions // Geosciences. 2020. Vol. 10. P. 195, doi: 10.3390/geosciences10050195.
52. Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D. et al. Evidence of Gas Emissions from permafrost in the Russian Arctic // Geosciences. 2020. Vol. 10. P. 383.
53. Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Khomutov A.V., Kizyakov A.I., Vanshtein B.G., Main results of 4-year gas-emission crater study. 5th European Conference on Permafrost (EUCOP 2018), 23 June — 1 July 2018, Chamonix-Mont Blanc, France, pp. 293–294.
53. Supplementary Materials for Cryovolcanism on the Earth: the Origin of the Spectacular Crater on Yamal Peninsula (Russia) S.N. Buldovich, V.Z. Khilimonyuk, A.Y. Bychkov, E.N. Ospennikov, S.A. Vorobyev, A.Y. Gunar, E.I. Gorshkov, E.M. Chuvilin, M.Y. Cherbunina, P.I. Kotov, N.V. Lubnina, R.G. Motenko, R.M. Amanzhurov // Scientific reports. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.
54. Vorobyev S., Bychkov A., Khilimonyuk V. et al. Formation of the Yamal crater in Northern West Siberia: Evidence from geochemistry // *GEOSCIENCES*. 2019. Vol. 9, no. 12. 10.3390/geosciences9120515.
55. <https://ria.ru/science/20171207/1510311618.html>.
56. <http://www.ikz.ru/archives/4081>.
57. <http://www.yamalpro.ru/2017/07/03/iz-novoy-yamalskoy-voronki-prodolzhaet-sochitsya-metan>.
58. <https://www.ks-yanao.ru/novosti/desant-izuchivshiy-mesto-vzryva-v-seyakhe-nashyel-nov-uyu-voronku.html>.
59. [http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post\\_9.html](http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post_9.html) от 3 июля 2017 г.
61. <https://www.youtube.com/watch?v=8iCVkT1kHi8&feature=youtu.be>.
62. <https://www.youtube.com/watch?v=BCvqHHRO-Q4>.
63. <https://russian.rt.com/article/105424>.
64. [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=50&v=9-3fqxa513g](https://www.youtube.com/watch?time_continue=50&v=9-3fqxa513g).
65. <http://www.yamalpro.ru/2017/07/03/iz-novoy-yamalskoy-voronki-prodolzhaet-sochitsya-metan>.
66. <https://yandex.ru/video/preview?text=новые%20воронки%20на%20ямале%20на%20капре&path>.
67. [https://www.nakanune.ru/service/photo.php?path=image\\_big\\_182052.jpg&title64=wu7w](https://www.nakanune.ru/service/photo.php?path=image_big_182052.jpg&title64=wu7w).
68. <https://yandex.ru/video/preview?filmId=>
69. <https://edition.cnn.com/2020/09/04/world/craters-tundra-siberia-trnd-scen/index.html>.

## ГЛАВА 5.

# ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ВЗРЫВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ

### Введение

Казалось бы, в низкотемпературных условиях многолетнемёрзлых пород, где химические реакции практически не реализуются, осуществление взрывных процессов невозможно. Тем не менее в криолитозоне обнаружены явления, которые, несомненно, свидетельствуют об их наличии. Прежде всего это хорошо известные в геокриологии взрывы гидролакколитов, обнаруженные недавно глубокие воронки на севере Западной Сибири и многочисленные выбросы газа при бурении. Все перечисленные процессы относятся к взрывным, связанным с возникновением внутреннего давления в полости, заполненной жидкостью или газом, которое превышает предельно допустимые значения прочностных характеристик вмещающих мёрзлых пород. Ещё в 1971 г. И.Л. Кузиным в северной части Уренгойского месторождения были установлены неизвестные ранее формы газопроявления — воронки газового прорыва (воронки взрыва) на дне небольших безымянных озёр. На дне озёр данным исследователем были обнаружены округлые грифоны, интерпретированные как воронки взрыва, образованные выходящими на поверхность глубинными газами. Озёра с газопроявлениями установлены в разных районах Западной Сибири, от п-ва Ямал и Гыданский на севере до Среднего Приобья на юге [Кузин, 1982].

### 5.1. Общие положения

Согласно ГОСТ Р 22.0.08-96 взрыв — это «процесс выделения энергии за короткий промежуток времени, связанный с мгновенным физико-химическим изменением состояния вещества, приводящим к возникновению скачка давления или ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов или паров, способных производить работу» [ГОСТ..., 1996]. Физические взрывы не сопровождаются химическими реакциями с выделением энергии, они являются следствием перехода запасённой потенциальной энергии в кинетическую энергию движения газов и жидкостей. Основной причиной их образования является не химическая реакция, а физический процесс, обусловленный высвобождением внутренней потенциальной энергии жидкости или газа из замкнутых объёмов за короткое время [Девисилов и др., 2012]. После того как замкнутая полость с содержащимся газообразным или жидким веществом при повышенном давлении разрушается, происходит выброс этого вещества с генерацией волн давления. При этом потенциальная энергия сжатого газа или жидкости переходит в энергию ударной волны.

Взрывные процессы в криолитозоне относятся к физическим взрывам, связанным с возникновением в полостях, заполненных жидкостью или газом, внутреннего давления, превышающего предельно допустимые значения прочностных характеристик вмещающих мёрзлых пород. В этих условиях взрывные процессы связаны с перераспределением жидкостных или газовых флюидов в пределах толщи многолетнемёрзлых пород. Данное перераспределение в своём крайнем развитии может завершаться разрушением кровли мёрзлых пород и выбросом флюида на поверхность.

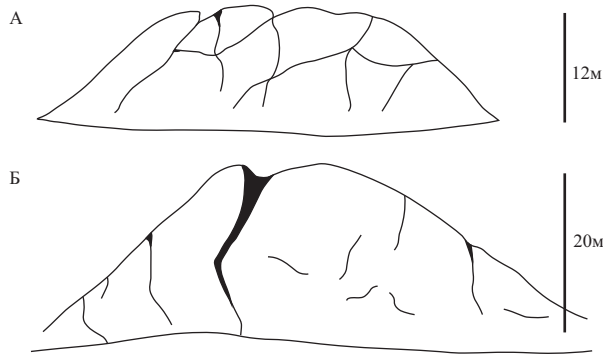
## 5.2. Взрывы гидролакколитов

В 30-х гг. XX в. В.И. Андреев, проводивший исследования на Ямале, сообщал, что по рассказам ненцев в Байдарацкой тундре зимой со стороны бугра раздавался оглушительный треск («взрыв»), после чего там находили надземную наледь. В связи с этим автор предполагает, что подо льдом находится полость, наполненная водой, а быть может, отчасти и газом, которые во время глубокого растрескивания бугров и выбрасываются на поверхность [Андреев, 1936]. О.И. Баженова, рассматривая механизмы функционирования озерно-флювиальных систем Южного Забайкалья, приводит данные о взрывах гидролакколитов, сформировавшихся в озёрных котловинах. Гидролакколиты образуются на северных побережьях озёр, имеют овальную форму, высоту 1,5–2,5 м, длину 50–100 м. Взрывы происходят не только зимой и весной, но и летом. Они отмечаются в руслах, на поймах и террасах рек и озёр, близ выходов родников в днищах падей вдоль их северных бортов. Часто взрывы бугров сопровождаются сильным звуком, напоминающим орудийный выстрел, который слышен в радиусе 7–10 км. При этом возникают новые формы рельефа, представленные воронками — кратерами взрыва. Диаметр воронок изменяется от 1 до 15–25 м, глубина составляет 2–5 м. Во время взрыва из воронок выбрасывается большой объём льда и грунта. Для Забайкалья имеются сведения ещё о ряде случаев наблюдения взрывов гидролакколитов. Так, 28 марта 1927 г. произошёл взрыв наледного бугра в долине реки Онон, общий объём ледогрунтовой массы, выброшенной взрывом, составил 508 м<sup>3</sup>. Самая большая глыба льда с прослоями песка, гравия и галечника имела толщину 2 м, ширину 6–9 и длину 18 м [Петров, 1930]. Взрывом родникового бугра пучения вблизи д. Бырца 27 июля 1938 г. лед, песок и галечник были подняты на высоту 8–12 м и отброшены на расстояние 15 м. Фонтан воды высотой 2 м функционировал около 2 ч. В результате взрыва образовалась воронка диаметром 4,5 м и глубиной 4 м [Стругов, 1955]. 24 мая 1964 г. в 14 часов по местному времени в днище пади Арангот А.Н. Скляревская наблюдала взрыв крупного гидролакколита, который был слышен на расстоянии до 6 км. Во время взрыва из центральной части бугра было выброшено большое количество песчано-дресвяного материала с глыбами льда, размер которых достигал 2×1,5×0,7 м, образовалась продолговатой формы воронка длиной 15 м, шириной 2–4 м и глубиной около 2 м [Богомолов, Скляревская, 1969]. Н.С. Богомолов 20 июля 1964 г. наблюдал взрыв гидролакколита в долине реки Урейки (левый приток Акши). Ширина основания бугра была 18–20 м, высота 0,8–1 м. Гидролакколит разорвался с грохотом, после чего последовало шумное извержение громадного количества воды в виде столба размером 3×2,5×1,7 м с дебитом 12 м<sup>3</sup>/с, продолжавшееся 15 мин. [Богомолов, Скляревская, 1969].

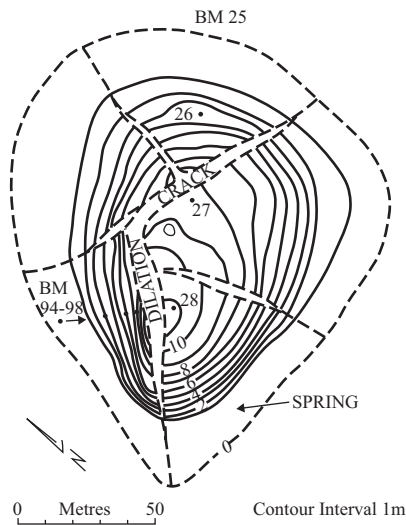
Размеры гидролакколитов изменяются в больших пределах: диаметр основания — от 20 до 250 м, а высота — от 2 до 70 м. Кровля бугров обычно состоит из переслаивающихся льдистых суглинков и супесей мощностью 2–10 м, под которыми залегает ледяное ядро мощностью в несколько десятков метров (до 60 м) [Маскау, 1998]. Растущие гидролакколиты подстилаются тальми водоносными горизонтами или водяными линзами мощностью до 2 м, обладающими гидравлическим напором. Возрастание напора в линзе воды приводит к разрыву кровли, который сопровождается извержениями фонтанов воды или жидкой грязи в несколько метров высотой, а иногда они представляют собой взрывы, разбрасывающие обломки кровли и льда на десятки метров вокруг.

При росте гидролакколитов содержание газовых включений в подстилающих водяных линзах, как правило, незначительно. Вода выступает в этом случае как поршень, медленно

выдавливает мёрзлую кровлю. В результате всестороннего промерзания давление, образовавшееся в воде (которая является несжимаемой жидкостью), передаётся непосредственно на кровлю. При этом наблюдается её статическое разрушение с образованием отдельных трещин (рис. 5.1–5.3), в которые изливается вода. Это приводит к снятию напряжения. Промерзание обводнённых трещин укрепляет кровлю, и процесс роста бугра продолжается до полного промерзания водяной линзы.



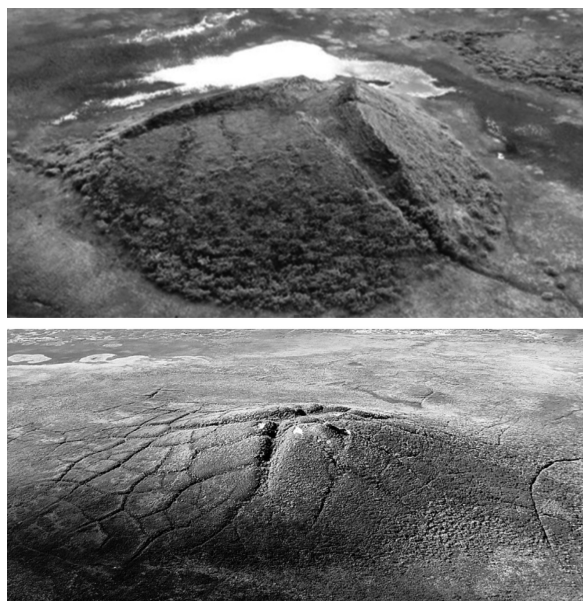
**Рис. 5.1. Система трещин на разрушающихся гидролакколитах северного Ямала: А — гидролакколит Хать-Седе; Б — гидролакколит Сармик-Седе [Андреев, 1936]**



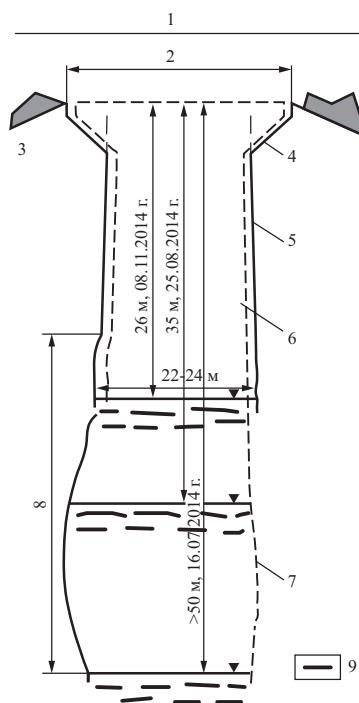
**Рис. 5.2. Топографический план пинго № 15 на полуострове Туктоятук (Аляска) [Maskay, 1979]**

### 5.3. Формирование воронок газового выброса как результат взрывных процессов

В 2014 г. на Ямале была обнаружена воронка, получившая название «Ямальский кратер» [Leibman et al., 2014; Эпов и др., 2014; Кизяков и др., 2015]. Глубина воронки около 50 м, ширина около 30 м (рис. 5.4).



**Рис. 5.3. Гидролакколиты южнее Бованенковского месторождения. Фото В.И. Богоявленского [Богоявленский и др., 2015]**



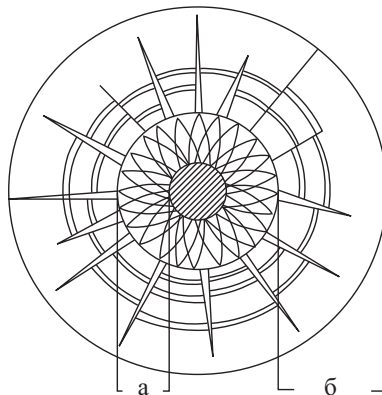
**Рис. 5.4. Принципиальная схема строения воронки газового выброса на п-ве Ямал (Ямальский кратер) [Кизяков и др., 2015]:**  
**1 — внешний контур брусстера; 2 — бровки воронки; 3 — материал брусстера;**  
**4 — раструб воронки; 5 — стенки 08.11.2014 г.; 6 — цилиндрическая часть воронки; 7 — стенки 16.07.2014 г.; 8 — грот; 9 — вода озера на дне воронки**



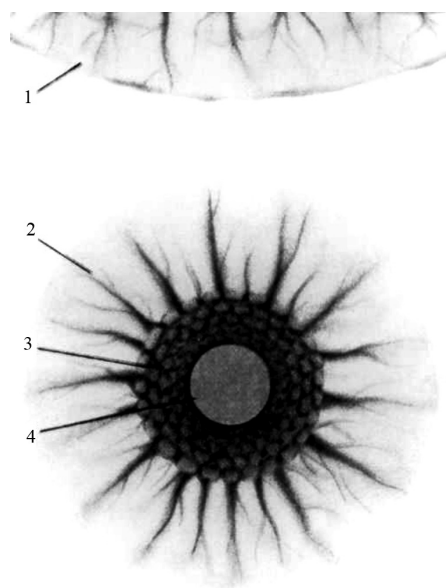
Разбросанный вокруг грунт свидетельствовал о взрыве, сопровождавшем образование воронки. Никаких следов хозяйственной деятельности вблизи неё не обнаружено. Воронка расположена в юго-западной части полуострова Ямал, в 30 км южнее Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). Форма кратера — правильный эллиптический цилиндр, немного расширенный у поверхности. Измерения показали, что большая полуось воронки составляет около 20 м, малая — 14 м. Глубина сезонноталого слоя по периметру составила 0,8 м. Материал, выброшенный из воронки, распределён равномерно во всех направлениях. Наибольшая концентрация обломков была обнаружена по окружности на расстоянии 140 м от центра воронки, а отдельные обломки разлетелись на расстояние более 180 м. Разрез воронки сложен практически чистым льдом. В выброшенном материале обнаружены камни — окатанные песчаники, сланцы [Эпов и др., 2014]. Позже на севере Западной Сибири было обнаружено ещё несколько воронок, близких по строению к Ямальской. Морфология воронок имеет ряд общих черт. Их верхняя часть, как правило, расширена и имеет коническую форму. Центральная часть более узкая, во многих случаях имеет форму цилиндра с гладкими стенками. По морфологии и морфометрии они резко отличаются от гидролакколитов (см. рис. 1). Большинство исследователей (например, В.П. Мельников, В.И. Богоявленский, М.О. Лейбман, А.И. Кизяков, В.В. Оленченко, М.И. Эпов, И.Н. Ельцов и др.), изучавших данные образования, сходятся во мнении, что их возникновение обусловлено выбросом газов, сформировавшихся при разложении газогидратов, входящих в состав многолетнемёрзлых пород. Это дало основание В.И. Богоявленскому и И.А. Гарагашу [2015] рассматривать данные образования как воронки газового выброса.

В общем виде взрыв проходит две стадии развития. Давление взрывных газов мелко дробит породу, приводит её в квазипластичное состояние (рис. 5.5, *а*, 5.6). Затем под действием ударной волны возникают радиальные сжимающие напряжения, а за счёт смещения породы в волне в радиальном направлении — тангенциальные растягивающие напряжения. Образуется система радиальных трещин (зона трещинообразования) (рис. 5.5, *б*, 5.6) [Покровский, 1980].

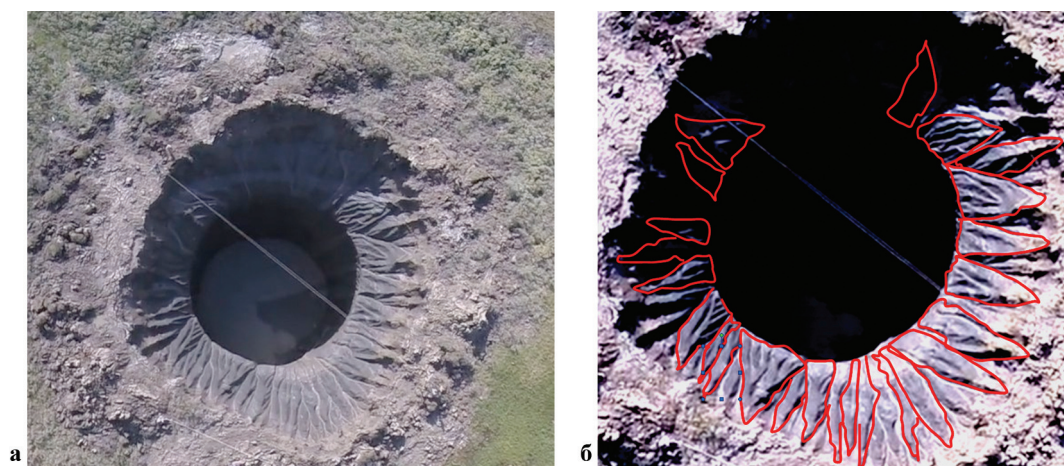
Морфология поверхности верхней части Ямальского кратера, имеющего конусообразную форму (рис. 5.7, 5.8), соответствует строению зоны радиальных трещин, формирующихся при взрыве (см. рис. 5.5, 5.6).



**Рис. 5.5. Схема разрушения породы при взрыве [Покровский, 1980]**

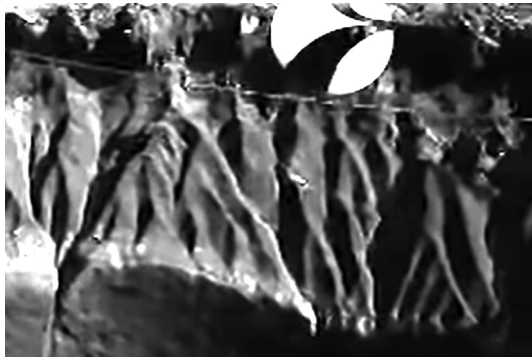


**Рис. 5.6. Схема зон взрывного разрушения:**  
1 — откольного; 2 — радиальных трещин; 3 — дробления; 4 — полость взрыва [Горная..., 1984]



**Рис. 5.7. Ямальная воронка (вид сверху):**  
а — фотография воронки; б — фотография с нанесёнными контурами неровностей поверхности конусообразной части воронки, соответствующими деформациям, возникшим при взрыве. Фото В.А. Пушкарёва

Растягивающие усилия, возникающие при увеличении давления до значений, соответствующих пределу прочности породы, приводят к её разрыву и образованию соответствующих форм на поверхности разрыва. Поверхности верхней расширенной конусообразной части воронки имеют специфическую морфологию, идентичную морфологии поверхности излома образца стали после испытания на растяжение (рис. 5.9).



**Рис. 5.8.** Фрагмент деформаций поверхности конусообразной части Ямальской воронки. Скриншот с видео Арктика.Live Ямальская воронка [[www.youtube.com/watch?v=1BGyJhz7KZA](http://www.youtube.com/watch?v=1BGyJhz7KZA)]



**Рис. 5.9.** Поверхность излома образцов стали после испытания на растяжение [Свидинович и др., 2011]

На большинстве поверхностей излома после испытания на растяжение наблюдаются волокнистая и радиальная зоны. Внутренняя волокнистая зона отвечает области медленного роста трещины. Она расположена в центре излома и окружает очаг разрушения, который обычно находится на оси растяжения или рядом с ней. Радиальная зона формируется при переходе трещины от медленного роста к быстрому или нестабильному её распространению, образуются радиальные рубцы, которые совпадают с общим направлением распространения трещины. Эти расходящиеся рубцы начинаются либо от периферии волокнистой зоны, либо при отсутствии этой зоны (т.е. при непосредственном нестабильном распространении трещины) — от самого очага излома. Точкой, в которой сходятся радиальные рубцы, является очаг излома. Эти рубцы могут быть тонкими или грубыми в зависимости от микроструктуры материала или температуры испытания. Грубые радиальные рубцы на изломах являются элементами сдвига, иногда их называют радиальным сдвигом. Вдоль борозд или гребней этих радиально сдвинутых элементов можно наблюдать продольные расщепления. Эти расщепления могут быть вызваны высокими нормальными

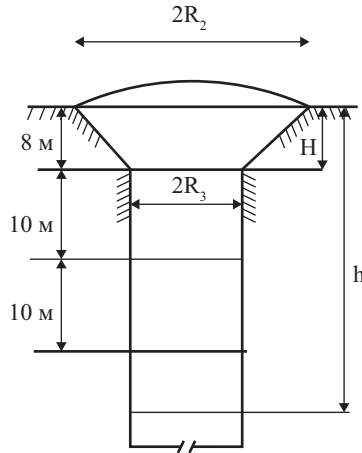
растягивающими напряжениями в результате разделения радиальных поверхностей вдоль плоскости максимального сдвига [Свидунович и др., 2011]. В зависимости от интенсивности воздействия флюида на породу могут наблюдаться две группы процессов. Взрывное разрушение за счёт высокой скорости приложения нагрузки и деформирования среды и статическое разрушение, которое происходит при постоянном давлении или медленном повышении нагрузки [Гумеров и др., 2003]. В безграничной среде, где влияние свободной поверхности мало, взрывное разрушение протекает двустадийно. Первичное разрушение происходит на динамическом фронте дробления — поверхности, где достигается предельное упругое состояние среды и образуются макротрещины по двум механизмам: сколом — при достижении предельных сдвиговых напряжений (в ближней к центру взрыва зоне, где напряжения сжимающие), отрывом — при достижении прочности на отрыв (в дальней зоне, где действуют растягивающие напряжения). Преобладающая масса среды на фронте дробления разрушается отрывом, так как прочность на сдвиг в хрупких средах и горных породах значительно (на порядок и более) превосходит прочность на отрыв. В результате образуется зона радиальных трещин [Цветков и др., 1976].

В случае формирования Ямальского кратера наблюдается следующая последовательность процессов, аналогичных наблюдаемым в металлических стержнях при их разрыве. Под газонепроницаемой низкотемпературной кровлей за счёт давления газа, фильтрующегося из газонасыщенного ледогрунтового массива (подробнее процесс описан в главе 4), формируется газонасыщенная полость. На рис. 5.8 (нижняя часть фотографии), 5.10 показана часть оставшегося после взрыва свода мёрзлых пород Ямальского кратера, подстилаемого газовой полостью. Здесь вся поверхность усеяна кавернами округлой формы размером до 10 см.



**Рис. 5.10. Каверны на поверхности остатков свода. Фото В.А. Пушкарёва**

Для условий Ямальского кратера В.П. Мерзляковым проведён расчёт давления газа, обеспечивающего выброс мёрзлой породы [Хименков и др., 20176]. Верхняя часть Ямальского кратера представляет собой перевёрнутый усечённый конус, стенки которого располагаются под углом  $40\text{--}60^\circ$  к горизонтالي. Нижний радиус конуса равен  $R_1$ , а верхний —  $R_2$ , высота равна  $H$  (рис. 5.11). Ниже сформировался цилиндр с вертикальными стенками, радиус которого примерно равен  $R_1$  (см. рис. 5.11).



**Рис. 5.11. Схема соотношения конической и цилиндрической частей Ямального кратера**

Предполагается, что газ под давлением выталкивает тело, составленное из конической и цилиндрической частей. Необходимая величина давления зависит от глубины выброса  $h$ . Отрыв происходит под действием растягивающих напряжений  $\sigma$ , распределённых по боковой поверхности конуса. Для того чтобы «сорвать» верхнюю часть выброшенного тела давлением с глубины  $H$ , следует преодолеть вертикальную силу сцепления боковой поверхности с грунтом  $F$ , силу веса конуса  $G$  и силу  $P_0$  атмосферного давления, распределённого по внешней поверхности площадью  $\pi R_2^2$ . Таким образом, критическое давление на глубине  $H$  равно:

$$P_H^* = \frac{P}{S}, \text{ где } P = F + G + P_0, S = \pi R_1^2. \quad (1)$$

$$\text{Сила } F = \frac{[\sigma]}{\cos \phi} \pi (R_1 + R_2) \sqrt{H^2 + (R_2 - R_1)^2}, G = g \rho_{\text{мг}} \frac{\pi H}{3} (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2),$$

$$P_0 = p_0 \pi R_2^2, \text{ где } [\sigma] \text{ — предельно допустимое растягивающее напряжение,}$$

$$\phi = \arctg \frac{H}{R_2 - R_1}.$$

Зададим величины, входящие в вышеприведенные формулы, равными:

$$R_1 = 12,5 \text{ м}, R_2 = 18,5 \text{ м}, H = 8 \text{ м}, \rho = 1,6 \text{ т/м}^3, [\sigma] = 0,4 \text{ МПа}, g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

$$\text{Тогда } F = 6,4910 \text{ н}, G = 9,5910 \text{ н}, P_0 = 1,0710 \text{ н}, P = 8,5310 \text{ н}.$$

Критическое давление, при котором происходит верхняя, расширенная часть Ямального кратера,  $P_H^* = 1,74 \text{ МПа}$ .

При глубине  $h > H$  (цилиндрическая часть кратера) необходимо учесть вес цилиндрического тела  $G$  и силу среза по боковым вертикальным стенкам  $F$ . Считая приближенно цилиндрическое тело круговым, примем его радиус  $R_1 = 12,5 \text{ м}$ , а высоту, равной  $h - H$ . В таком случае  $P = F + G$ .



Сила:

$$G = g\rho_{\text{мг}}\pi R^2(h-H), F = [\tau] \cdot 2\pi R(h-H),$$

где  $[\tau]$  — предельно допустимое касательное напряжение на срез. Тогда критическое давление равно

$$p_{h-H}^* = \frac{P}{S}, \quad (2)$$

где  $P = F + G$ ,  $S = \pi R_1^2$ , и

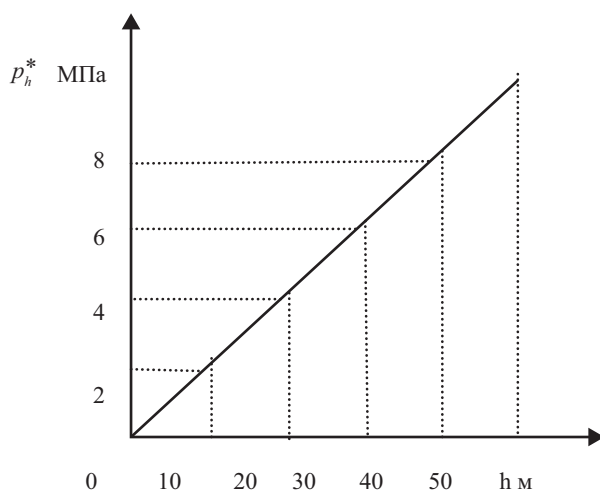
$$p_h^* = p_H^* + p_{h-H}^*. \quad (3)$$

Задавая значение  $[\tau] = 1,0$  МПа, величину  $h - H = 10$  м, получим  $p_{10}^* = 1,76$  МПа.

Значения критического давления от глубины приведены в табл. 5.1 и на графике (рис. 5.12).

**Таблица 5.1. Зависимость критического давления от глубины**

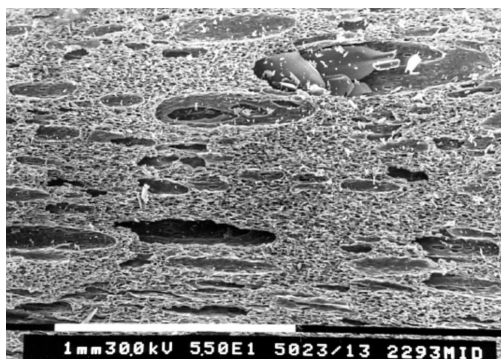
Глубина, $h$ , м	8	18	28	38	60
Давление, $p_h^*$ , МПа	1,74	3,49	5,25	7,01	10,88



**Рис. 5.12. Зависимость критического давления от глубины**

При температурах в диапазоне  $-5 \dots 0$  °С для метана трёхфазное равновесие «газ-вода (лёд)-гидрат» находится в диапазоне 1,86–2,57 МПа [Шостак, 2015]. Следовательно, давление, возникающее в зоне разложения газогидрата, расположенной на глубине, превышающих 20 м, не может выбросить перекрывающую мёрзлую породу. При этом фильтрация газа сквозь мёрзлую породу, как показано в главах 3 и 4, возможна. То есть выше зоны диссоциации газогидратов формируется толща газонасыщенной мёрзлой породы, в которой газ находится под повышенным давлением. Рассмотрим, как в данных условиях может произойти образование воронки газового выброса. Под действием давления газа мёрзлая кровля медленно поднимается, формируя бугор пучения. При достижении определённых значений деформации в краевых частях бугра медленное движение сменяется резким отрывом кровли от мёрзлого массива. При переходе деформаций от медленного роста к бы-

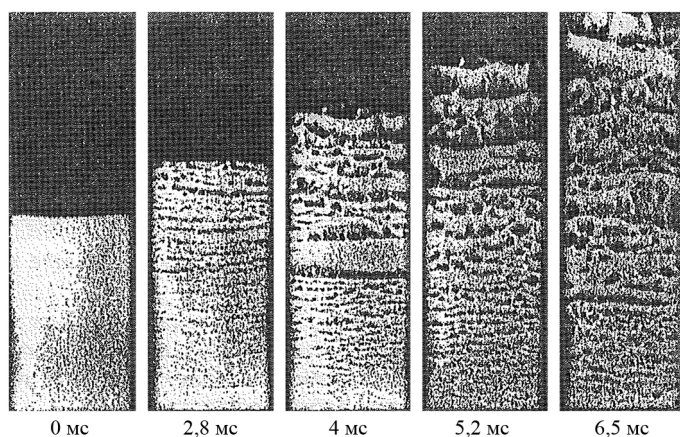
строуму или нестабильному формируется зона радиальных трещин отрыва. Эти расходящиеся трещины начинаются от края газовой полости. На поверхности отрыва возникает сеть радиальных трещин, которые вызваны высокими нормальными растягивающими напряжениями вдоль плоскости максимального сдвига. Разрушенная кровля выбрасывается и распределяется вокруг кратера. Залегающая ниже толща газонасыщенного ледогрунта, в которой газа находится при повышенном давлении, разрушается по-другому. Можно предположить, что после резкой декомпрессии, произошедшей в результате разрушения кровли, подстилающий массив выбрасывается не сразу на всю глубину. Под воздействием газа, находящегося под давлением, начинается послойное дробление и выброс газонасыщенного ледогрунтового материала. При этом давление газа, обеспечивающее послойный выброс, не превышает некоторого порогового значения. Модель стадийного выброса газонасыщенных пород, в которых газ находится под давлением, для вязких и даже застывших газонасыщенных магм предложена М.А. Алидибировым [1998]. На стадии подготовки в жерле вулкана формируется пористое газонасыщенное магматическое тело. Резкая декомпрессия, связанная с разрушением кровли, вызывает его фрагментацию (дробление), высвобождение потенциальной энергии сжатых газов и выброс продуктов дробления в атмосферу. Взрывная волна разгрузки, постепенно продвигаясь вглубь массива, слой за слоем разрушает пористый материал. Расширение газа в сторону области низкого давления приводит к выбросу продуктов дробления в атмосферу. Причём чем ниже будет зона разрушения, тем энергичнее будет дробиться материал и дальше выбрасываться обломки. При быстром сбросе внешнего давления процесс газоотделения не играет существенной роли. Время релаксации напряжений оказывается значительно больше, чем время разрушения. Процесс послойного разрушения происходит в течение нескольких секунд. При этом само разрушение магмы носит хрупкий характер [Алидибиров, 1998]. Предложенный М.А. Алидибировым механизм взрыва можно проиллюстрировать результатами лабораторных опытов на лавах (рис. 5.13) и рыхлых материалах (рис. 5.14). После резкого снятия давления формируется последовательно увеличивающаяся сеть горизонтально ориентированных пор, микро- и макротрещин, последовательно проникающих вглубь материала.



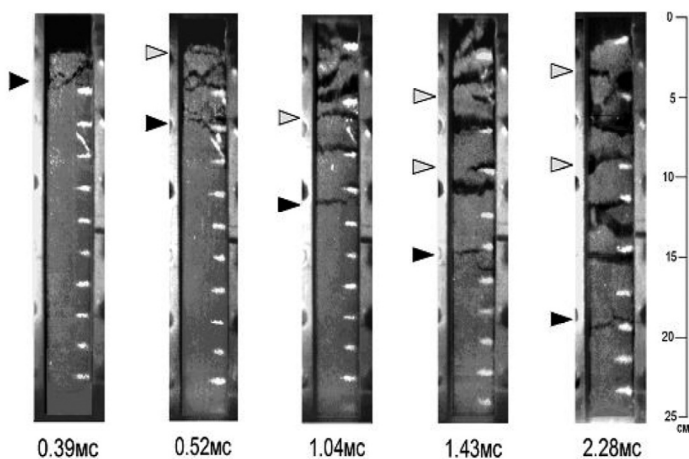
**Рис. 5.13. Система вытянутых пор, микро- и макротрещин в гранитном расплаве, формирующихся при быстром сбросе давления, скорость сброса 2500 атм/с [Медведев и др., 2014]**

Градиент давления в газе и связанный с ним фильтрационный поток играют основную роль в разрушении пористого материала, у которого большая часть пор соединяется, обеспечивая материалу проницаемость. Разрушение происходит во фронте волны раз-

режения, распространяющейся по газу в порах. Скорость этой волны и размер обломков зависят при прочих равных условиях от скорости декомпрессии: при более быстром спаде давления на границе скорость волны больше, а размер обломков меньше (рис. 5.15) [Панов, 2009].



**Рис. 5.14. Динамика слоя стеклянных шариков при быстром сбросе давления [Кедринский, 2000]**



**Рис. 5.15. Кадры кинограммы разрушения модельного материала. Чёрные стрелки — первичные трещины, серые — вторичные [Панов, 2006]**

Над областью диссоциации газогидратов в мёрзлых породах в результате миграции газа формируется газонасыщенная зона, в которой газ находится под высоким давлением (до 2,5 МПа). При разрушении кровли происходит резкая декомпрессия, вызывающая фрагментацию (дробление) верхнего слоя мёрзлых пород, высвобождение потенциальной энергии сжатых газов и выброс продуктов дробления в атмосферу. Слой за слоем зона дробления с большой скоростью продвигается вниз. Причём чем ниже будет зона разрушения, тем энергичнее будет дробиться материал и дальше выбрасываться обломки, что и наблюдается в районе Ямальского кратера.

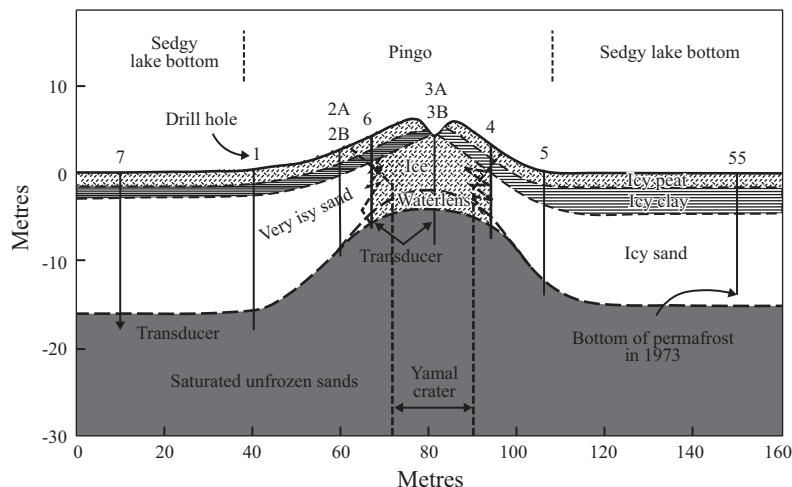
#### 5.4. Различия процессов формирования гидролакколитов и воронок газового выброса

Образование гидролакколитов и воронок газового выброса обусловлено различными процессами. Первая группа процессов происходит при промерзании внутригрунтового талика. Водосбор под формирующимся бугром пучения, сезонным или многолетним, намного превышает размеры самого бугра. Водяная линза остаётся на большой глубине, над ней наращивается слой льда. Всестороннее промерзание водонасыщенного талика должно приводить к выделению растворённого газа и его концентрации в центральной части ледяного ядра, лежащего в основании бугра пучения. В образовавшейся замкнутой газонасыщенной полости будет наблюдаться рост давления. Далее, по мнению В.С. Якушева, возможны два сценария: либо произойдёт прорыв водогазовой смеси из этой полости, либо, если перекрывающие породы достаточно упрочнились в ходе промерзания, давление в промерзающем ядре должно превысить давление гидратообразования и произойдёт образование газогидратов [Якушев, 2018]. В первом случае процессы подготовки взрыва соответствуют процессам формирования типичного гидролакколита с образованием широкой зоны водосбора и разрывом кровли по трещинам. Во втором случае под бугром формируется сплошной мёрзлый массив, содержащий газогидратное ядро. Последующее нагревание может привести к диссоциации газогидратов и выбросу газа. При этом возникает локальная воронка, близкая по параметрам к типичным воронкам газового выброса. Основная часть газогидратов в мёрзлых породах образуется при эпигенетическом промерзании больших территорий, когда фронт промерзания «гонит» перед собой вниз по разрезу «облако» газа, выделяющегося из водорастворённого состояния в порах промерзающих пород. В результате формируются гидратосодержащие мёрзлые толщи, в которых газогидраты залегают в виде рассеянных кристаллов, разнообразных криотекстур и отдельных массивов [Якушев, 1989]. При повышении температуры в данных многолетнемёрзлых породах до значений, обеспечивающих начало диссоциации, формируется канал (преимущественно цилиндрической формы). Взрывное разрушение кровли подготавливается в узкой зоне прогрева, окружённой низкотемпературными мёрзлыми породами. Высокое давление, превышающее прочность мёрзлой кровли, приводит к её плоскостному отрыву от мёрзлого массива. При разрыве кровли и резком снятии давления происходит интенсивное расширение газа, что вызывает высокую скорость приложения нагрузки, образование многочисленных трещин и сколов и выброс породы. На рис. 5.16 показано соотношение структурных элементов растущего гидролакколита (пинго) на севере Аляски и Ямальского кратера.

В случаях большого содержания газа в воде всесторонне промерзающего талика разрушение растущего гидролакколита может сопровождаться взрывными процессами, аналогичными процессам образования воронок газового выброса. С.Н. Булдовичем с соавторами данная гипотеза была предложена для объяснения формирования Ямальского кратера. В этом случае талик представлял собой водно-грунтовую газонасыщенную смесь (в основном углекислым газом) [Buldovich et al., 2018]. Предложенная гипотеза позволяет лишь частично объяснить строение Ямальского кратера, а также состав газа и его распределение в мёрзлых породах (подробнее данный вопрос разбирается в главе 4).

При всестороннем промерзании таликов или водоносных горизонтов с малым содержанием газа, вследствие несжимаемости воды, резко возникают значительные давления, которые мгновенно передаются вмещающим породам, вызывая в них пластические или разрывные деформации, снимающие возникшие напряжения. В результате вблизи водонасыщенной зоны формируется комплекс парагенетических криотекстур, связанных преж-

де всего с инъекционными внедрениями воды в мёрзлый грунт. Таким образом, при промерзании грунтовых вод с малым содержанием газа условия для взрывных процессов не создаются. При наличии газа ситуация коренным образом меняется. Всестороннее промерзание приводит к сжатию газа и накоплению потенциальной энергии. Давление на вмещающие породы происходит равномерно и плавно, не приводя к их разрыву.



**Рис. 5.16. Сопоставление размеров структурных элементов растущего гидролакколита (пинго) на севере Аляски [Maskau, 1979] и Ямальского кратера [Leibman et al., 2014]**

### 5.5. Техногенные взрывы в криолитозоне

Процессы, связанные с техногенным воздействием на газо- и гидратосодержащие многолетнемёрзлые породы и возникновением естественных выбросов газа из толщи многолетнемёрзлых пород, во многом сходны. Они обусловлены нарушением стационарных условий, обеспечивающих длительное стабильное существование геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород (вне зависимости от формы нахождения газа). Техногенное воздействие на данные криогенные геосистемы следует разделить на две составляющие. Первая, связанная с бурением скважин, — непосредственное проникновение в зону, где возможно образование области газа с повышенным давлением. Вторая — создание 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 повышение давления или за счёт диссоциации газогидратов, или за счёт повышения давления газов в свободной форме, сконцентрированных в газовых карманах.

С началом интенсивных поисков нефти и газа в Арктике были отмечены газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента и шлама, разгазировании промывочной жидкости и т.д. Так, в районе Анабаро-Хатангского междуречья отмечались газопроявления с глубины 70–120 м [Якушев, 2009]. Геологоразведочные и подземные горные работы на вечномерзлых россыпных месторождениях северо-востока России часто сопровождались газопроявлениями с глубины до 100 м [Чабан, 1991]. В 1986–1990 гг. на п-ве Ямал при изысканиях мостового перехода через реку Юрибей было пробурено более 200 инженерно-геологических скважин глубиной от 10 до 53 м. На большинстве скважин на-



блюдались газопроявления [Якушев, 2009]. При бурении неоднократно были зафиксированы выбросы песка и ледяной крошки, один раз произошёл выброс бурового инструмента — буровой снаряд общей массой около 150 кг был выброшен на расстояние 12 м от забоя. На одной из скважин газовый факел горел непрерывно более месяца, на других скважинах газ при поджигании давал кратковременные вспышки [Арз, 1998]. На Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ) на севере Западной Сибири газопроявления отмечались при инженерно-геологическом бурении из неглубоких горизонтов криолитозоны (до 20–30 м). Мощность криолитозоны на территории месторождения достигает 500 м. По данным ФГУП «Фундаментпроект», на участке строительства УКПГ-2С Заполярного НГКМ при бурении инженерно-геологических скважин глубиной до 20 м были зафиксированы газопроявления из нескольких скважин, приуроченные к прослоям сыпучемёрзлого песка в интервалах 13,0–13,8 и 14,0–14,5 м. Горение на устье скважины продолжалось около суток. По данным НТФ «КРИОС», которая летом 2003 г. на Заполярном НГКМ проводила бурение мерзлотно-параметрических скважин глубиной 250 м, газопроявления из многолетнемёрзлых пород были приурочены к интервалу глубины 90–250 м [Якушев, 2009]. На Тота-Яхинском месторождении (п-в Гыдан) при бурении скважины в 1986 г. с глубины 115 м было выброшено 12 м<sup>3</sup> бурового раствора, после чего факел на скважине горел в течение трёх месяцев [Якушев, 2009]. На Ямбургском газоконденсатном месторождении (ГКМ) при мощности криолитозоны до 450 м газопроявления отмечались с глубины 45–55 м [Мельников и др., 1989]. Мощность криолитозоны на территории южной части Бованенковского ГКМ (северо-западной части п-ва Ямал) изменяется до 320 м. Более 85% газопроявлений в отложениях ямальской серии зафиксированы на глубинах около 60–80 м, а сам горизонт прослеживается на площади до 120 км<sup>2</sup> [Криосфера..., 2013].

Значительное газосодержание ММП зафиксировано не только на суше, но и под дном арктических морей. Мощный выброс газа из скважины на шельфе Печорского моря описан В.П. Мельниковым и др. Бурение производилось с судна при глубине воды 64 м. С глубины 50 м под дном моря при проходке многолетнемёрзлой толщи глин произошёл мощный выброс газа. Газоводяной фонтан поднялся на 10 м выше палубы судна. Через 10 дней после события эхолотом на месте бурения был зафиксирован подводный газовый фонтан высотой 40 м и диаметром около 10 м. При поднятии кернов мёрзлых глин шламовая рубашка образцов вспучивалась, лёд растрескивался, что объясняется разложением газовых гидратов, содержащихся в образцах [Мельников и др., 1997].

Рассмотренные взрывные процессы не проявились бы без проникновения буровых скважин в толщу многолетнемёрзлых пород. Данные взрывы были спровоцированы резким сбросом давления и повышением температуры на глубине 14–120 м. Наиболее вероятной причиной выбросов большинство специалистов называют разложение гидратосодержащих мёрзлых пород.

### 5.5.1. Виды техногенных воздействий на газосодержащие многолетнемёрзлые породы

Во время бурения скважин в многолетнемёрзлых льдистых породах лёд, заполняющий поры оттаивает и переходит в жидкую фазу, занимающую меньший объём. Силы сцепления между частицами резко уменьшаются. Одновременное повышение температуры, резкий сброс давления и увеличение проницаемости пород выводит мёрзлые породы из устойчивого термодинамического состояния и обуславливает возникновение интенсивных потоков вещества в непосредственной близости от скважины. Условием для газовых выбросов

сов (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 пристволенной зоне; наличие проницаемых пород, обеспечивающих возможность миграции флюида под действием давления из толщи породы в скважину. При этом газ может прорываться с больших глубин (катагенетический газ), возникать при разложении газовых гидратов, освобождаться из зон накопления свободного газа (биохимический газ). На территории Бованенковского ГКМ отмечалось нарушение герметичности при бурении скважин, при этом по заколонному пространству поступал газ, который выходил на дневную поверхность за пределами участка скважины. В близлежащих ручьях и озёрах появились грифоны на расстоянии до 1 км от устья скважины [Строение..., 2007].

На рис. 5.17 представлена общая схема поступления подземного газа в зоне отепляющего воздействия скважины.



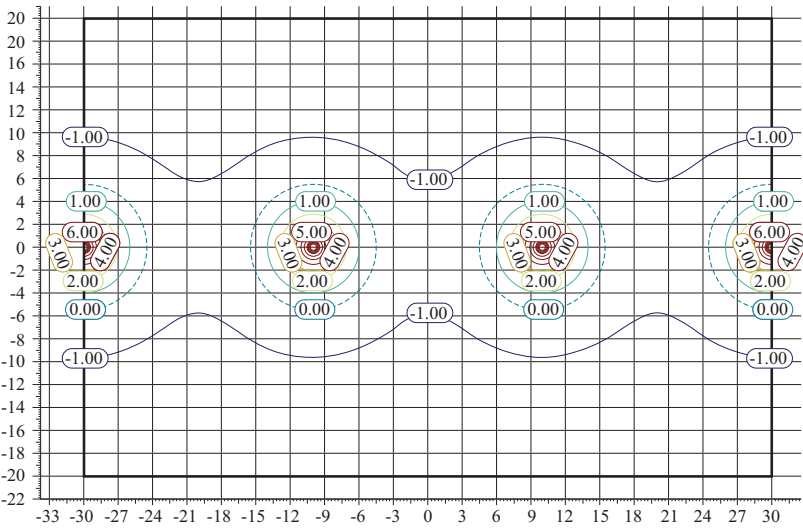
**Рис. 5.17. Схема формирования потока внутримёрзлотного газа при оттаивании ММТ вокруг работающей скважины [Аветов и др., 2018]**

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 растепления. В первой зоне происходит вытаивание льда, появление в грунте полостей, каверн. Порода теряет свою несущую способность, происходит возникновение оползней и обрушений. В зоне растепления мёрзлых пород, где температуры остаются отрицательными и сохраняются ледяные включения, также происходит потеря несущей способности и тоже 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). В табл. 5.2 показано соотношение зон оттаивания (радиус оттаивания) и зон растепления (радиус влияния). Показано, что при эксплуатации скважины в течение 20 лет зона оттаивания на порядок меньше, чем зона растепления. В настоящее время опасные процессы, воздействующие на скважину, оцениваются только для зоны оттаивания.

**Таблица 5.2. Расчёт радиусов влияния и оттаивания, объема оттаявшей породы за периоды 1, 5, 10, 20 лет [Зверев, Тарасов, 2013]**

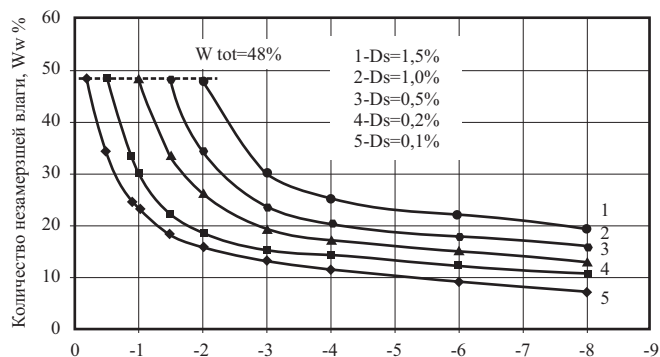
Индекс стратиграфического подразделения	Краткое название горной породы	Кровля, м	Радиус изменения агрегатного состояния, м				Радиус влияния, м				Объем оттаявшей породы, м³			
			1 год	5 лет	10 лет	20 лет	1 год	5 лет	10 лет	20 лет	1 год	5 лет	10 лет	20 лет
Q	супески	0	0,06	0,26	0,42	0,68	0,65	3,00	4,80	6,72	1,63	10,35	20,52	42,94
	суглинки	19	0,05	0,22	0,35	0,63	0,57	2,63	4,21	5,89	1,33	8,06	15,63	38,68
	пески	38	0,06	0,30	0,54	0,98	0,56	2,59	4,15	5,80	1,72	12,55	30,36	79,84
	глины	56	0,04	0,17	0,30	0,54	0,65	3,00	4,80	6,72	0,77	4,99	11,35	28,13
K <sub>2</sub> tn	глины	75	0,04	0,17	0,30	0,54	0,65	3,00	4,80	6,72	2,27	14,75	33,57	83,17
	алевриты	130	0,01	0,03	0,05	0,09	0,71	3,29	5,26	7,36	0,35	1,80	3,45	6,86
	пески	184	0,05	0,24	0,44	0,79	0,73	3,37	5,40	7,56	3,38	24,29	58,36	152,47
	глины	238	0,06	0,27	0,48	0,87	0,65	3,00	4,80	6,72	3,76	27,76	67,62	178,91
	алевриты	292	0,03	0,13	0,23	0,42	0,71	3,29	5,26	7,36	1,68	10,32	22,69	54,13
	пески	346	0,08	0,36	0,65	1,17	0,73	3,37	5,40	7,56	5,28	42,75	108,61	298,08
	глины	400	0,13	0,63	1,13	2,04	0,65	3,00	4,80	6,72	20,35	200,95	549,52	1597,65
	алевриты	505	0,07	0,34	0,61	1,10	0,71	3,27	5,24	7,33	0,64	5,10	12,86	35,07
K <sub>2</sub> sp	пески	512	0,11	0,53	0,95	1,71	0,73	3,37	5,40	7,56	0,62	5,76	15,41	44,09
	глины	516	Зона пород с T > 0 °C											
K <sub>2</sub> ns	алевриты	540												
	глины	577												
	пески	616												

Расчёты распределения температур вокруг скважин, пробуренных в многолетнемёрзлых грунтах, показывают значительное превышение зоны растепления мёрзлых пород над зоной оттаивания (рис. 5.18).



**Рис. 5.18. Распределение теплового поля в грунте через 20 лет в 2D сечении в виде изолиний [https://frost3d.ru/dobyvayushchaya-skvazhina-v-merzлом-grunte/]**

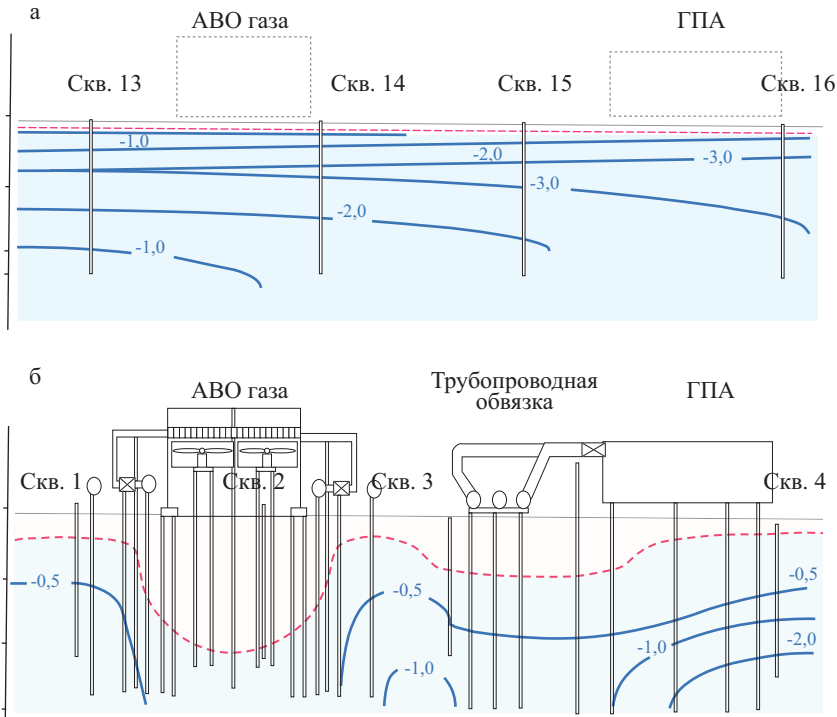
Северные территории Западной Сибири сложены засоленными мёрзлыми грунтами, представленными четвертичными отложениями морского, гляциально-морского и аллювиально-морского генезиса, и относятся к морскому типу. Засоление охватывает породы криогенной толщи на всю мощность. Верхняя часть засоленной толщи мощностью до 150–200 м и больше на побережье находится в мёрзлом состоянии, а нижняя мощностью 100–250 м — в охлаждённом состоянии. На шельфе засоленная криогенная толща имеет сложное строение; она представлена современными и древними мёрзлыми породами мощностью до 20–50 м, залегающими на разных глубинах от дна в виде отдельных массивов среди охлаждённых грунтов с отрицательной температурой. Максимальное содержание солей характерно для грунтов морской лайды, пляжа и устьевых частей рек, заливаемых в нагоны и приливы морской водой. Засоленность грунтов составляет здесь в среднем более 1%, а в отдельных горизонтах до 3–5%. В этих же районах в разрезах наиболее часто присутствуют горизонты охлаждённых глинистых грунтов и горизонты песчаных грунтов с криопэгами. В плейстоценовых морских отложениях степень засоления в среднем снижается в 1,5–2 раза. В засоленных грунтах процесс растепления грунтов до критической температуры  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , наблюдается резкое увеличение количества незамёрзшей воды (рис. 5.19). При этом уменьшаются прочностные и деформативные свойства мёрзлых пород, начинается фильтрация газа (свободного или выделившегося при диссоциации газогидратов), происходят газовые выбросы. Изучение влияния засоленности на прочность мёрзлых песков показывает, что даже незначительное увеличение засоленности от 0,03 до 0,1% снижает их прочность примерно в два раза. При засоленности более 0,5% и температурах до  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  мелкий песок практически находится в охлаждённом состоянии и свойства его близки к свойствам талого песка [Рекомендации..., 2001]. Таким образом, в засоленных мёрзлых породах зона растепления будет намного превосходить аналогичную зону в незасоленных. При высоком газонасыщении в данных породах следует ожидать мощные газодинамические процессы.



**Рис. 5.19. Содержание незамёрзшей влаги в мёрзлой засоленной глине [Рекомендации..., 2001]**

Техногенные воздействия на криолитозону газонасыщенных структур оказывают не только отдельные скважины. Температурное поле мёрзлых пород в значительной мере деформируется под комплексным воздействием инженерной инфраструктуры. При этом могут формироваться крупные техногенные талики, пронизывающие мёрзлую толщу в пределах расположенных кустовых площадок эксплуатационных скважин. Здесь могут образовывать-

ся ореолы протаивания на территории  $1 \times 2 \text{ км}^2$ . Такие талики могут достигать 300–500 м в диаметре, и в этом пространстве кардинально изменяется гидрогеологическая обстановка: перемешиваются криопэги, растворяя лёд окружающих мёрзлых пород. В таких таликах, особенно при наличии газогидратов, могут высвобождаться огромные объёмы газа, которые двигаются к дневной поверхности, образуя мощные грифоны и фонтаны [Криосфера..., 2013]. Прямое тепловое воздействие на массив ММП оказывают здания и сооружения, среди которых наиболее мощным источником теплотополюков 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. 5.20).



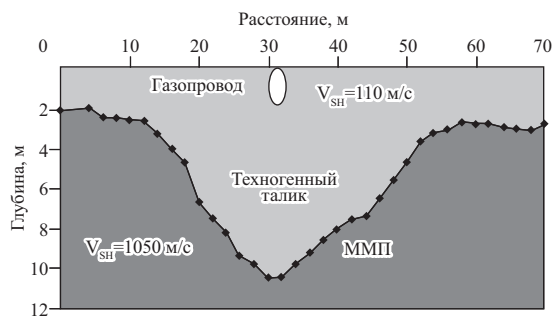
**Рис. 5.20. Изменение температурного поля в основании сооружений Медвежьего газового месторождения:**

**а — естественные условия (июнь 1978 г.); б — техногенные талики после пяти лет эксплуатации (август 1993 г.) [Грива, 2006]**

При эксплуатации кустов газодобывающих скважин с положительной температурой оказывает значительное тепляющее воздействие на мёрзлую толщу, что сопровождается образованием цилиндрических ореолов оттаивания, формированием приустьевой воронки и повышением температуры грунтов на значительном расстоянии от ствола скважины. Результаты математического моделирования теплового взаимодействия эксплуатационных скважин Бованенковского ГКМ показали, что максимальная зона теплового влияния скважин на толщу ММП через 25 лет их эксплуатации может достигать 50 м и более [Грива, 2006].

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. 5.21), что сопровождается термокарстовыми просадками и формированием водоёмов на поверхности (рис. 5.22).





**Рис. 5.21. Техногенный талик под действующим газопроводом Надым — Пунга [Мельников и др., 2010]**



**Рис. 5.22. Развитие термокарста на участке газопровода. Фото В.В. Лашина [Грива, 2006]**

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 влияют на условия диссоциации газогидратов. В песчаных породах с низкой минерализацией поровых вод разложение гидратов имеет массовый характер при температурах вблизи  $-1^\circ\text{C}$ . По мере увеличения дисперсности пород в ряду влажные песок–супесь–суглинков температура полного разложения реликтовых гидратов понижается вплоть до  $-3\ldots -4^\circ\text{C}$ . 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. В природных условиях Арктики процесс массового выделения газа из реликтовых гидратов при небольших изменениях температуры криолитозоны может представлять большую угрозу для инженерных сооружений [Якушев, 2017].

Следует ожидать, что в дальнейшем при расширении хозяйственной деятельности зоны развития подобных опасных процессов вокруг объектов нефтегазового комплекса будут только увеличиваться. Очевидно, что для предотвращения возможного развития взрывных процессов, связанных с воздействием внутригрунтовых газов, необходимо разработать комплекс методов по выявлению причин формирования газонасыщенных пород, обнаружению зон транзита и накопления газа и мероприятий по их ликвидации,

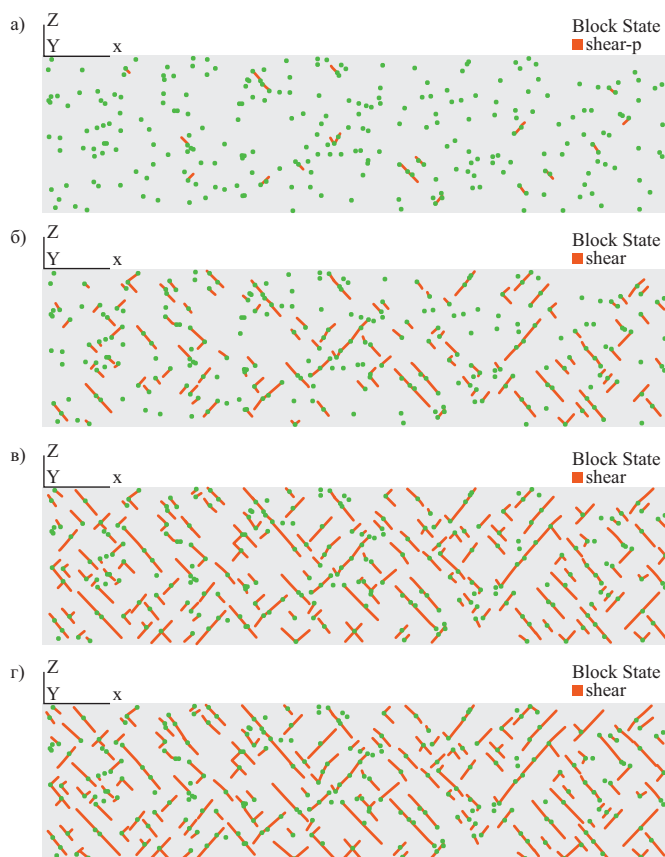
если они будут обнаружены. Следует учитывать, что скорость разложения газогидратов и соответственно скорость периода подготовки выброса газов может быть большой. Их можно оценить по скорости роста бугров пучения, предшествующих взрыву. По имеющимся данным (глава 4), зафиксированное время формирования бугров, связанных с газовыми выбросами, находится в диапазоне от 2 до 70 лет. Высота бугров при этом достигает 5–7 м.

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 внутривывосточного давления в результате добычи газа в подгидратном слое приведёт к уменьшению среднего давления, а газогидратная залежь попадёт в зону растяжения. Согласно кривой фазового превращения снижение горного давления в газогидратной залежи на 1,0–1,5 МПа эквивалентно увеличению температуры в пласту на 0,2–0,3 °С [Истомин, Якушев, 1992]. После того как давление в этой зоне достигнет определённого предела, начинается деформация прилегающей к зоне повышенного давления области грунтового массива [Гарагаш, 2012].

Автор отмечает, что диссоциация газогидратов изменяет плотность и механические свойства породы. Выделение газов приводит к резкому росту внутривывосточного давления и снижению прочности мёрзлого массива. Вблизи включений газогидратов начинают развиваться локальные пластические деформации. Этот процесс, по мере разложения газогидратов, ускоряется, и постепенно вся область диссоциации оказывается охваченной зонами локальных пластических деформаций, ориентированных под углом 45° к горизонту. В результате массив породы разбивается на отдельные блоки, разделённые узкими зонами повышенной трещиноватости (рис. 5.23), создающими возможность появления фильтрационных потоков в виде пузырьков газа. Фазовое превращение газогидратов изменяет плотность и механические свойства осадочной толщи. Освобождение углеводородных газов приводит к резкому росту внутривывосточного давления и снижению прочности горной породы, что может вызвать неустойчивое развитие процесса деформирования и локализацию деформации в отдельных зонах. Предполагается, что при разложении газогидратов механические свойства включений изменяются стадийно. Начиная с третьей стадии, начинает проявляться локализация пластических деформаций в осадочной толще в окрестности включений (см. рис. 5.23). Затем процесс по мере разложения газогидратов постепенно ускоряется, и к шестой стадии вся область оказывается охвачена зонами локализации пластической деформации [Гарагаш, 2012].

Динамические явления в шахтах и рудниках — внезапные выбросы угля (породы) и газа, горные удары — известны уже свыше двухсот лет. Основные закономерности данного явления достаточно хорошо изучены. Качественно механизм горных ударов можно представить следующим образом. Внезапные выбросы происходят при резком обнажении поверхности, которое вызывает изменение напряжённого состояния и перепад газового давления, достаточный для отделения частиц от массива. В зоне опорного давления вокруг выработки горные породы находятся в условиях объёмного сжатия. При продвижении выработки образуется новая свободная поверхность, вблизи которой возникают растягивающие напряжения. Поскольку прочность при растяжении на несколько порядков ниже прочности пород в объёмном сжатии, создаются условия для от-

рыва и выброса призабойной части массива в выработку (внезапный выброс, горный удар). После того как газ выполнит работу по выносу разрушенного материала и давление его снизится, вновь возникают условия для развития хрупкого разрушения угля. Чередование хрупкого разрушения, образование высокого давления газа и вынос угля создают условия для циклического проявления внезапного выброса породы и газа (рис. 5.24). Процесс отделения и выноса частиц многократно повторяется. Вглубь массива распространяется фронт дробления. Движение в сторону выработанного пространства материала, разрушаемого при внезапных выбросах и горных ударах, не сразу охватывает весь его объём. Сначала отрыв частиц и их выброс происходят непосредственно на обнажённой поверхности (А–В на рис. 5.24), которая постепенно перемещается вглубь породы, сохраняющей связность, и образует фронт последовательного отрыва (Е–F на рис. 5.24). В первую очередь выбрасываются частицы пород, прилегающих к выработке, затем расположенные в глубине. При этом возникают те же явления и последующий объём массива вовлекается в процесс. Таким образом, внезапный выброс или горный удар происходит не мгновенно, а поэтапно [Петухов, Линьков, 1983].



**Рис. 5.23. Распределение зон локализации пластической сдвиговой деформации. Зеленым цветом обозначены включения. Оранжевым цветом отмечены зоны локализации пластической деформации в результате превышения сдвиговой прочности на разных стадиях разложения газогидратов: а — стадия 3; б — стадия 4; в — стадия 5; г — стадия 6 [Гарагаш, 2012]**



**Рис. 5.24. Рассредоточенное разрушение на фронте выброса [Петухов, Линьков, 1983]**

Отличительной особенностью внезапных выбросов является высокая степень дробления материала. Внезапные выбросы независимо от породы имеют общую природу и характер протекания. Различия между ними невелики и касаются несущественных деталей, выражающихся прежде всего в морфологии образующихся полостей [Петухов, Линьков, 1983].

### **5.6. Выявление участков возможного развития взрывных процессов в районе расположения инженерных сооружений**

Изучение строения воронок газового выброса, и прежде всего Ямальского кратера [Хименков и др., 2017а; Хименков, Станиловская, 2018], позволило выявить общность процессов, формирующих данные образования, с процессами, происходящими в газонасыщенных горных породах при воздействии на них инженерных сооружений. Данная общность определяется идентичностью процессов, связанных с нарушением термодинамического равновесия в газо- и гидратонасыщенных мёрзлых породах (снятие давления, повышение температуры), вне зависимости от источника нарушений. Даже при незначительном повышении температуры в толщах гидратосодержащих ММП могут начаться разложение газогидратов, миграция газов, формирование зон высокого давления, развитие взрывных процессов. При появлении в толще пород газа, находящегося под избыточным давлением (источники газа могут быть различными), в мёрзлом грунте поначалу образуются микротрещины. Прорастая под достаточно высоким давлением высвобождаемого газа, они образуют поднимающиеся вверх субвертикальные каналы и вытянутые поры. Выходу газу на поверхность препятствует довольно прочная низкотемпературная монолитная «крышка» (вышележащий слой ледогрунта). В результате невозможности выхода газа на поверхность под «крышкой» образуется трещиновато-пористая структура мёрзлого грунта. Затем с ростом давления в результате фильтрации газа от источника [Savatorova и др., 2015, 2016; Саваторова и др., 2016] ширина раскрытия трещин и размер пор увеличиваются. Они начинают сливаться, образуя полость, в которую продолжает фильтроваться газ. В результате пластических деформаций размеры полости увеличиваются со значительным преобладанием в вертикальном направлении. При этом «крышка» выгибается, образуя бугор пучения. За счёт продолжающегося процесса фильтрации газа в полость в

ней растёт давление. Это приводит к тому, что «крышка» не выдерживает напряжений и накопившаяся потенциальная энергия газа в полости высвобождается (переходит в кинетическую) посредством взрыва. Сила таких взрывов зависит от внутреннего давления, а разрушения вызываются ударной волной от расширяющегося газа или обломками породы, перекрывающей газонасыщенную зону повышенного давления.

Приведённые материалы показывают, что можно представить такую ситуацию, когда под инженерным сооружением или вблизи него в толще многолетнемёрзлых пород за счёт разложения газогидратов стремительно начнёт расти давление и произойдёт выброс подземного газа. Данный процесс может быть связан не только с разложением газогидратов, но и с освобождением свободного газа с аномально высоким давлением из газовых карманов. В этом случае причиной может стать уменьшение прочности кровли мёрзлых пород вследствие повышения их температуры.

Возникновение в многолетнемёрзлых породах зон, насыщенных газом под высоким давлением, на первых этапах развития процесса внешне никак не выражается, но при дальнейшем развитии скорость процессов может резко возрасти. Например, бугор пучения в районе реки Еркутаяхи высотой до 3 м вырос в течение одного года, а затем произошёл взрыв с возгоранием газа. Основная трудность выявления потенциально опасных участков возможного развития взрывных процессов заключается в том, что они могут возникнуть в многолетнемёрзлой толще без её оттаивания. Это определяет необходимость разработки методической основы наблюдений, позволяющей отследить первые признаки развития подземных естественных взрывов. Особенностью геотехнического мониторинга участков потенциальной опасности развития взрывных процессов является то, что необходимо выявить ещё не проявившийся процесс.

Исходя из этого, можно предложить некоторые мероприятия по выявлению потенциально опасных зон. Основной причиной начала развития взрывного процесса является наличие газонасыщенной области в толще мёрзлых пород и повышение в ней температуры. В районе рассматриваемого объекта следует провести геофизические исследования для выявления газонасыщенных зон и участков гидратосодержащих мёрзлых пород. Необходимо определить их морфологию, размеры, глубину и условия залегания. На следующем этапе исследований в месте обнаружения газонасыщенных и гидратосодержащих мёрзлых пород следует пробурить скважины небольшого диаметра. Глубина скважин должна быть меньше глубины верхней границы газонасыщенных и гидратосодержащих зон. Скважина оборудуется термометрическими датчиками, газоанализатором и датчиком деформаций. Измерения необходимо проводить в автоматическом режиме. В непосредственной близости от скважины оборудуется площадка для наблюдения за деформацией дневной поверхности. Целью данных исследований является фиксация изменения содержания подземных газов, изменения их давления, а также деформаций в грунтовой толще и на поверхности. Долговременное измерение данных показателей позволит оценить интенсивность миграции газов и изменения внутригрунтовых давлений, что позволит своевременно выработать мероприятия по предотвращению развития опасных процессов в районах расположения инженерных сооружений.

### **5.7. Природные и техногенно обусловленные взрывы в криолитозоне как часть системы криогенных процессов**

Уже первые высказанные в СМИ и опубликованные в научной печати данные показали, что рассматриваемые образования, привлёкшие большое внимание исследователей и



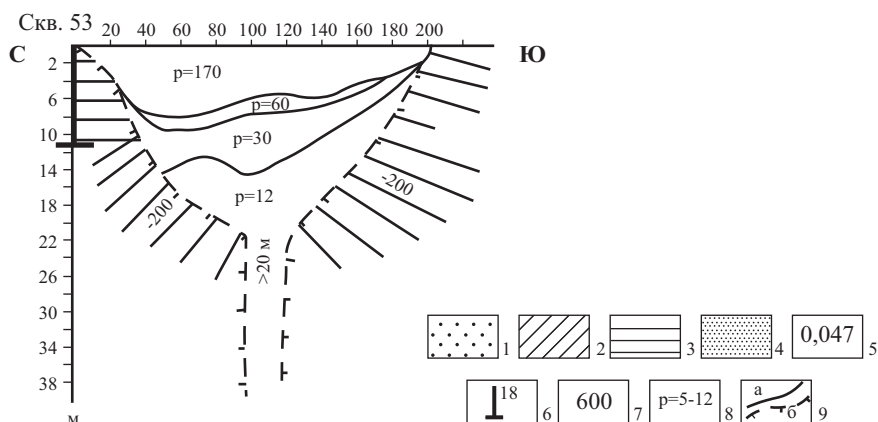
общественности, не могут быть удовлетворительно объяснены с позиций традиционных представлений, существующих в геокриологии. Их морфология, скорость образования и сопутствующие процессы отличаются от традиционных представлений, связанных с развитием термокарста или многолетних бугров пучения. Это не значит, что подобные образования не встречались прежде. Скорее всего, их рассматривали с классических позиций и относили к хорошо изученным термокарстовым воронкам. Непосредственно перед взрывом на поверхности вырастает бугор пучения. Зафиксирована высокая скорость роста бугров пучения, предшествующих взрывам. В районе Сеяхи около 0,8 м в год [Богоявленский и др., 2019], до 1,5 м в год в районе Еркутаяхи [[http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post\\_9.html](http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post_9.html)]. Для сравнения, скорость роста крупных бугров пучения обычно составляет 0,015–0,025 м в год [Данилов, 1990]. Согласно оценкам Э.Д. Ершова, на начальном этапе рост многолетних бугров составляет 0,1–0,3 м/год, а затем, по мере роста многолетнемёрзлого ядра и увеличения самого бугра, уменьшается до 0,01–0,02 м/год [Ершов, 2002].

Можно предположить, что в случае формирования воронок газового выброса речь идёт о давно известных и хорошо изученных, сменяющих друг друга процессах: формирование поверхностных водоёмов за счёт вытаивания подземных льдов (термокарст); осушение водоёмов и промерзание замкнутых подземных таликов; рост многолетних бугров пучения; последующее вытаивание ледяного ядра бугра пучения. Термокарстовые озёра по мере своего развития становятся глубже, хотя в большинстве случаев глубина их составляет 0,5–3 м, площадь колеблется от 0,016 до 7,2 км<sup>2</sup> [Криосфера..., 2013]. В случае воронок газового выброса мы имеем дело с новым типом криогенных образований. В этом случае одномоментно образуется глубокая (несколько десятков метров) выемка, часто округлой формы, до десятков метров в диаметре. Она быстро заполняется водой и внешне выглядит как обычное термокарстовое озеро. В воронках газового выброса глубина, в отличие от термокарстовых озёр, со временем уменьшается за счёт заполнения впадин осадками.

Озёра с аномальными глубинами уже привлекали внимание исследователей. Л.Н. Крицук выделила их в особую группу глубококотловинных озёр. Считалось, что развитие таких озёр на полуостровах Ямал и Гыдан связано с вытаиванием мощных залежеобразующих подземных льдов. При сравнительно небольших размерах и небольшой глубине (от 2–3 до 6–8 м) эти озёра имеют круглые воронковидные переуглубления в днище глубиной до 10–15 м [Крицук, 2010]. Детальными геофизическими работами В.Б. Пугача и В.М. Тимофеева (рис. 5.25) под дном подобных озёр были выявлены «столбообразные подозёрные талики глубиной до нескольких десятков метров, приуроченные, по мнению авторов, к зонам криогенной дезинтеграции в мёрзлых породах.

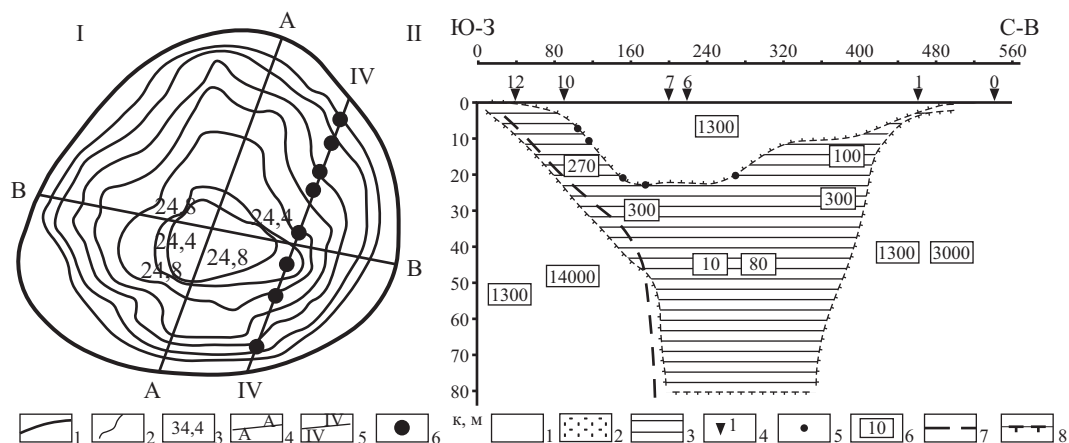
Интересные результаты были получены при обследовании озера Круглое, расположенного в долине реки Юрибей на западе Гыданского полуострова. Озеро располагается на поверхности сильно заозёрненной (до 40%) III озёрной террасе. Наибольшая глубина озера 25 м, диаметр 600 м. Геофизические исследования показали, что чаша протаивания имеет трубообразную форму, аналогичную рассмотренным выше. Выявленная мощность талика около 80 м, ширина в средней и нижней части 150–200 м (рис. 5.26).

В 7 м от берега на поверхности высотой 28,5 м была пробурена скважина. Уже с глубины 1,6 м породы, представленные переслаиванием песков, суглинков и глин, сильно-льдистые. С глубины 26,5 до 65,3 м залегает лёд, разделённый на глубине 32,2–33,5 м слоем глины. Подстилаются льды глиной темно-серой, с резким болотным запахом. После бурения из скважины выходил под высоким давлением горючий газ [Крицук, 2010].



**Рис. 5.25. Результаты донных геофизических работ на озере Средне-Ямального ГКМ (данные В.М. Тимофеева и В.Б. Пугача, 1982):**

1 — пески, 2 — суглинки, 3 — глины, 4 — подземный лёд (ледогрунт), 5 — озёрная вода, 6 — скважина и её номер, 7 — удельное сопротивление слоя, 8 — криопэги, 9 — границы: а — слоёв с различным удельным сопротивлением, б — мёрзлых пород [Крицук, 2010]



**Рис. 5.26. Результаты изучения донных отложений оз. Круглое (западный Гыдан) [Крицук, 2010]**

I — результаты промера глубины озера: 1 — граница озера; 2 — изолинии глубины озера; 3 — точка электроразведочных работ; 4 — линия глубинного разреза; 5 — линия наблюдательного профиля (на рис. II); 6 — точка вертикального электроразведывания.

II — результаты геофизических наблюдений (материалы В.Б. Пугача, А.Г. Скворцова и В.М. Тимофеева, 1990 г.): 1 — озерная вода; 2 — песок; 3 — немерзлые грунты; 4 — точки донных ВЭЗ, вынесенные на дневную поверхность; 5 — температура на дне озера; 6 — величина удельного электрического сопротивления; 7–8 — кровля мерзлых пород (7 — по сейсмическим данным; 8 — по электрическим данным)

Здесь, как и в других рассмотренных примерах, столбообразная структура подо-  
зёрной толщи сочетается с пластовыми залежами подземных льдов и высоким содер-  
жанием газа в подстилающих лёд породах. Рассмотренные выше озёра относятся к так  
называемым голубым озёрам. Данный тип озёр с переуглублённым дном И.Л. Кузин  
[1982, 1992, 2005], Л.Н. Крицук [2010], Ю.Б. Баду [2013] и др. считают тектонически  
обусловленными. Как показали исследования сотрудников ВНИГРИ, «голубые» озёра  
связаны с выходами углеводородных газов. Характерной особенностью этих озёр яв-  
ляется наличие на их дне «воронок взрыва», представляющих собой конусовидное  
углубление, окружённые аккумулятивными валиками. Диаметр воронок достигает 5–  
10 м и более [Кузин, 1992]. Анализ космических снимков Ямала и Гыдана, проведённый  
Л.Н. Крицук, привел её к выводу, что «голубые» озёра часто связаны с мощными зале-  
жеобразующими подземными льдами. Приурочены они к зонам разломов и долинам  
рек, диаметр составляет 30–50 до 100 м и более. Особенно широко «голубые» озёра  
распространены в пределах Бованенковского ГКМ. Они приурочены к тыловым частям  
эрозионных пойм и к вытянутым в направлении глубинных разломов останцам древних  
поверхностей (часто имеют круглую форму и небольшие размеры). Часто они имеют  
идеально круглую форму, а в береговых обрывах этих озёр вскрыты выходы пластов  
подземного льда [Крицук, 2010].

В настоящее время можно констатировать, что формирование поверхностных озёр  
на территории распространения многолетнемёрзлых пород определяется не только тер-  
мокарстовыми, но и взрывными процессами. Вероятно, доля озёр, сформировавшихся  
за счёт взрывных процессов, не будет превышать 5–10% от общего количества, но и в  
этом случае теоретические представления о развитии озёр в криолитозоне необходимо  
корректировать. Теплообменные процессы на границе мёрзлых пород могут вызвать  
образование очагов повышенного давления в массиве мёрзлых пород (выделение газа  
при разложении газогидратов или повышение давления свободного газа при повышении  
температуры мёрзлых пород). При подготовке взрывных процессов увеличивается роль  
напорных процессов, перераспределяющих жидкие и газовые флюиды в массиве про-  
мерзающих и мёрзлых пород. Необходимо учитывать фильтрацию газа в мёрзлых по-  
родах как за счёт внутренних источников (разложение газогидратов, повышение дав-  
ления свободного газа), так и за счёт поступления газа из внешних источников (про-  
никновение газовых флюидов в мёрзлый массив из подстилающих мерзлоту пород).  
Данные процессы, несомненно, являются криогенными, поскольку их возникновение  
и протекание обусловлено теплообменом мёрзлых пород с окружающей средой. Они  
реализуются в мёрзлых породах, от строения и свойств которых зависят их интенсив-  
ность и конечный результат. Взрывные процессы образуют неразрывные парагенети-  
ческие комплексы с традиционными криогенными образованиями. Поэтому они долж-  
ны быть включены в область наук о криолитозоне (геокриология, криолитология, ин-  
женерная геокриология и др.).

В настоящее время начинает формироваться понятийный аппарат, связанный со  
взрывными процессами в мёрзлых породах. Процесс образования воронок газового вы-  
броса некоторые авторы предлагают определить как криовулканизм. С.Н. Булдович с  
соавторами определяет данный процесс как разрушение гидролакколитов газонасы-  
щенной воды или водонасыщенного грунта, находящихся под криогенным гидростати-  
ческим давлением, сформировавшихся при всестороннем промерзании подо-  
зёрного та-  
лика [Bulldovicz et al., 2017]. В.И. Богоявленский предлагает понятие «криовулкан»

определять как «геологическое образование, постоянно или периодически извергающее газ, куски мёрзлой породы, ледогрунта и (или) льда» [Богоявленский и др., 2019]. Сам термин формально соответствует описываемому явлению, но формулировка, несомненно, требует дальнейшей доработки. Воронки газового выброса могут формироваться не только при промерзании таликовой зоны, но и по другим причинам, например при разложении газовых гидратов, содержащихся в мёрзлых породах. Во втором определении не содержится упоминания процесса, определяющего причину извержения. В любом случае понятие «криовулканизм» должно содержать криогенную составляющую. К терминам свободного пользования можно отнести такие понятия, как воронка газового выброса, криогенный кратер и др.

## **Выводы**

Выбросы газа при бурении в мёрзлых породах, взрывы гидролакколитов, формирование воронок газового выброса относятся к физическим взрывным процессам, обусловленным высвобождением внутренней потенциальной энергии жидкости или газа из замкнутых объёмов за короткое время.

Взрывные процессы, связанные с техногенными воздействиями, и формирование воронок газового выброса во многом сходны и обусловлены нарушением термодинамических условий, обеспечивающих стабильное состояние массивов газо- и гидратосодержащих многолетнемёрзлых пород.

По мере освоения Арктики тепловое воздействие на многолетнемёрзлые породы будет возрастать, опасность взрывных процессов для инженерных сооружений увеличится. Тем не менее данная группа процессов не только не учитывается при выборе проектных решений и прогнозах взаимодействия инженерного сооружения с многолетнемёрзлыми грунтами, но даже не включена в группу опасных геологических процессов.

## Библиография

1. Аветов Н.Р., Краснова Е.А., Якушев В.С. О возможных причинах и природе газовыделений вокруг газовых и газоконденсатных скважин на территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения // Актуальные проблемы добычи газа. 2018. № 1 (33). С. 33–40.
2. Алидибиров М.А. Механизм фрагментации сильновязкой магмы при вулканических взрывах (экспериментальное исследование): автореф. дис. ... д. ф.-м. н. М., 1998. 44 с.
3. Андреев В.И. Гидролакколиты (булгунняхи) в Западно-Сибирских тундрах // Известия Государственного географического общества. 1936. Т. 68. Вып. 2. С. 186–210.
4. Арз Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II, № 4. С. 42–50.
5. Бадю Ю.Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. М.: Научный мир, 2018. 232 с.
6. Баженова О.И. Современная динамика озерно-флювиальных систем олон-торейской высокой равнины (Южное Забайкалье) // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 371. С. 171–177.
7. Богомолов Н.С., Складневская А.Н. О взрывах гидролакколитов в южной части Читинской области // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. С. 127–130.
8. Богоявленский В.И., Мажаров А.В., Пушкарёв В.А., Богоявленский И.В. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал. Предварительные результаты экспедиции 8 июля 2015 г. // Бурение и нефть. 2015. № 8. С. 8–13.
9. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н., Никонов Р.А., Сизов О.С. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2 (34). С. 31–47.
10. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озёр с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4 (36). С. 52–68.
11. Гарагаш И.А. Моделирование геомеханических процессов при эксплуатации месторождений газа в многолетнемёрзлых и гидратосодержащих породах
12. Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений полуострова Ямал: дис. ... д. г.-м. н. Надым, 2006. 375 с.
13. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1984. Т. 1. 560 с.
14. Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Гумеров К.М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. М.: Недра-Бизнес-центр, 2003. 308 с.
15. Данилов И.Д. Подземные льды. М.: Недра, 1990. 144 с.
16. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 683 с.
17. Зверев Г.В., Тарасов А.Ю. Расчет и анализ воздействия многолетнемёрзлых пород на крепление скважины № 338 Ванкорского месторождения в период эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2013. № 8. С. 41–50.
18. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
19. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
20. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 2. С. 15–25.



21. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2: Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО «Газпром экспо», 2013. 424 с.
22. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010. 352 с.
23. Кузин И.Л. Новейшая тектоника Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. М.: ВИНТИ, 1982. 194 с.
24. Кузин И.Л. О природе аномальных озер — показателей скоплений углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазоаккумуляции в основных продуктивных толщах Западной Сибири. СПб.: ВНИГРИ, 1992. С. 129–137.
25. Кузин И.Л. Геоморфология Западно-Сибирской равнины. СПб.: Гос. полярная академия, 2005. 176 с.
26. Медведев В.Я., Иванова Л.А., Лысов Б.А., Ружич В.В., Марчук М.В. Экспериментальное изучение декомпрессии, проницаемости и залечивания силикатных пород в зонах разломов // Геодинамика и тектонофизика. 2014. № 5. С. 905–917. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0162>.
27. 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. 1989. № 2. С. 118–128.
28. Мельников В.П., Спесивцев В.И., Куликов В.Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря. В сб.: Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 159–269.
29. 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.
30. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М.: ГЕОС, 2007. 137 с.
31. Панов В.К. Экспериментальное моделирование процессов при извержении типа «направленный взрыв» // Проблемы эксплозивного вулканизма: материалы международного симпозиума. Петропавловск-Камчатский, 25–30 марта 2006 г. / отв. ред. чл.-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 49–57.
32. Панов В.К. Применение линейной теории нестационарной фильтрации для анализа экспериментов по разрушению пористого газонасыщенного материала // Вестник краунц. науки о Земле. 2009. № 1. Вып. № 13. С. 89–97.
33. Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали. Л.: Изд-во АН СССР, 1930. 177 с.
34. Покровский Г.И. Взрыв. М.: Недра, 1980. 190 с.
35. Свидуневич Н.А., Окатова Г.П., Куис Д.В. Материаловедение и технология конструкционных материалов: лабораторный практикум с использованием металлографического комплекса. Минск: БГТУ, 2011. 133 с.
36. Рекомендации по определению прочности мерзлых грунтов с морским типом засоления / Госстрой России. М.: ФГУП ПНИИИС, 2001.
37. Стругов А.С. Взрыв гидролакколита (Читинская область) // Природа. 1955. № 6. С. 117.
38. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Газовые выбросы в криолитозоне как новый вид геокриологических опасностей // Геориск. 2017а. № 3. С. 58–65.

39. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мерзляков В.П., Типенко Г.С. Развитие взрывных процессов в криолитозоне в связи с формированием Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2017б. № 4. С. 13–37.
40. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 1–25.
41. Цветков В.М., Сизов И.А., Сырников Н.М. О механизме дробления твердой среды взрывом // Доклады АН СССР. 1976. Т. 231, № 5. С. 1067–1069.
42. Чабан П.Д. О газовых гидратах в вечномёрзлых россыпях // Колыма. 1991. № 6. С. 18–19.
43. Шостак Н.А. Моделирование образования и диссоциации гидратов при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений: автореф. дис. ... к. т. н. Краснодар: Кубан. гос. технол. ун-т, 2015. 23 с.
44. Якушев В.С. Одна из возможных причин газовых выбросов в толщах многолетнемёрзлых пород // Геология нефти и газа. 1989. № 4. С. 45–46.
45. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
46. Якушев В.С. Влияние литологии криолитозоны на устойчивость реликтовых газогидратов в Арктике // Труды ИПНГ РАН (Москва). Серия: Конференции. 2017. Вып. 2 (1). С. 172–173.
47. Якушев В.С. Механизмы концентрации природного газа в криолитозоне // Актуальные проблемы нефти и газа: труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология — 2018». 2018. Вып. 4 (23). С. 1–4.
48. Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a giant crater in the Yamal peninsula (Russia) // Scientific reports. 2017. Vol. 7; 2018. Vol. 8.
49. Mackay J.R., Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula area, Northwest Territories, *Geogr. Phys. Quat.*, 1979, vol. 33, no. 1, pp. 3–61. doi 10.7202/1000322ar.
50. Leibman, M.O., Kizyakov, A.I., Plekhanov, A.V., and Streletskaya, I.D., New permafrost feature — deep crater in central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations, *Geogr. Environ.*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 68–80. doi 10.15356/2071-9388\_04v07\_2014\_05.
51. [http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post\\_9.html](http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post_9.html).
52. <https://frost3d.ru/dobyvayushchaya-skvazhina-v-merzlom-grunte/>.

## ГЛАВА 6.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОДАХ ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ ГАЗОГИДРАТОВ

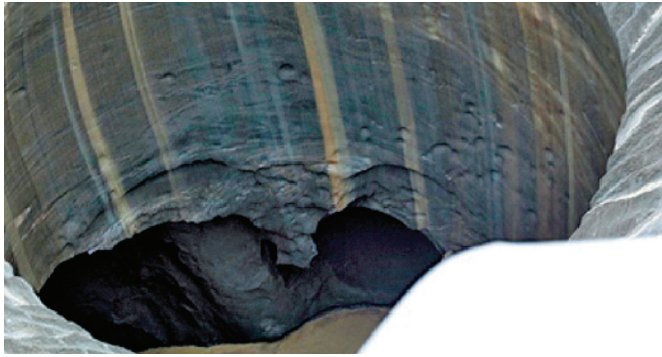
### Введение

Изучение криогенных газодинамических геосистем невозможно без построения их математических моделей. Это обусловлено рядом обстоятельств. Геологические системы являются весьма сложными структурами, находящимися под влиянием многочисленных трудно учитываемых факторов. Их практически невозможно изучать в реальных условиях, где мы наблюдаем лишь конечный результат взаимодействия сменяющих друг друга процессов. Математическая модель, базирующаяся на фундаментальных принципах, определяющих существование той или иной геодинамической системы, позволяет избавляться от случайных и второстепенных показателей и понять общие закономерности её развития. Существование каждой из выделенных флюидодинамических геосистем обусловлено движением вещества в твёрдом, жидком и газообразном состоянии. Для описания движения данных флюидов уже разработаны соответствующие математические алгоритмы и построены математические модели. В силу этого было бы неправильным отказываться от наработанных подходов.

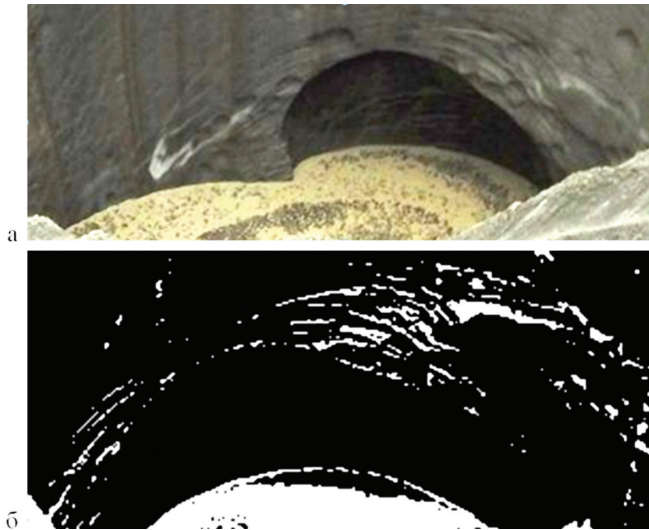
### 6.1. Основные элементы строения криогенной газодинамической геосистемы, сформировавшей Ямальский кратер

Высокие давления внутригрунтовых газов, взаимодействуя с породой, производят её разрыхление, при этом формируются порово-кавернозно-трещинные резервуары. Исследования Е.М. Чувилина и С.И. Гребёнкина показали, что диссоциация порового гидрата сопровождается увеличением объёма свободного порового пространства. Это приводит к повышению газопроницаемости, в результате чего ранее практически непроницаемые мёрзлые гидратосодержащие породы могут становиться проницаемыми. [Чувилин, Гребёнкин, 2018]. На рис. 6.1–6.6 представлены данные полевых наблюдений по строению различных зон Ямальского кратера, характеризующие стадии развития процессов, связанных с диссоциацией газовых гидратов в многолетнемёрзлых льдистых породах. В зоне диссоциации формируются многочисленные каверны. На рис. 6.1 зафиксирована зона каверн в нижней части Ямальского кратера (по мере вытаивания каверны сливаются и образуют единый грот (рис. 6.2, а, 6.4). В данной зоне развивается высокое давление, которое приводит к деформации первичной слоистости вышележающих отложений (см. рис. 6.2). При разработке математической модели скопление каверн в монолитной породе, соединённых между собой, можно представить как единую полость, в которой наблюдается общее повышенное давление газа (около 2,5 МПа).

Повышенное давление газа в зоне диссоциации газогидратов приводит к его фильтрации в виде газовых струй (рис. 6.3) в вышележащие мёрзлые породы (рис. 6.4). Газовые струи хорошо прослеживаются в стенке грота, образовавшегося после слияния в результате вытаивания отдельных каверн (см. рис. 6.3).



**Рис. 6.1.** Нижняя часть Ямальского кратера. Система каверн, приуроченная к зоне разложения газогидратов (июль 2014 г.). Фото В.В. Оленченко



**Рис. 6.2.** Пластические деформации льда в зоне, примыкающей к гроту (июль 2014 г.):

а — фотография; б — снимок после обработки; белые полосы — деформированные шлиры льда. Фото В.В. Оленченко



**Рис. 6.3.** Струйная дегазация из зоны каверн с повышенным давлением газа (ноябрь 2014 г.). Фото В.А. Пушкарёва





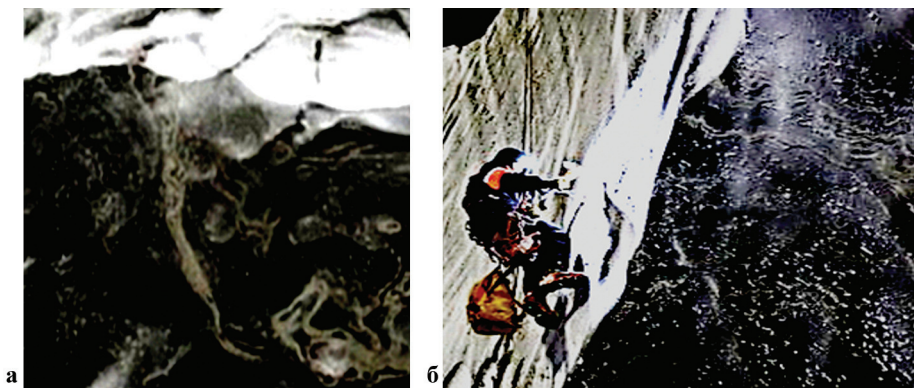
**Рис. 6.4. Фотография стенки кратера. В нижней части грот, образовавшийся при вытаивании каверн (ноябрь 2014 г.). Фото В.А. Пушкарёва**

Разрозненные газонасыщенные флюиды, выводящие газ по локальным сконцентрированным каналам из сформировавшейся в результате диссоциации газогидратов полости, выше разбиваются на множество мелких каналов, переходящих в отдельные газовые пузыри (см. рис. 6.4, 6.5). На рис. 6.5 показаны особенности перехода газовых струй в ячеистые структуры газовых пузырей в вышележащем горизонте.

В краевых частях области повышенного давления формируется кольцевая зона с вертикально ориентированными деформациями и трещинами, по которым фильтруется газ в виде плоских пузырей различных размеров и морфологии (рис. 6.6). Газовые пузыри образуют вытянутые или изометричные, а иногда и сотовые скопления в стенках кратера (см. рис. 6.4, 6.6). Данные процессы более подробно описаны в главах 2, 3.

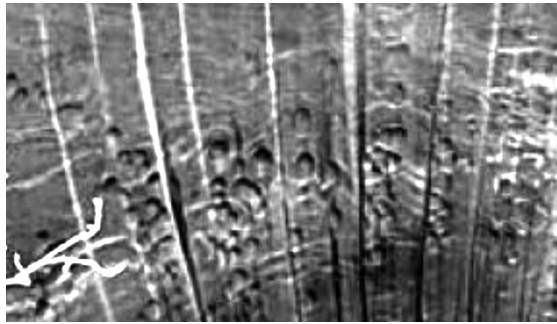
Можно выделить общую направленность процессов, обуславливающих миграцию газа в мёрзлых породах Ямальского кратера.

1. Повышение температуры мёрзлых пород под воздействием образовавшегося на поверхности озера приводит к началу диссоциации в слое газогидратов, залегающих на глубине 60 м. Выделение газа и воды, находящихся под повышенным давлением в локальной зоне мёрзлых пород.



**Рис. 6.5. Контакт газовых флюидов с ячеистыми льдами, соответствующими газовым пузырям на стенках Ямальского кратера:  
а — фрагмент рисунка; б — фото внутри грота (ноябрь 2014 г.).  
Фото В.А. Пушкарёва**





**Рис. 6.6. Зона фильтрации газа. Ячеистый лёд в стенке Ямальского кратера (июль 2014 г.). Фото В.И. Богоявленского [Богоявленский, 2015]**

2. Образование зоны каверн, заполненных газом с повышенным давлением в области диссоциации газогидратов. Сгущение каверн можно представить как единую полость, заполненную газом, находящимся под давлением около 2,5 МПа.

3. Образование зоны пластических деформаций в мёрзлых породах, перекрывающих полость.

4. Формирование газовых и водных флюидов, выдавливаемых из области повышенного давления (диссоциация газогидратов).

5. Переход струйной фильтрации газов в фильтрацию газовых пузырей различных размеров и морфологии.

6. Формирование газонасыщенного ледогрунтового штока, в котором фильтрующийся газ находится под повышенным давлением. Шток обрамляет кольцевая зона вертикально ориентированных трещин, по которым фильтруется газ в виде плоских вертикально ориентированных пузырей.

## **6.2. Структурная модель мёрзлого грунта и её математическое описание**

Рассмотрим структурную модель мёрзлого грунта (супеси), в которой дисперсные песчаные частички вморожены в глиняную или ледяную матрицу. Предполагается, что характеристики матрицы нелинейным образом зависят от температуры и при её повышении до положительных значений вокруг включений может образоваться слой талой воды. Для математического описания такой модели будем использовать параметрический метод асимптотического усреднения уравнений с быстро осциллирующими коэффициентами [Власов, Волков-Богородский, 2014], который является обобщением и развитием метода асимптотического усреднения Бахвалова [Бахвалов, Панасенко, 1984]. В соответствии с этим методом механические характеристики мёрзлого грунта находятся из системы уравнений термоупругости с коэффициентами, зависящими от температуры и быстрых переменных. Зависимость коэффициентов от быстрых переменных позволяет описать на микроуровне структуру механической системы с учётом промежуточного слоя талой воды и геометрии включений, которые, предполагается, расположены периодическим образом. На макроуровне поведение такой системы определяется усреднённым уравнением с эффективными характеристиками, которые находятся из решения задачи теории упругости в области с одним включением на ячейке периодичности с граничными условиями специального вида. Зависимость от температуры разрешается в этой системе уравнений параметрическим образом, а геометрия включений и параметры межфазного слоя талой воды учитываются явно.

Задача на ячейке по определению эффективных термомеханических характеристик формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( A_{ij}(\xi, T) \frac{\partial (N_i + \xi_i E)}{\partial \xi_j} \right) = 0, \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( A_{ij}(\xi, T) \left( \frac{\partial m}{\partial \xi_j} - \alpha_j \right) \right) = 0, \quad (6.2.1)$$

$$[N_i] = \left[ A_{ij}(\xi, p) \frac{\partial (N_i + \xi_i E)}{\partial \xi_j} n_i \right] = 0, [m] = \left[ A_{ij}(\xi, p) \frac{\partial m}{\partial \xi_j} n_i \right] = 0, \quad (6.2.2)$$

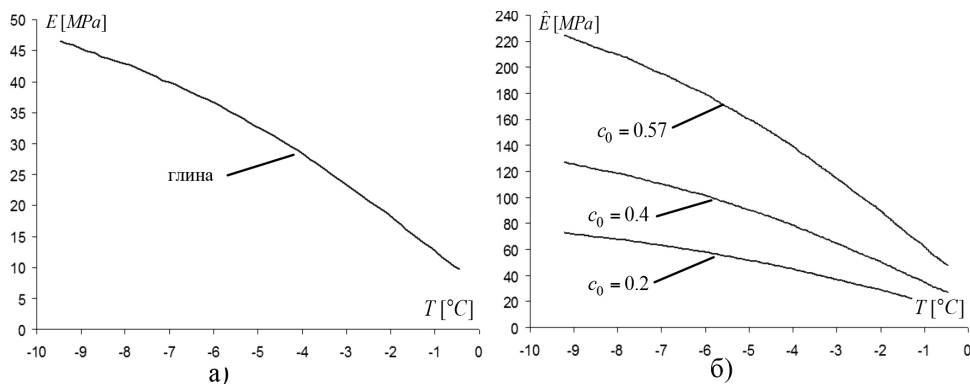
где  $N_i(\xi)$ ,  $m(\xi)$  — периодические функции быстрых переменных (матричные и векторные);  $A_{ij}(\xi, T) = \{\mu(\xi, T)(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{jk}\delta_{il}) + \lambda(\xi, T)\delta_{ij}\delta_{kl}\}$  — матричные коэффициенты;  $\lambda(\xi, T)$ ,  $\mu(\xi, T)$  — параметры Ляме;  $\alpha_j = \{\alpha_0\delta_{jk}\}$  — коэффициенты термического расширения;  $\xi = x/\varepsilon$  — быстрые переменные;  $\varepsilon$  — расстояние между включениями.

Эффективные модули жесткости определяются по формуле среднего по ячейке от локальных напряжений, что выражается следующей формулой с функциями быстрых переменных:

$$\hat{A}_{ij} = \left\langle A_{ik}(\xi, T) \frac{\partial (N_j + \xi_j E)}{\partial \xi_k} \right\rangle, \hat{A}_j \hat{\alpha}_j = - \left\langle A_{ik}(\xi, T) \left( \frac{\partial m}{\partial \xi_k} - \alpha_k \right) \right\rangle. \quad (6.2.3)$$

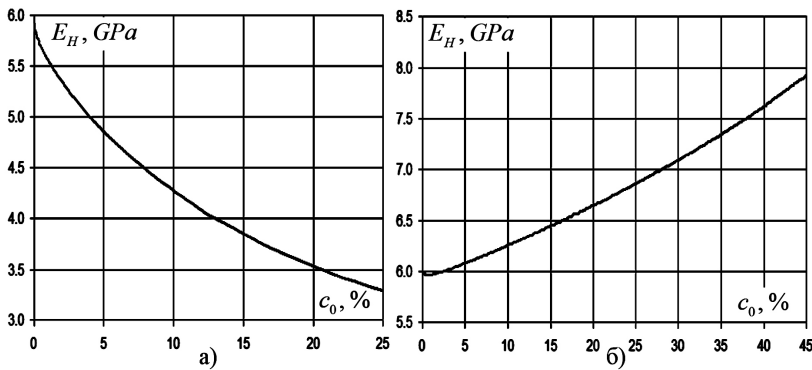
Для включений сферической формы для эффективного решения задачи на ячейке применяется метод радиальных множителей, позволяющий математически точно описать контактные условия на межфазных границах для функций быстрых переменных [Волков-Богородский, 2016]. Этот подход и алгоритм вычисления эффективных характеристик был реализован численно с помощью метода наименьших квадратов. На рисунках ниже представлены примеры численных расчётов зависимостей эффективного модуля Юнга от температуры для случая глиняной матрицы и от концентрации песчаных включений с учётом слоя талой воды для случая ледяной матрицы.

На рис. 6.7 приведён пример расчёта эффективного модуля общей деформации  $E$  для мёрзлого грунта (супеси) в диапазоне температур от  $-10$  до  $0^\circ\text{C}$ , состоящего из сферических частиц оксида кремния (песка), помещённых в глинистую среду при коэффициенте объёмного заполнения  $c_0 = 0,2; 0,4; 0,57$ . На рис. 6.7, а представлена исходная диаграмма зависимости модуля общей деформации глинистой среды от температуры, на основе которой производился расчёт эффективных характеристик супеси (рис. 6.7, б).



**Рис. 6.7. Эффективные механические характеристики мёрзлых грунтов**

На рис. 6.8 представлена зависимость эффективного модуля общей деформации  $E_H$  от объёмной концентрации включений  $c_0$  при разной ширине межфазного слоя  $l/A = 0,1$  и  $l/A = 0,02$  для периодической среды, образованной из ледяной матрицы с характеристиками  $E_M = 6 \text{ GPa}$ ,  $\nu_M = 0,3$ , наполненной минеральными частицами сферической формы с характеристиками  $E_I = 50 \text{ GPa}$ ,  $\nu_I = 0,3$ .  $A$  — расстояние между центрами частиц. Около каждой частицы имеется водная прослойка толщиной  $l$ . Этот слой характеризуется объёмным модулем  $K_L = 1000 \text{ GPa}$  и коэффициентом Пуассона  $\nu_L = 0,49999$ , что соответствует модулю сдвига  $\mu_L = 0,02 \text{ GPa}$ . В зависимости от толщины прослойки талой воды зависимость эффективного модуля от концентрации качественно изменяется. При относительно большой толщине прослойки модуль общей деформации падает с ростом концентрации (рис. 6.8, а), а при относительно малой — растёт (рис. 6.8, б).



**Рис. 6.8. Эффективный модуль общей деформации мёрзлого грунта:**  
 а —  $l/A = 0,1$ ; б —  $l/A = 0,02$

### 6.3. Моделирование напряжённо-деформированного состояния ледогрунтового массива в окрестности первичной полости избыточного давления, формирующейся на начальной стадии разложения газогидратов в многолетнемёрзлых породах

Известно, что при расчёте НДС в области, моделирующей полость в многолетнемёрзлых породах в условиях цикла «нагрузка/разгрузка», идеально-упругопластическая модель Друкера–Прагера не вполне корректно описывает НДС расчётной области. Более адекватной является модель Хоека–Брауна. Представляется целесообразной разработка модели, которая отражала бы в идеале различное поведение материала при нагрузке/разгрузке. Механические характеристики (прочностные и деформационные) материала в такой модели должны зависеть от траектории нагружения. Частичные наработки для создания такой модели имеются [Власов, Волков-Богородский, Мнушкин, 2011].

Отметим, что зона пластических деформаций в окрестности свода полости соответствует потенциальной потере устойчивости, а зона пластических деформаций в окрестности боковых поверхностей и дна соответствует разрыхлению материала. На контуре полости происходит постепенное ослабление механических характеристик от их мгновенных (высоких) значений к длительным (более низким). При этом избыточное давление газа в «растущей полости» может периодически сбрасываться из-за медленного диффундирования газа во вмещающий грунтовой массив, поскольку всегда есть трещины либо плёнки незамёрзшей воды в высокотемпературных мёрзлых грунтах. Однако вероятен также ме-

ханизм постепенного, медленного (в геологическом масштабе времени) «всплытия» трансформирующейся полости (медленное вязкое течение), поскольку избыточное давление в «растущей полости» может быть весьма высоким.

В данном разделе решение задачи об определении НДС в массиве мёрзлых пород осуществлялось с использованием обеих моделей: Друкера–Прагера [Drucker, Prager, 1952] и Хоека–Брауна [Hoek, Torres, Corkum, 2002; Hoek, 2002].

### 6.3.1. Идеально-упругопластическая модель Друкера–Прагера

Модель Друкера–Прагера предназначена для описания поведения грунтов и горных пород и основана на ассоциированном законе пластического течения со следующим условием прочности:

$$F(\sigma) = 3\alpha \cdot \sigma_{cp} + \tau_i - k. \quad (6.3.1)$$

Заметим, что частными случаями условий пластичности Друкера–Прагера являются условия пластичности Треска, Мизеса и Мора–Кулона.

Исходные положения классической теории пластического течения:

- тело изотропно;
- относительное изменение объёма  $3\varepsilon_{cp}$  пропорционально  $\sigma_{cp}$ ;
- полные приращения составляющих деформаций  $d\varepsilon_{ij}$  складываются из приращений составляющих упругой деформации  $d\varepsilon_{ij}^e$  и пластической деформации  $d\varepsilon_{ij}^p$ :

$$d\varepsilon_i = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p; \quad (6.3.2)$$

- девиаторные составляющие приращений тензоров напряжений и пластической деформации подобны и коаксиальны.

В соответствии с положениями ассоциированного закона пластического течения принцип нормальности (пропорциональности изменения объёма напряжениям) можно записать в виде

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right), \quad (6.3.3)$$

где  $d\lambda$  — коэффициент пропорциональности, характеризующий пластические свойства материала,

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{cp}} \cdot \frac{\partial \sigma_{cp}}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial F}{\partial \tau_i} \cdot \frac{\partial \tau_i}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (6.3.4)$$

Здесь

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{cp}} = 3; \quad \frac{\partial F}{\partial \tau_i} = 1, \quad (6.3.5)$$

$$\frac{\partial \sigma_{cp}}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \frac{\partial \tau_i}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{2\tau_i} \cdot \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \\ 2\tau_{xy} \\ 2\tau_{xz} \\ 2\tau_{yz} \end{bmatrix}, \quad (6.3.6)$$

где  $S_x = \sigma_x - \sigma_{cp}$ ;  $S_y = \sigma_y - \sigma_{cp}$ ;  $S_z = \sigma_z - \sigma_{cp}$ .

При пластическом деформировании напряжения должны удовлетворять условиям

$$F(\sigma_{ij}) = 0 \text{ и } dF(\sigma_{ij}) = \left[ \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right] \cdot d\sigma_{ij} + \left[ \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}^p} \right] \cdot d\varepsilon_{ij}^p = 0; \quad (6.3.7)$$

зависимости между приращениями напряжений и деформаций будут иметь вид:

$$d\varepsilon_{ij} = D^{-1} \cdot d\sigma_{ij} + d\lambda \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right), \quad (6.3.8)$$

где  $D$  — матрица упругих констант.

Вводя обозначения:

$$a^T = \left[ \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right]; \quad A = -\frac{1}{d\lambda} \cdot \left[ \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}^p} \right] \cdot d\varepsilon_{ij}^p, \quad (6.3.9)$$

выражения (6.3.7) и (6.3.8) можно записать следующим образом:

$$a^T \cdot d\sigma_{ij} - A \cdot d\lambda = 0 \quad (6.3.10)$$

$$d\varepsilon_{ij} = D^{-1} \cdot d\sigma_{ij} + d\lambda \cdot a. \quad (6.3.11)$$

Выражая из (6.3.11)  $d\sigma_{ij}$  и подставляя в (6.3.10), получим:

$$d^T \cdot d\varepsilon_{ij} = A \cdot d\lambda + d\lambda \cdot b, \quad (6.3.12)$$

где

$$d^T = a^T \cdot D; \quad b = a^T \cdot d; \quad d = D \cdot a. \quad (6.3.13)$$

Из (6.3.12) можно выразить  $d\lambda$ :

$$d\lambda = \frac{1}{A+b} \cdot d^T \cdot d\varepsilon_{ij}. \quad (6.3.14)$$

Подставляя выражение (6.3.14) в (6.3.12), можно записать:

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= (D - D_p) \cdot d\varepsilon_{ij} = D_{ep} \cdot d\varepsilon_{ij}, \\ D_p &= \frac{1}{A+b} \cdot d \cdot d^T, \end{aligned} \quad (6.3.15)$$

где  $D_{ep}$  — упругопластическая матрица.

### 6.3.2. Модель Хоека–Брауна (Модель НВ)

Критерий Хоека–Брауна является самым распространённым в настоящее время критерием прочности пород, широко применяемым в зарубежной расчётной практике. Он был предложен Е. Хоеком и Е.Т. Брауном на основе теоретического и экспериментального опыта в разрушении горных пород [Hock, Brown, 1980]. Для ненарушенных пород этот критерий даёт соотношение пределов прочности на одноосное растяжение и одноосное сжатие в пределах 1/7–1/25. И для реальных массивов пород параметры критерия Хоека–Брауна могут быть оценены из лабораторных испытаний, проводимых на образцах ненарушенной горной породы. Это влияние определяется по эмпирическим законам, оценивающим качество горных массивов.

Критерий Хоека–Брауна имеет следующий вид:



$$f(\sigma_1, \sigma_3) = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (6.3.16)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  соответствуют максимальным и минимальным величинам главных напряжений;  $\sigma_{ci}$  — предел прочности на одноосное сжатие ненарушенных пород в образце,  $a$ ,  $m_b$ ;  $s$  — безразмерные константы ( $s = 1$  для ненарушенного массива).

Постоянные  $a$ ,  $m_b$  и  $s$  для массива породы определяются следующими зависимостями:

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{-GSI-100}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right), \quad (6.3.17)$$

$$m_b = m_i \cdot \exp \left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right), \quad (6.3.18)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right), \quad (6.3.19)$$

где  $GSI$  (*Geological Strength Index*) — коэффициент геологической прочности, учитывающий геологические особенности породного массива, в частности его структуру и наличие трещин ( $5 \leq GSI \leq 100$ );  $D$  — параметр, зависящий от степени нарушенности массива вследствие взрывных работ и эффекта релаксации напряжений (варьируется от 0 для ненарушенной скальной породы до 1 для сильно нарушенного породного массива);  $m_i$  — константа, учитывающая генезис и текстуру горных пород ( $4 \leq m_i \leq 33$ ), при этом большая величина  $m_i$  соответствует хрупким породам, а меньшая — пластичным породам, значение  $m_i = 0$  соответствует состоянию идеальной пластичности.

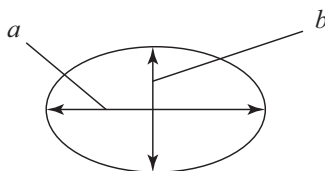
Рекомендации по выбору параметров  $GSI$ ,  $D$ ,  $m_i$  для модели Хоека–Брауна приведены в работе [Шашенко, Ковров, 2010].

#### 6.3.4. Результаты численного моделирования и их анализ

Все варианты численного моделирования НДС массива мёрзлых пород реализовывались с использованием трёх этапов нагружения:

- этап 1 — моделирование начального напряжённого состояния области (без полости);
- этап 2 — моделирование НДС области с учётом условно мгновенного появления не нагруженной избыточным давлением полости;
- этап 3 — моделирование НДС области с учётом избыточного давления по контуру полости.

Рассматривались три варианта расчётов с различными конфигурациями полости, имеющей эллипсообразную форму с полуосями  $a$  и  $b$ :



Численные расчёты НДС массива мёрзлых пород проводились для двух вариантов по условиям прочности. Но поскольку в модели Друкера–Прагера механические характеристики материала одинаковы как при нагрузке, так и при разгрузке, то она дает менее фи-

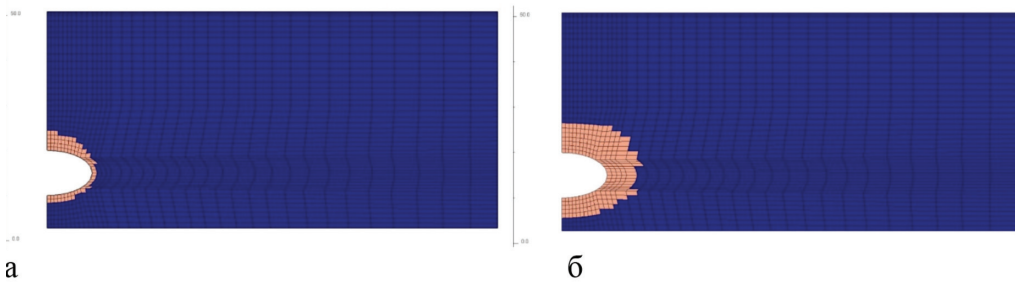
зически оправданную картину НДС вблизи полости. В частности, это выражается в конфигурации зон пластичности и, соответственно, в завышенных горизонтальных смещениях. Данная особенность идеально-упругопластической модели Друкера–Прагера неоднократно отмечалась исследователями. Кроме того, в этой модели угол дилатансии равен углу внутреннего трения, т. е. он завышен, поскольку используется ассоциированный закон пластического течения. Поэтому мы приводим вариант расчёта с использованием модели Друкера–Прагера только для одного варианта расчётной области, исключительно для сравнения с результатами расчёта по более адекватной модели Хоека–Брауна.

Исходные данные для расчётов представлены в табл. 6.1, результаты расчётов представлены на рис. 6.9–6.12.

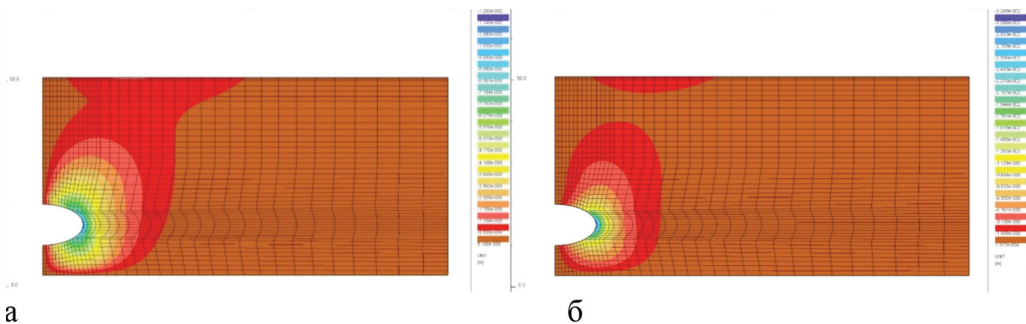
**Таблица 6.1. Исходные данные для расчётов**

№	$\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	$E$ , МПа	$\nu$	$C$ , кПа	$\phi_0$	$R_c$ , МПа	$R_p$ , МПа
1	1,82	20	0,30	100	15	–	–
2	1,90	420	0,42	180	8	–	–
3	1,60	250	0,45	100	5	150	9

**6.3.4. Вариант 1. Модель Хоека–Брауна и Друкера–Прагера,  $a = 20$  м,  $b = 10$  м**

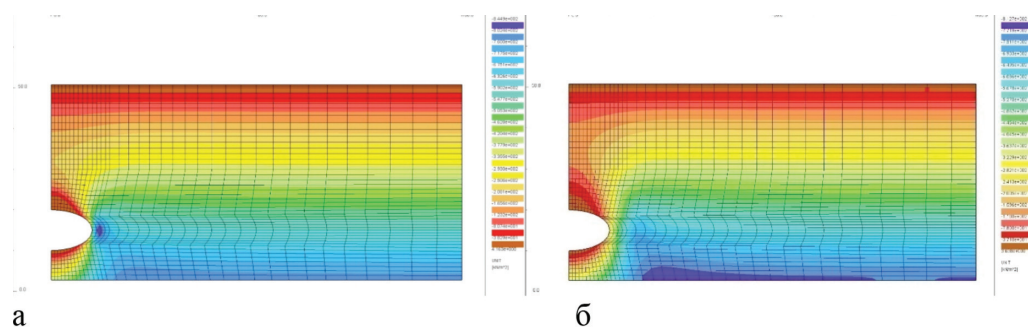


**Рис. 6.9. Этап 2. Зоны пластичности в модели Хоека–Брауна (а) и Друкера–Прагера (б)**

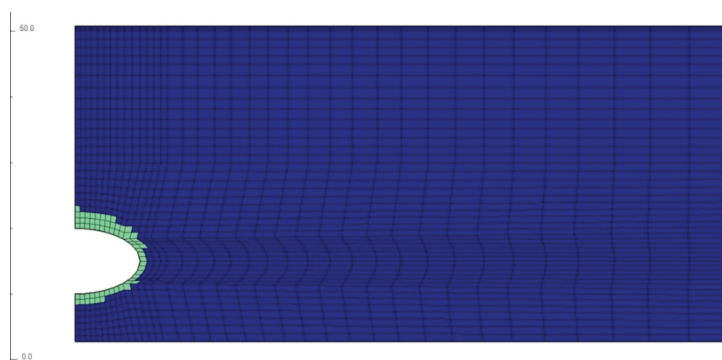


**Рис. 6.10. Этап 2. Горизонтальные смещения в модели Хоека–Брауна (а) и Друкера–Прагера (б)**

Как видно из рис. 6.9 и 6.12, появление ненагруженной полости (этап 2) и последующее её нагружение избыточным давлением (этап 3), равным примерно давлению от вышележащей толщи грунта ( $p \approx \lambda h$ ), характерно появление зоны пластичности. При этом следует обратить внимание, что вблизи свода полости прогнозируется более развитая зона пластичности, чем вблизи дна и боковых поверхностей.



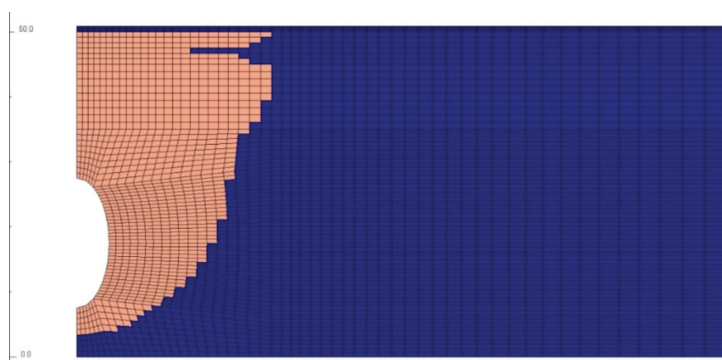
**Рис. 6.11. Этап 2. Вертикальная компонента напряжений в модели Хюека–Брауна (а) и Друкера–Прагера (б)**



**Рис. 6.12. Этап 3. Зона пластичности в модели Хюека–Брауна**

Рис. 6.9 и 6.10 иллюстрируют указанные выше недостатки идеально-упругопластической модели Друкера–Прагера.

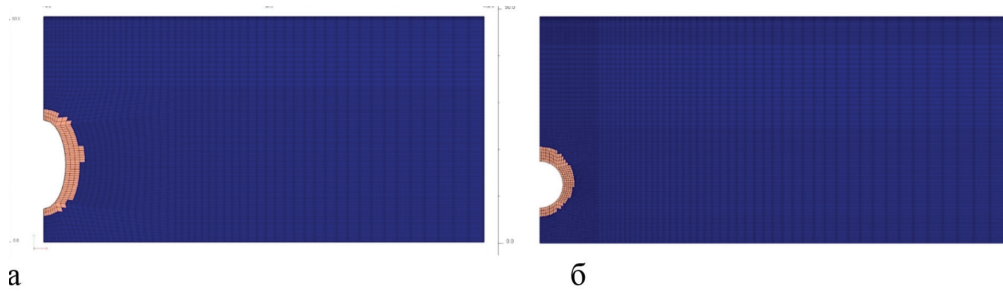
### 6.3.5. Вариант 2. Модель Хюека–Брауна, $a = 10 \text{ m}$ , $b = 20 \text{ m}$



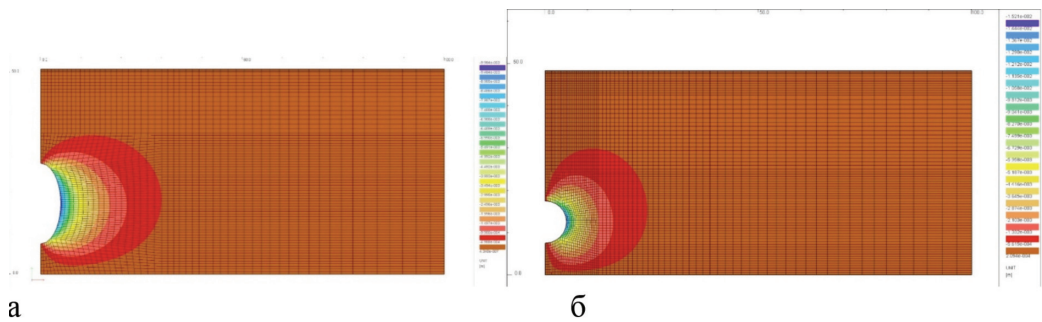
**Рис. 6.13. Этап 2. Зона пластичности**

Как видно из рис. 6.13, полость без избыточного давления на данной глубине и при заданных габаритах существовать не может. Поэтому в дальнейших расчётах полость и избыточное давление появляются одновременно, причём оно значительно выше атмосферного и было принято 12 атм. Ниже в графическом виде приводятся результаты таких расчётов.

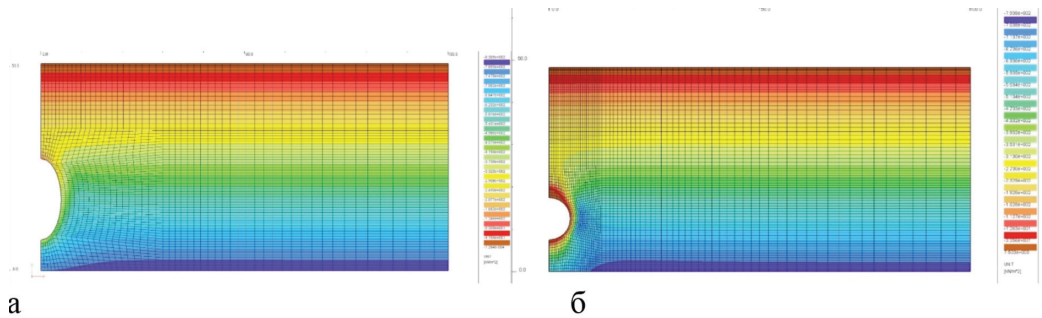
**6.3.5. Вариант 3. Модель Хоека–Брауна,  $a = 10 \text{ m}$ ,  $b = 20 \text{ m}$  и  $a = b = 10 \text{ m}$ , полость и избыточное давление появляются одновременно на этапе 2**



**Рис. 6.14. Этап 2. Зоны пластичности в модели Хоека–Брауна при  $2a = b$  (а) и  $a = b$  (б)**



**Рис. 6.15. Этап 2. Горизонтальные смещения в модели Хоека–Брауна при  $2a = b$  (а) и  $a = b$  (б)**



**Рис. 6.16. Этап 2. Вертикальная компонента напряжений в модели Хоека–Брауна при  $2a = b$  (а) и  $a = b$  (б)**

**6.4. Математическое моделирование движения флюида в многолетнемёрзлых породах**

Процессы фильтрации жидкости в пористых и трещиноватых средах играют важную роль, а их моделирование имеет многочисленные приложения на практике. Наиболее простой закон фильтрации был получен экспериментально Дарси [Darcy, 1856]. Позднее в работах [Бахвалов, Панасенко, 1984; Bensoussan, Lions, Papanicolaou, 1978] было дано теоретическое описание такого рода процессов, где материалы с периодической структурой исследовались с использованием методов асимптотического усреднения. Применение ме-

тода усреднения к описанию процессов фильтрации получило свое развитие в сравнительно недавних работах [Mei, Auriault, 1989; Auriault, 1991, 2002, 2005, 2009]. Пористые и трещиноватые материалы можно рассматривать как гетерогенные среды с множеством неоднородностей в виде пор и каналов. Очевидно, что рассмотрение каждой отдельной неоднородности не представляется возможным. Выход из этого затруднения состоит в том, чтобы моделировать реальный гетерогенный материал, заменяя его эффективной гомогенной средой, обладающей теми же макроскопическими свойствами и поведением при внешнем воздействии, что и реальный объект.

#### 6.4.1. Усреднение уравнений фильтрации Бринкмана

Фильтрацию вязкой ньютоновской жидкости сквозь пористую среду принято описывать законом Дарси, однако этот закон фильтрации имеет свои ограничения применимости. В работе [Rajagopal, 2007] приводится теоретический сделанный из общих принципов вывод иерархии приближений, используемых для описания течения жидкости в пористых средах. В частности, показано, что закон, полученный Дарси как обобщение экспериментальных результатов, может быть теоретически выведен при условии, что: 1) твёрдое тело абсолютно жёсткое (недеформируемое); 2) жидкость практически несжимаема; 3) течение стационарное и довольно медленное (чтобы можно было пренебречь нелинейными эффектами); 4) вязким трением в жидкости можно пренебречь; 5) единственное трение, которое учитывается, это трение между жидкостью и твёрдыми стенками пор.

Бринкман, желая получить более общую закономерность, предложил для описания процесса фильтрации вязкой ньютоновской жидкости сквозь пористую среду использовать уравнение, имеющее следующий вид [Brinkman, 1947 (1), 1947 (2), 1952]:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{V} - \frac{\mu}{k} \vec{V} = \nabla p, \quad (6.4.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (6.4.2)$$

где  $\vec{V}$  — вектор скорости жидкости;  $p$  — давление в жидкости;  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости;  $k(p)$  — коэффициент проницаемости пористой среды, зависящий от давления,  $\mu_{\text{эф}} = \bar{\mu}$  — эффективная (приведённая) динамическая вязкость флюида в пористой среде, которая также зависит от давления (и во многих случаях может считаться равной  $\mu$ ) [Auriault, 2009; Nealer, Nader, 1974; Popov, Efendiev, 2009].

Уравнение (6.4.1) определяется проницаемостью среды и является обобщением двух известных законов фильтрационного течения: Дарси и Стокса. Закон Дарси соответствует параметру  $\mu_{\text{эф}} = \bar{\mu}$  при установившемся течении, а течение Стокса соответствует свободному фильтрационному течению в абсолютно проницаемой среде, что соответствует случаю  $k(p) = \infty$ . Отметим, что в уравнении (6.4.1) давление  $p$  определяется с точностью до константы.

Заметим, что вывод уравнения Бринкмана был эвристическим, справедливость выполнения которого была строго показана в работах [Rajagopal, 2007; Tam, 1969; Childress, 1972] для сред с высокой пористостью, примерами которых могут служить песчаные грунты и песчаники.

Уравнение (6.4.2) представляет собой общеизвестное уравнение непрерывности при течении сжимаемого вещества (например, газа). Для жидкости, рассматриваемой в каче-

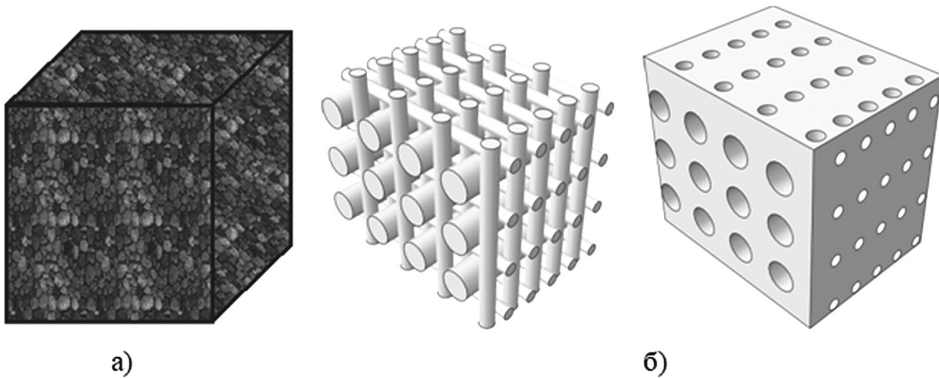


стве несжимаемого флюида с неизменной плотностью, это уравнение переходит в простую форму  $\text{div} \vec{V} = 0$ .

В общем случае уравнение (6.4.2) должно быть дополнено баротропным соотношением, связывающим между собой плотность и давление фильтрующегося флюида:

$$f(p, \rho) = 0. \quad (6.4.3)$$

Уравнения (6.4.1)–(6.4.3) являются связной моделью движения флюида в среде, пористость которой зависит от давления во флюиде. Механизм этой зависимости определяется тензором проницаемости  $k(p)$ , для нахождения которого необходимо привлечь структурную модель пористой среды, где происходит движение флюида. На рис. 6.17 показаны примеры таких моделей: модель системы ортогональных цилиндрических каналов и дисперсная модель сферических частиц, вне которых образованы фильтрующие каналы.



**Рис. 6.17. Структурная модель пористой среды:**  
**а — дисперсная модель сферических частиц; б — система ортогональных цилиндрических каналов, образующих поры**

Далее будем рассматривать несжимаемую жидкость. Выделим в гетерогенной пористой среде характерные масштабные уровни: глобальный (макро) уровень с характерным размером  $B$  и локальный (микро) уровень с характерным размером  $b$  так, чтобы на микроуровне среда характеризовалась периодической структурой. Введение малого параметра  $\varepsilon = b/B$  позволяет обезразмерить систему уравнений (6.4.1), (6.4.2). В этом случае система уравнений примет следующий вид:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{V} - \varepsilon^\lambda \frac{\mu}{k} \vec{V} - \nabla p = 0, \quad (6.4.4)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0. \quad (6.4.5)$$

Заметим, что коэффициенты обезразмеренного уравнения (6.4.1) могут зависеть от  $\varepsilon$ .

Для оценки показателя степени  $\lambda$  в уравнении (6.4.1) следует воспользоваться формулой Козени–Кармана [Ромм, 1985]:

$$k = m^3 / [c s_T^2 (1 - m)^2], \quad (6.4.6)$$

где  $m$  — пористость,  $c$  — постоянная Кармана,  $s_T$  — удельная поверхность.

Из анализа зависимости (6.4.6) получаем, что значения  $\lambda < -2$  соответствуют водопору; значения  $\lambda = -2, -1$  соответствуют поровому пространству, образованному либо системой каналов, либо системой (системами) трещин; значение  $\lambda = 0$  соответствует свободному течению. Заметим, что значения  $\lambda > 0$  недопустимы.

Будем рассматривать два принципиально разных случая течения жидкости в пористой среде.

Первый — это структурно неоднородные среды с переменными величинами  $\mu_{эф}$  и  $k$ , что соответствует включениям материала с разной проницаемостью. В этом случае на границе включений задаются естественные условия сопряжения, соответствующие непрерывности давления и нормальной составляющей скорости:

$$[p] = [V_n] = 0, \quad x \in \Sigma_\varepsilon. \quad (6.4.7)$$

Считаем, что в этом случае представительная ячейка материала имеет форму параллелепипеда и состоит из двух фаз материала с заданной геометрией и разной проницаемостью; в целом материал состоит из периодически повторяющейся ячейки.

Второй случай соответствует течению жидкости по закону Бринкмана в канале с непроницаемыми стенками или в среде с непроницаемыми частицами ( $k = 0$ ). Этот случай соответствует граничным условиям полного прилипания на границе непроницаемой среды:

$$\vec{V} = 0, \quad x \in \Sigma_\varepsilon. \quad (6.4.8)$$

Представительная ячейка материала в этом случае состоит из одной фазы материала с заданной проницаемостью и представляет собой перфорированную область параллелепипедной формы, которая периодически повторяется, образуя область течения жидкости.

Введем в соответствии с методом асимптотического усреднения две группы переменных — «быстрые» и «медленные», для описания процессов, действующих на масштабе с характерным размером  $b$  и  $B$ :

$$\xi = x/\varepsilon, \quad \varepsilon = b/B, \quad x = (x_1, x_2, x_3). \quad (6.4.9)$$

Далее решение уравнений (6.4.4), (6.4.5) будем искать в виде асимптотических разложений по функциям «быстрых» и «медленных» переменных; по быстрым переменным выполняется условие периодичности с периодом, равным  $b$ :

$$\vec{V}(x) = \vec{V}(x, \xi) = \sum_{l=0}^{\infty} \varepsilon^l \vec{V}^{(l)}(x, \xi); \quad (6.4.10)$$

$$p(x) = \hat{p}(x, \xi) = \sum_{l=0}^{\infty} \varepsilon^l p^{(l)}(x, \xi). \quad (6.4.11)$$

«Быстрые» и «медленные» переменные разделяются в процессе построения асимптотики решения с помощью формулы дифференцирования сложной функции:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} = \varepsilon^{-1} \frac{\partial}{\partial \xi_k} + D^k, \quad D^k = \frac{\partial}{\partial x_k}. \quad (6.4.12)$$

Таким образом, уравнения (6.4.4), (6.4.5) с учётом (6.4.10)–(6.4.12) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{V} - \varepsilon^\lambda \frac{\mu}{k} \vec{V} - \vec{\nabla} p = \sum_{l \geq 0} \varepsilon^{l-2} \left[ \mu_{\text{эф}} \nabla_\xi^2 \vec{V}^{(l)} - \frac{\mu}{k} \vec{V}^{(l-\lambda-2)} - \vec{\nabla}_\xi p^{(l-1)} + \right. \\ \left. + 2\mu_{\text{эф}} \left( \vec{\nabla}_\xi, \vec{\nabla} \right) \vec{V}^{(l-1)} - \vec{\nabla} p^{(l-2)} + \mu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{V}^{(l-2)} \right] = 0, \end{aligned}$$

Неизвестные функции  $\vec{V}^{(l)}(x, \xi)$  и  $p^{(l)}(x, \xi)$  определяются из условия независимости членов полученного асимптотического ряда от «быстрых» переменных и равенства нулю членов, соответствующих отрицательным степеням  $\varepsilon$ , а именно:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla_\xi^2 \vec{V}^{(l)} - \frac{\mu}{k} \vec{V}^{(l-\lambda-2)} - \vec{\nabla}_\xi p^{(l-1)} + 2\mu_{\text{эф}} \left( \vec{\nabla}_\xi, \vec{\nabla} \right) \vec{V}^{(l-1)} \quad (6.4.13)$$

$$- \vec{\nabla} p^{(l-2)} + \mu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{V}^{(l-2)} = H^{(l)}(x), \quad H^{(0)} = H^{(1)} = 0,$$

$$\operatorname{div}_\xi \vec{V}^{(l)} + \operatorname{div} \vec{V}^{(l-1)} = h^{(l)}(x), \quad h^{(0)} = 0. \quad (6.4.14)$$

Очевидно, что при условии  $\lambda < -2$  (а также в предельном случае  $k \rightarrow 0$ ) рекуррентные уравнения (6.4.13), (6.4.14) имеют тривиальное решение  $\vec{V}^{(l)}(x, \xi) \equiv 0$ ,  $p^{(l)}(x, \xi) \equiv \text{const}$ , что соответствует водоупору. В этом случае на границе течения ставится условие прилипания (6.4.8).

Отметим, что при  $\lambda < -2$  уравнение на ячейке (6.4.13) определяется законом фильтрации Бринкмана по «быстрым» переменным, при  $\lambda = -1$  и при  $\lambda = 0$  — законом течения Стокса.

Уравнения (6.4.13), (6.4.14) относятся к разным фазам материала, на границе раздела фаз (или на границе непроницаемой среды) условия сопряжения (6.4.7) или (6.4.8) реализуются в виде соотношений:

$$[V_n^{(l)}(x, \xi)] = 0 \text{ или } \vec{V}^{(l)}(x, \xi) = 0, \quad \xi \in \Sigma. \quad (6.4.15)$$

Рассмотрим уравнения, соответствующие отрицательным степеням  $\varepsilon$  в асимптотике. Разберём случай двухфазной среды с разной проницаемостью при  $\lambda = -1, 0$  и граничным условием (6.4.7) на границах фаз. Последовательно рассматриваем уравнения (6.4.13) при разных  $l$ ; уравнения при  $l = 0$  имеют вид:

$$H^{(0)} = \mu_{\text{эф}} \nabla_\xi^2 \vec{V}^{(0)} = 0,$$

$$h^{(0)} = \operatorname{div}_\xi \vec{V}^{(0)} = 0,$$

$$[V_n^{(0)}(x, \xi)] = 0, \quad \xi \in \Sigma.$$

Эти уравнения имеют только решение  $\vec{V}^{(0)}(x, \xi) = \vec{V}_0(x)$ , поэтому в этом случае главный член в асимптотике (6.4.10) не зависит от «быстрых» переменных.

Уравнения, соответствующие  $l = 1$  в (6.4.13):

$$H^{(1)} = \mu_{\text{эф}} \nabla_\xi^2 \vec{V}^{(1)} - \vec{\nabla}_\xi p^{(0)} - \delta_\lambda^{-1} \frac{\mu}{k} \vec{V}^{(0)} = 0,$$

$$\operatorname{div}_\xi \vec{V}^{(1)} = 0,$$

$$[p^{(0)}(x, \xi)] = [V_n^{(1)}(x, \xi)] = 0, \quad \xi \in \Sigma.$$

В случае  $\lambda = -1$  эти уравнения имеют нетривиальное решение:

$$\vec{V}^{(1)}(x, \xi) = N_{i_1}(\xi) D^i \vec{V}_0(x),$$

$$p^{(0)}(x, \xi) = p_0(x) + m_{i_1}(\xi) D^i \vec{V}_0(x),$$

где матрица-функция  $N_{i_1}(\xi)$  и вектор-строка  $m_{i_1}(\xi)$  удовлетворяют неоднородному уравнению Стокса:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla_{\xi}^2 N_{i_1}(\xi) - \nabla_{\xi}^{\text{r}} m_{i_1}(\xi) = E, \quad \langle m_{i_1}(\xi) \rangle = \langle N_{i_1}(\xi) \rangle = 0, \quad (6.4.16)$$

$$\text{div}_{\xi} N_{i_1}(\xi) = 0, \quad (6.4.17)$$

$$[m_{i_1}(\xi)] = [n N_{i_1}(\xi)] = 0, \quad \xi \in \Sigma. \quad (6.4.18)$$

Задача (6.4.16)–(6.4.18) имеет единственное решение в классе периодических функций. Условия нормировки (6.4.16) для  $N_{i_1}(\xi)$  и  $m_{i_1}(\xi)$  обеспечивают нужную нормировку асимптотических разложений (1.9), (1.10):

$$\langle \vec{V}(x, \xi) \rangle = \vec{V}_0(x), \quad \langle \hat{p}(x, \xi) \rangle = p_0(x), \quad (6.4.19)$$

и проясняют физический смысл функций «медленных» переменных  $\vec{V}_0(x)$  и  $p_0(x)$ , которые являются при нормировке (6.4.16) средней скоростью и средним давлением по объёму ячейки.

В случае  $\lambda = 0$  уравнения, соответствующие  $l = 1$ , имеют тривиальное решение при нормировке (6.4.19):

$$\vec{V}^{(1)}(x, \xi) = 0, \quad p^{(0)}(x, \xi) = p_0(x).$$

Отметим, что в остальных случаях, а именно:  $\lambda = -2$ , двухфазная среда с условием (6.4.7),  $\lambda = -2, -1, 0$ , однофазная среда с условием прилипания (6.4.8), — уравнения, соответствующие отрицательным степеням  $\varepsilon$ , имеют только тривиальное решение, определяющее одну функцию «медленной» переменной — давление.

$$\vec{V}^{(0)}(x, \xi) = \vec{V}^{(1)}(x, \xi) = 0, \quad p^{(0)}(x, \xi) = p_0(x). \quad (6.4.20)$$

Уравнения нулевого порядка ( $l = 2$ ) для двухфазной среды имеют вид:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{эф}} \nabla_{\xi}^2 \vec{V}^{(2)} - \nabla_{\xi}^{\text{r}} p^{(1)} + 2\mu_{\text{эф}} \left( \nabla_{\xi}^{\text{r}} \vec{V}^{(1)} - \nabla p^{(0)} \right) + \mu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{V}^{(0)} - \delta_{\lambda}^0 \frac{\mu}{k} \vec{V}^{(0)} &= H^{(2)}(x), \\ \text{div}_{\xi} \vec{V}^{(2)} + \text{div} \vec{V}^{(1)} &= h^{(2)}(x), \end{aligned}$$

и имеют нетривиальное решение:

$$[p^{(1)}(x, \xi)] = [V_n^{(2)}(x, \xi)] = 0, \quad \xi \in \Sigma,$$

$$\vec{V}^{(2)}(x, \xi) = N_{i_1 i_2}(\xi) D^{i_1 i_2} \vec{V}_0(x) + N_{00}(\xi) \vec{V}_0(x),$$

где матрицы-функции  $N_{i_1 i_2}(\xi)$  и вектор-строки  $m_{i_1 i_2}(\xi)$  определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{эф}} \nabla_{\xi}^2 N_{i i_2}(\xi) - \nabla_{\xi}^{\mathbf{r}} m_{i i_2}(\xi) + \mu_{\text{эф}} \delta_i^j E + 2\mu_{\text{эф}} \frac{\partial N_{i_2}(\xi)}{\partial \xi_i} - e_i^T m_{i_2}(\xi) = B_{i i_2}, \\ \langle m_{i i_2} \rangle = \langle N_{i i_2} \rangle = 0, \end{aligned} \quad (6.4.21)$$

$$\operatorname{div}_{\xi} N_{i i_2}(\xi) + e_i N_{i_2}(\xi) = 0, \quad (6.4.22)$$

$$[m_{i i_2}(\xi)] = [\mathbf{n}^T N_{i i_2}(\xi)] = 0, \quad \xi \in \Sigma. \quad (6.4.23)$$

Матрицы-функции  $N_{00}(\xi)$  и вектор-строки  $m_{00}(\xi)$  определяются следующими уравнениями:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla_{\xi}^2 N_{00}(\xi) - \nabla_{\xi}^{\mathbf{r}} m_{00}(\xi) - \frac{\mu}{k} \delta_{\lambda}^0 E = B_{00}, \quad \langle m_{00} \rangle = \langle N_{00} \rangle = 0, \quad (6.4.24)$$

$$\operatorname{div}_{\xi} N_{00}(\xi) = 0, \quad (6.4.25)$$

$$[m_{00}(\xi)] = [\mathbf{n}^T N_{00}(\xi)] = 0, \quad \xi \in \Sigma. \quad (6.4.26)$$

Здесь константные матрицы  $B_{i i_2}$  и  $B_{00}$  определяются однозначно из условий разрешимости сформулированных задач (6.4.21)–(6.4.26):

$$B_{i i_2} = \left\langle \mu_{\text{эф}} \delta_i^j E + 2\mu_{\text{эф}} \frac{\partial N_{i_2}(\xi)}{\partial \xi_i} \right\rangle, \quad B_{00} = -\delta_{\lambda}^0 \left\langle \frac{\mu}{k} \right\rangle E. \quad (6.4.27)$$

В разобранных выше случаях функции «медленных» переменных  $H^{(2)}(x)$  и  $h^{(1)}(x) = \operatorname{div} \vec{V}(x)$  определяют уравнения для неизвестных функций «медленных» переменных  $\vec{V}(x)$  и  $p_0(x)$ , входящих в асимптотику (6.4.10), (6.4.11), (6.4.19):

$$\operatorname{div} \vec{V}_0(x) = 0. \quad (6.4.29)$$

Вид уравнения (6.4.28) позволяет нам трактовать матрицу  $B_{i i_2}$  как эффективный тензор вязкости в гомогенной среде для усреднённых значений скорости и давления, а уравнения (6.4.28), (6.4.29) как усреднённые уравнения Бринкмана для эффективной пористой среды. В этом случае тензор эффективной вязкости находится нетривиальным образом по формуле (6.4.27) через решение задачи на ячейке (6.4.21)–(6.4.23).

Разберём случай двухфазной среды с разной проницаемостью при  $\lambda = -2$  и граничным условием (6.4.7). Уравнения, соответствующие отрицательным степеням  $\varepsilon^{-2}$  и  $\varepsilon^{-1}$ , имеют только тривиальное решение (6.4.20). Запишем уравнения (6.4.13) при  $l = 2$ , что соответствует члену нулевого порядка в разложении уравнений:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla_{\xi}^2 \vec{V}^{(2)} - \frac{\mu}{k} \vec{V}^{(2)} - \nabla_{\xi}^{\mathbf{r}} p^{(1)} - \nabla p_0 = H^{(2)}(x),$$

$$\operatorname{div}_{\xi} \vec{V}^{(2)} = h^{(2)}(x),$$

$$[p^{(1)}(x, \xi)] = [V_n^{(2)}(x, \xi)] = 0, \quad \xi \in \Sigma.$$

Эти уравнения имеют решение следующего вида в предположении, что  $H^{(2)}(x) = h^{(2)}(x) = 0$ :



$$\vec{V}^{(2)}(x, \xi) = -N(\xi) \vec{\nabla} p_0(x), \quad p^{(1)}(x, \xi) = -m(\xi) \vec{\nabla} p_0(x). \quad (6.4.30)$$

Матрицы-функции  $N(\xi)$  и вектор-строки  $m(\xi)$  определяются уравнениями:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla_{\xi}^2 N(\xi) - \frac{\mu}{k} N(\xi) - \vec{\nabla}_{\xi} m(\xi) + E = 0, \quad \langle m \rangle = 0, \quad (6.4.31)$$

$$\operatorname{div}_{\xi} N(\xi) = 0, \quad (6.4.32)$$

$$[m(\xi)] = [n N(\xi)] = 0, \quad \xi \in \Sigma. \quad (6.4.33)$$

Форма представления решения (6.4.20), (6.4.30) имеет вид закона фильтрации Дарси для функции средней скорости по объёму представительной ячейки (6.4.19):

$$\vec{V}_0(x) = \left\langle \vec{V}(x, \xi) \right\rangle, \quad \vec{V}_0(x) = -B \vec{\nabla} p_0(x), \quad B = \varepsilon^2 \langle N(\xi) \rangle; \quad (6.4.34)$$

здесь матрица  $B$  является эффективным тензором фильтрации в усреднённой гомогенной среде; она имеет порядок  $\varepsilon^2$  и вычисляется на основе решения задачи (6.4.31)–(6.4.33). Таким образом, вместо уравнения (6.4.28) для средней скорости получаем в рассматриваемом случае уравнение (6.4.34).

Уравнение для среднего давления  $p_0(x)$  формально получаем из рассмотрения функций  $\vec{V}^{(3)}(x, \xi)$  и  $p^{(3)}(x, \xi)$  в асимптотическом ряде (6.4.10), (6.4.11). Из условия разрешимости уравнения (6.4.14) при  $l = 3$  получаем, что  $h^{(3)}(x) = \operatorname{div}(-B \vec{\nabla} p_0(x))$ , это и есть усреднённое уравнение для неизвестной функции «медленной» переменной — давления:

$$\operatorname{div}(-B \vec{\nabla} p_0(x)) = 0. \quad (6.4.35)$$

В оставшемся неразобранном случае однофазной среды с условием прилипания (6.4.8) на границе течения решение имеет ту же самую форму (6.4.30), (6.4.34), (6.4.35); только несколько меняется уравнение на ячейке для определения функций «быстрых» переменных:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla_{\xi}^2 N(\xi) - \delta_{\lambda}^{-2} \frac{\mu}{k} N(\xi) - \vec{\nabla}_{\xi} m(\xi) + E = 0, \quad \langle m \rangle = 0, \quad (6.4.36)$$

$$\operatorname{div}_{\xi} N(\xi) = 0, \quad (6.4.37)$$

$$N(\xi) = 0, \quad \xi \in \Sigma. \quad (6.4.38)$$

Из дальнейшего анализа уравнений (6.4.13) вытекает, что в самом общем случае члены асимптотического ряда  $\vec{V}^{(i)}(x, \xi)$  и  $p^{(i)}(x, \xi)$  определяются двумя функциями «медленных» переменных (6.4.19), трактуемыми как средние по объёму представительной ячейки скорость  $\vec{V}_0(x)$  и давление  $p_0(x)$ , и имеют следующий вид:

$$\vec{V}^{(l)}(x, \xi) = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_l} \left[ N_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi) D^{i_1, i_2, \dots, i_l} \vec{V}_0(x) + M_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi) D^{i_1, i_2, \dots, i_l} p_0(x) \right], \quad (6.4.39)$$

$$p^{(l)}(x, \xi) = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_l} \left[ m_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi) D^{i_1, i_2, \dots, i_l} \vec{V}_0(x) + n_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi) D^{i_1, i_2, \dots, i_l} p_0(x) \right], \quad (6.4.40)$$

где  $N_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi)$  — матрица-функция;  $M_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi)$  — вектор-столбец;  $m_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi)$  — вектор-строка;  $n_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi)$  — скалярная функция; пределы изменения индексов:  $0 \leq i_l \leq 3$ ;  $D^{i_1, i_2, \dots, i_l} = D^{i_1} D^{i_2} \dots D^{i_l}$ ,  $D^0 f(x) = f(x)$ .

Процедура асимптотического усреднения позволяет построить полное разложение в ряд для определения скорости и давления и сформулировать усреднённые уравнения для функций «медленных» переменных (6.4.19).

#### 6.4.2. Аналитические решения для системы трещин и цилиндрических каналов

Будем предполагать, что течение жидкости (в цилиндрических каналах или в трещиноватой среде) описывается уравнением Бринкмана:

$$\mu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{V} - \alpha \vec{V} = \vec{\nabla} p, \quad \mu_{\text{эф}} = C\mu, \quad \alpha = \frac{\mu}{k}, \quad (6.4.41)$$

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0, \quad \vec{V}|_{\Sigma} = 0. \quad (6.4.42)$$

Рассмотрим три типа течений при  $\vec{\nabla} p = -1$ : а) в цилиндрических каналах,  $V_z = V_z(r)$ ,  $V_z(R) = 0$ ; б) в плоскопараллельной трещине шириной  $2l$ ,  $V_z = V_z(x)$ ,  $V_z(\pm l) = 0$ ; в) модель сферических частиц (рис. 6.4.1). В первых двух случаях решение задачи может быть получено в явном аналитическом виде, и на основе этого решения может быть вычислена проницаемость среды Бринкмана  $k_a = \mu \langle V_z \rangle$  согласно методике асимптотического усреднения, изложенной выше. В результате были получены следующие зависимости.

В цилиндрических каналах радиуса:

$$V_z(r) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{I_0(\sqrt{\alpha/\mu_{\text{эф}}} r)}{I_0(\sqrt{\alpha/\mu_{\text{эф}}} R)} \right], \quad (6.4.43)$$

$$k_a = \pi R^2 \frac{\mu}{\alpha} \frac{I_2(\sqrt{\alpha/\mu_{\text{эф}}} R)}{I_0(\sqrt{\alpha/\mu_{\text{эф}}} R)} = \frac{\mu}{\mu_{\text{эф}}} \frac{\pi R^4}{8} + O(\alpha), \quad (6.4.44)$$

где  $I_p(z)$  — модифицированные функции Бесселя первого рода.

В трещиноватой среде с полушириной раскрытия трещины:

$$V_z(x) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha/\mu_{\text{эф}}} x)}{\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha/\mu_{\text{эф}}} l)} \right], \quad (6.4.45)$$

$$k_a = 2l \frac{\mu}{\alpha} \left[ 1 - \frac{\operatorname{th}(\sqrt{\alpha/\mu_{\text{эф}}} l)}{\sqrt{\alpha/\mu_{\text{эф}}}} \right] = \frac{\mu}{\mu_{\text{эф}}} \frac{2l^3}{3} + O(\alpha). \quad (6.4.46)$$

Полученные решения обуславливают следующие (известные) зависимости коэффициента проницаемости для предельного случая  $\alpha = 0$  — свободного фильтрационного течения жидкости по закону Стокса ( $\mu_{\text{эф}} = \mu$ ):

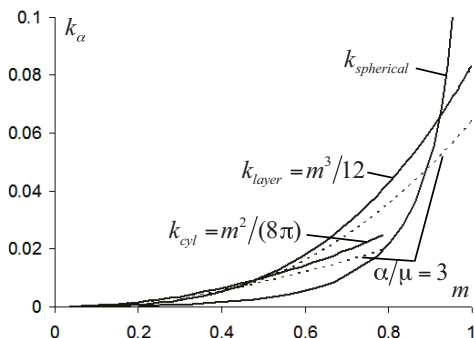
$$k_{\text{цил}} = \frac{m^2}{8\pi}, \quad k_{\text{трещ}} = \frac{m^3}{12}, \quad (2.7)$$

где  $m$  — пористость среды (относительный объём пор).

Также по вышеизложенной методике асимптотического усреднения определялась проницаемость среды Бринкмана для модели сферических частиц, согласно которой эффективная проницаемость определяется из решения задачи на ячейке по обтеканию сферической частицы с эффективным радиусом, определяемым радиусом частицы  $r$  и льдистостью  $i_i$ , помещённой в кубическую ячейку размера  $A$  с периодическими условиями на противоположных гранях.

В этой модели общая пористость фильтрующего пространства  $m = 1 - c_0 - i_i$ , где  $c_0$  — объёмное содержание частиц,  $i_i$  — льдистость. При условии регулярного (периодического) расположения частиц, имеющих сферическую форму,  $c_0$  вычисляется через их радиус  $r$  и размер ячейки, который равен расстоянию между частицами  $A$ :  $c_0 = 4\pi/3(r/A)^3$ . Максимальную льдистость, при которой возможна фильтрация, можно оценить как  $i_i = 4\pi/3(1/8 - (r/A)^3)$  или же через объёмное содержание частиц  $i_i = \pi/3(1/2 - (3/A)c_0)$ . В модели дисперсных сферических частиц при отсутствии льда общая пористость  $m = 1 - c_0$ . В этом случае при периодическом расположении частиц, имеющих сферическую форму, относительный радиус и пористость, зависящая от давления, связаны соотношением  $r/A = (3/4\pi(1 - m(p)))^{1/3}$ .

На рис. 6.18 приведена зависимость проницаемости  $k$  от пористости  $m$  для среды фильтрации Стокса и Бринкмана. Графики для проницаемости при фильтрации по закону Бринкмана  $k_\alpha$  даны штриховой линией при  $\alpha = 3\mu$  и  $\mu_{эф} = \mu$ . Помимо этого, сплошной линией даны графики для проницаемости при фильтрации по закону Стокса; рассмотрены случаи пористой среды с цилиндрическими порами  $k_{cyl}$ , трещиноватой среды  $k_{layer}$  и для среды со сферическими частицами.



**Рис. 6.18. Проницаемость в пористой и трещиноватой среде**

Следует отметить, что в рассматриваемых моделях важным, определяющим моментом является зависимость проницаемости  $m(p)$  от давления, которая реализуется через задачу о зависимости относительного радиуса пор или сферических частичек от порового давления. Эта зависимость находится на основе решения упругопластической задачи, приведённой в работе [Кристенсен, 1982].

### 6.5. Усреднение нестационарных уравнений фильтрации вязкого флюида в недеформируемой пористой среде

В этом параграфе рассматривается задача нестационарной фильтрации несжимаемого и сжимаемого баротропного флюида в недеформируемой пористой среде.

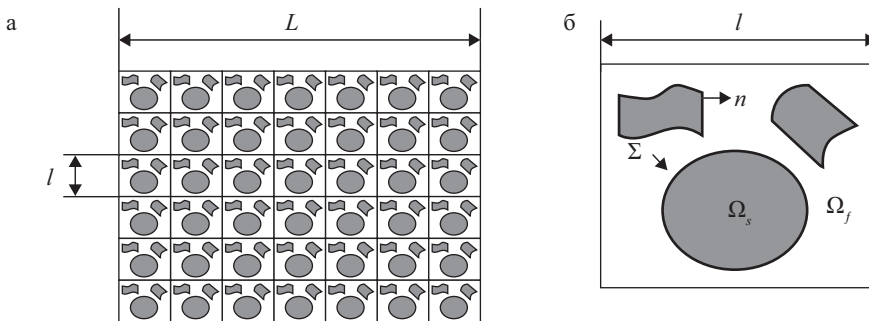
Одна из трудностей, с которыми приходится сталкиваться при описании просачивания флюида сквозь твёрдую матрицу, состоит в том, что ввиду существенной неоднородности

фильтрующих материалов проницаемость среды может существенно меняться от точки к точке, что делает задачу чрезмерно трудоёмкой с точки зрения её численной реализации. Возможный выход из этого затруднения состоит в использовании процедур усреднения, позволяющих при выполнении условий их применимости моделировать реальный гетерогенный материал, заменяя его эффективной гомогенной средой, обладающей теми же макроскопическими свойствами и поведением при внешнем воздействии, что и реальный объект.

Условием применимости метода асимптотического усреднения является выполнение условия пространственного разделения масштабов [Бахвалов, Панасенко, 1984; Санчес-Паленсия, 1984; Auriault, 1991], выражаемого соотношением  $l/L = \varepsilon \ll 1$ , в котором  $l$  — характерный размер типового элемента структуры, а  $L$  — характерный макроскопический размер.

В периодических средах типовой элемент структуры буквально представляет собой не что иное, как ячейку периодичности. Возможность выделения типового элемента структуры крайне существенна для применения метода усреднения. Отметим, что реальные пористые среды редко бывают строго упорядоченными по своей структуре. Однако, как это было показано в [Auriault, 1980; Quintard, Whitaker, 1993; Власов, Мёрзляков, 2009], в случаях, когда условие пространственного разделения масштабов выполняется, существует значительное сходство в поведении реальных материалов и их эффективных моделей, основанных на допущении о периодически упорядоченном пространственном распределении пор.

Положим, что в пористой среде можно выделить следующие масштабные уровни: макроуровень с характерным размером  $L$  и микроуровень с характерным размером  $l$ . Также будем считать, что на микроуровне среда характеризуется периодической структурой с периодом  $l$ . Будем рассматривать фильтрацию вязкого вещества сквозь жёсткую матрицу в пределах ячейки периодичности  $\Omega$  с характерным размером  $O(l)$  (рис. 6.19). Обозначим границу ячейки периодичности, её часть, занятую твёрдым телом  $\Omega_s$ , часть занятую жидкостью  $\Omega_f$ , и границу раздела твёрдое тело–жидкость в пределах ячейки периодичности  $\Sigma$ .



**Рис. 6.19. Характерные масштабные уровни  $L$  и  $l$ :**  
**а — пористая среда с характерным размером  $L$ ; б — ячейка периодичности с характерным размером  $l$**

Далее будут рассматриваться задачи о нестационарной фильтрации несжимаемого и сжимаемого баротропного вязкого флюида в недеформируемой пористой среде. Сначала обсудим выбор определяющих соотношений для каждого из этих двух случаев. Проведя процедуру двухмасштабного усреднения предварительно обезразмеренных уравнений, получим усреднённые макроскопические задачи, решениями которых являются пространственные распределения давления и скорости фильтрующегося вещества в эффективной

среде. Компоненты тензора проницаемости эффективной среды будут определены в результате усреднения решений локальных задач на ячейке периодичности, которые будут получены в процессе усреднения уравнений. Решение задач на ячейке в общем случае следует искать с использованием численных методов интегрирования соответствующей системы дифференциальных уравнений в частных производных. В одномерном случае для среды с порами цилиндрической формы оказалось возможным решить эту задачу аналитически, а в трёхмерном случае со сферическими включениями — численно-аналитически. Далее будут приведены результаты исследования влияния на решения различных видов зависимостей коэффициентов вязкости и трения от давления, а также различных видов баротропных соотношений. И в заключение будут сделаны выводы.

### 6.5.1. Выбор определяющих соотношений

В данной работе не ставилось цели выводить уравнения движения, описывающие фильтрационное течение вещества сквозь жёсткую пористую матрицу, из основных принципов. Мы ограничимся довольно сжатым изложением материала, однако приведём ссылку на работу [Rajagopal, 2007], где этот вывод представлен подробно.

Закон сохранения момента импульса может быть записан в виде:

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + F_i + \rho f_i = \rho \left( \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right), \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (6.5.1)$$

где  $T_{ij}$  — тензор напряжений Коши;  $\rho$  — плотность;  $x_i$  — координаты, ( $i = 1, 2, 3$ );  $t$  — время;  $V_i$  —  $i$ -я компонента вектора скорости;  $f_i$  —  $i$ -я компонента объёмной силы;  $F_i$  —  $i$ -я компонента силы взаимодействия.

Вообще говоря, существуют различные механизмы взаимодействий [Rajagopal, 2007], однако в данной работе будем предполагать, что взаимодействия обусловлены главным образом силами трения между порами и фильтрующимся веществом:

$$F_i = -\alpha(p)V_i, \quad (6.5.2)$$

где  $\alpha(p)$  — коэффициент трения, который в общем случае зависит от давления  $p$ .

Входящие в уравнение (6.5.1) компоненты тензора напряжений имеют вид:

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda(p)D_{ii}\delta_{ij} + 2\mu(p)D_{ij}. \quad (6.5.3)$$

Здесь  $D_{ij} = 1/2(\partial V_i/\partial x_j + \partial V_j/\partial x_i)$ ,  $D_{ii} = D_{11} + D_{22} + D_{33}$ ,  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера,  $\mu(p)$  — динамическая вязкость. Величина  $(\lambda + 2/3\mu)$  известна как объёмная вязкость, являющаяся коэффициентом пропорциональности между средней величиной нормального вязкостного напряжения и скоростью изменения объёма.

Такие величины, как плотность, вязкость, коэффициент трения, вообще говоря, не являются константами. Так, например, соотношение между давлением и плотностью жидкости хорошо описывается эмпирической формулой Доусона и Хиггинсона [Dowson, Higginson, 1977]. Зависимость вязкости от давления обсуждалась уже давно, о чём свидетельствует монография [Bridgman, 1959], а также публикации [Barus, 1893; Bair, Kottke, 2003; Kannan, Rajagopal, 2008, 2011; Nakshatrala], в которых дискутировалась важность учёта зависимости вязкости от давления для широкого спектра проблем, связанных с течением жидкостей. Эксперименты [Barus, 1893] подтверждают сильную (экспоненциальную) зависимость вязкости от давления:



$$\mu(p) = \mu_0 \exp(\beta p), \quad (6.5.4)$$

где  $\mu_0 > 0$  и  $\beta \geq 0$  — константы. Это выражение ведёт к аналогам формулы (6.5.4) для коэффициентов  $\alpha(p)$  и  $\lambda(p)$ :

$$\begin{aligned} \alpha(p) &= \alpha_0 \exp(\beta p), \quad \alpha_0 \geq 0, \\ \lambda(p) &= \lambda_0 \exp(\beta p), \quad \lambda_0 \geq 0. \end{aligned} \quad (6.5.5)$$

Подставим (6.5.2), (6.5.3) в (6.5.1) и затем, пренебрегая объёмными силами, получим уравнение движения фильтрующегося вещества в виде

$$-\nabla p + \mu(p) \nabla^2 \vec{V} + (\lambda(p) + \mu(p)) \nabla \operatorname{div} \vec{V} - \alpha(p) \vec{V} = \rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right). \quad (6.5.6)$$

Это уравнение представляет собой обобщение уравнения Навье–Стокса–Бринкмана [Brinkman, 1947 (1), 1947 (2), 1952; Auriault, 2009] на случай возможного нестационарного течения, при котором учитываются также нелинейные эффекты, связанные с зависимостью коэффициентов вязкости и трения от давления.

В случае фильтрации сжимаемого баротропного вязкого вещества уравнение движения (6.5.6) должно быть дополнено уравнением неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (6.5.7)$$

граничным условием прилипания:

$$\vec{V}|_G = 0 \quad (6.5.8)$$

и баротропным соотношением:

$$f(p, \rho) = 0. \quad (6.5.9)$$

Введём следующие безразмерные величины: число Рейнольдса:

$$\operatorname{Re} = \left| \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right| / \left| \mu \nabla^2 \vec{V} \right|,$$

нестационарное число Рейнольдса:

$$\operatorname{Rt} = \left| \rho \partial \vec{V} / \partial t \right| / \left| \mu \nabla^2 \vec{V} \right|,$$

число Струхала:

$$S = \left| \partial \rho / \partial t \right| / \left| \operatorname{div}(\rho \vec{V}) \right| = \left| \rho \partial \vec{V} / \partial t \right| / \left| \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right| = \frac{\operatorname{Rt}}{\operatorname{Re}},$$

а также величины:

$$Q = \left| \nabla p \right| / \left| \mu \nabla^2 \vec{V} \right| \text{ и } B = \left| \alpha \vec{V} \right| / \left| \mu \nabla^2 \vec{V} \right|.$$

Полагая,

$$\begin{aligned} x_i &= l_c x_i^*, \quad p = p_c p^*, \quad V_i = V_c V_i^*, \quad t = t_c t^*, \\ \mu &= \mu_c \mu^*, \quad \alpha = \alpha_c \alpha^*, \quad \lambda = \lambda_c \lambda^*, \quad \rho = \rho_c \rho^*, \end{aligned} \quad (6.5.10)$$

проведём обезразмеривание исходных уравнений (6.5.6)–(6.5.9) в предположении, что  $\operatorname{Re} = O(1)$ ,  $\operatorname{Rt} = O(1)$ ,  $S = O(1)$ ,  $Q = O(\varepsilon^2)$ ,  $B = O(\varepsilon^2)$ ,  $\varepsilon = l_c / L_c \ll 1$ .

Отбросим знак «\*» и получим систему обезразмеренных уравнений в виде:

$$-\nabla p + \varepsilon^2 \mu \nabla^2 \vec{V} + \varepsilon^2 (\lambda + \mu) \nabla \operatorname{div} \vec{V} - \alpha \vec{V} = \varepsilon^2 \rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right), \quad (6.5.11)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}_x (\rho \vec{V}) = 0, \quad (6.5.12)$$

$$v|_G = 0, \quad (6.5.13)$$

$$f(p, \rho) = 0. \quad (6.5.14)$$

Для решения обезразмеренной задачи (6.5.11)–(6.5.14) применим метод асимптотического усреднения [Bensoussan, Lions, Papanicolaou, 1978; Бахвалов, Панасенко, 1984; Санчес-Паленсия, 1984; Auriault, 2002].

### 6.5.2. Процедура двухмасштабного усреднения

Выделим два характерных пространственных масштаба: макроуровень с характерным размером  $L$  и микроуровень с характерным размером  $l$ , причём (рис. 6.19). Будем считать, что на микроуровне среда обладает периодической структурой с характерным размером ячейки периодичности  $O(l)$  и характеризуется координатами  $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3\}$ , которые описывают процессы локально. На макроуровне среду будем описывать с помощью координат  $x = \{x_1, x_2, x_3\}$ , характеризующих процессы глобально. Таким образом, любая величина, входящая в (6.5.11)–(6.5.14) и зависящая от координат, будет функцией локальных переменных  $\xi$  и глобальных переменных  $x$ . Тогда связь между глобальными и локальными координатами будет следующей:

$$x = \varepsilon \xi, \text{ где } \varepsilon = l/L, \quad (6.5.15)$$

где  $\varepsilon$  представляет собой малый параметр.

В рамках метода асимптотического усреднения решения задачи (6.5.10)–(6.5.12) будем искать в виде разложений в ряд по малому параметру  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned} p &= p^{(0)} + \varepsilon p^{(1)} + \varepsilon^2 p^{(2)} + \dots \\ V_i &= V_i^{(0)} + \varepsilon V_i^{(1)} + \varepsilon^2 V_i^{(2)} + \dots \\ \rho &= \rho^{(0)} + \varepsilon \rho^{(1)} + \varepsilon^2 \rho^{(2)} + \dots, \end{aligned} \quad (6.5.16)$$

где слагаемые предполагаются функциями, периодическими по локальной переменной  $\xi$ .

Коэффициенты уравнения Навье–Стокса–Бринкмана, характеризующие фильтрационные свойства жидкости в среде, также можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \mu(p) &= \mu^{(0)}(p^{(0)}) + O(\varepsilon), \\ \alpha(p) &= \alpha^{(0)}(p^{(0)}) + O(\varepsilon), \\ \lambda(p) &= \lambda^{(0)}(p^{(0)}) + O(\varepsilon). \end{aligned} \quad (6.5.17)$$

Подставляя разложения (6.5.16)–(6.5.17) в соотношения (6.5.11)–(6.5.14) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях малого параметра  $\varepsilon$ , получим рекуррентную цепочку уравнений, при  $\varepsilon^{-1}$ :

$$\frac{\partial p^{(0)}}{\partial \xi_i} = 0, \quad (6.5.18)$$

$$\frac{\partial(\rho^{(0)}V_i^{(0)})}{\partial \xi_i} = 0, \quad (6.5.19)$$

$$V_i^{(0)}|_G = 0, \quad (6.5.20)$$

$$f(\rho^{(0)}, p^{(0)}) = 0, \quad (6.5.21)$$

при  $\varepsilon^0$ :

$$\mu^{(0)} \frac{\partial^2 V_i^{(0)}}{\partial \xi_j \partial \xi_j} + \mu^{(0)} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( \frac{\partial V_j^{(0)}}{\partial \xi_j} \right) + \lambda^{(0)} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( \frac{\partial V_j^{(0)}}{\partial \xi_j} \right) - \left( \frac{\partial p^{(0)}}{\partial x_i} + \frac{\partial p^{(1)}}{\partial \xi_i} \right) - \alpha^{(0)} V_i^{(0)} = 0, \quad (6.5.22)$$

$$\frac{\partial \rho^{(0)}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho^{(0)}V_i^{(0)})}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho^{(0)}V_i^{(0)} + \rho^{(1)}V_i^{(0)})}{\partial \xi_i} = 0, \quad (6.5.23)$$

$$V_i^{(1)}|_G = 0, \quad (6.5.24)$$

$$p^{(1)} \left( \frac{\partial f}{\partial p} \right)^{(0)} + \rho^{(1)} \left( \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)^{(0)} = 0 \quad (6.5.25)$$

и т.д.

Из соотношений (6.5.18), (6.5.21) следует, что величины  $p^{(0)}$ ,  $\rho^{(0)}$ ,  $\mu^{(0)}$ ,  $\lambda^{(0)}$ ,  $\alpha^{(0)}$ , не зависят от локальных координат:

$$\begin{aligned} p^{(0)} &= p^{(0)}(x, t), \quad \rho^{(0)} = \rho^{(0)}(x, t), \\ \mu^{(0)} &= \mu^{(0)}(x, t), \quad \lambda^{(0)} = \lambda^{(0)}(x, t), \quad \alpha^{(0)} = \alpha^{(0)}(x, t). \end{aligned} \quad (6.5.26)$$

С учётом (6.5.26) можно записать соотношения (6.5.22) и (6.5.19) в виде:

$$\mu^{(0)} \frac{\partial^2 V_i^{(0)}}{\partial \xi_j \partial \xi_j} - \left( \frac{\partial p^{(0)}}{\partial x_i} + \frac{\partial p^{(1)}}{\partial \xi_i} \right) - \alpha^{(0)} V_i^{(0)} = 0, \quad (6.5.27)$$

$$\frac{\partial V_i^{(0)}}{\partial \xi_i} = 0. \quad (6.5.28)$$

Решение задачи (6.5.26), (6.5.27), (6.5.20) будем искать в виде:

$$V_i^{(0)} = -N_{ij} \frac{\partial p^{(0)}}{\partial x_j}, \quad N_{ij} = k_{ij} / \mu^{(0)}(p^{(0)}), \quad (6.5.29)$$

$$p^{(1)} = -Q_j \frac{\partial p^{(0)}}{\partial x_j}, \quad (6.5.30)$$

где величины  $N_{ij}$ ,  $Q_j$  — периодические функции переменной  $\xi$ , причём  $\langle Q_j \rangle = 0$  ввиду  $\xi$ -периодичности  $p^{(1)}$ .

Определим процедуру усреднения по ячейке периодичности в виде:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{V_\Omega} \int_{\Omega_f} f dV, \quad (6.5.31)$$

где  $\Omega$  обозначает ячейку периодичности объёмом  $V_\Omega$ , а  $\Omega_f$  — её часть, занятую жидкостью.

Подстановка соотношений (6.5.29), (6.5.30) в систему уравнений (6.5.26), (6.5.27), (6.5.20) приводит к задаче на ячейке периодичности в виде:

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \xi_i} - \mu(p^{(0)}) \frac{\partial^2 N_{ij}}{\partial \xi_i \partial \xi_j} + \alpha^{(0)} N_{ij} = \delta_{ij}, \quad (6.5.32)$$

$$\frac{\partial N_{ij}}{\partial \xi_i} = 0, \quad (6.5.33)$$

$$N_{ij}|_G = 0, \quad (6.5.34)$$

где  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Задача (6.5.32)–(6.5.34) является задачей с периодическими условиями на границах ячейки. Рассматривая  $p^{(0)}$  как параметр, мы можем решать задачу на ячейке и определять величины  $N_{ij}$ ,  $Q_j$ .

Обратимся теперь к макроскопическому описанию процесса фильтрации. Для этого подставим выражения (6.5.29)–(6.5.30) в соотношения (6.5.23)–(6.5.24), (6.5.21) и проведём усреднение по ячейке периодичности в соответствии с (6.5.31). Учитывая (6.5.26), а также принимая во внимание -периодичность функций  $\dot{V}^{(1)}$ ,  $p^{(0)}$ , получим усредненную **макроскопическую задачу** в виде:

$$\begin{aligned} m \frac{\partial \rho^{(0)}}{\partial t} + \operatorname{div}_x \left( \rho^{(0)} \langle \dot{V}^{(0)} \rangle \right) &= 0, \\ \langle V_i^{(0)} \rangle &= - \left\langle N_{ij} \left( p^{(0)} \right) \right\rangle \frac{\partial p^{(0)}}{\partial x_j}, \\ f \left( \rho^{(0)}, p^{(0)} \right) &= 0, \end{aligned} \quad (6.5.35)$$

где  $m$  — пористость;  $\langle N_{ij}(p^{(0)}) \rangle$  — тензор, компоненты которого связаны с компонентами эффективного тензора проницаемости  $\langle k \rangle$  посредством соотношений  $\langle k_{ij} \rangle = \langle N_{ij}(p^{(0)}) \rangle \mu^{(0)}(p^{(0)})$ . Для определения  $\langle N_{ij}(p^{(0)}) \rangle$  требуется, решив задачу на ячейке (6.5.32)–(6.5.34), получить  $N_{ij}(p^{(0)})$ , а затем применить к полученным процедуру усреднения в соответствии с (6.5.33). Вид зависимости коэффициентов вязкости и трения от давления будет влиять на величины  $\langle N_{ij}(p^{(0)}) \rangle$  и  $\langle k_{ij} \rangle$ .

Заметим, что макроскопическое распределение скорости определяется соотношением, сходным по своему виду с хорошо известным законом фильтрации Дарси [Darcy, 1856]. При этом компоненты эффективного тензора проницаемости, входящие в это соотношение, вычисляются в результате решения системы уравнений (6.5.32)–(6.5.34), первое из которых является уравнением Бринкмана [Brinkman, 1947 (1), 1947 (2); Auriault, 2009; Саваторова, Талонов, Власов, 2010; Savatorova, Rajagopal, 2011].

Возвращаясь к размерным переменным, перепишем (6.5.35) в виде:

$$\begin{aligned} m \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \left( \rho \langle \dot{V} \rangle \right) &= O(\varepsilon) \\ \langle V_i \rangle &= - \frac{K_{ij}^{eff}}{\mu(p)} \frac{\partial p}{\partial x_j} + O(\varepsilon), \quad K_{ij}^{eff} = l_c^2 \langle k_{ij} \rangle \\ f(p, \rho) &= O(\varepsilon). \end{aligned} \quad (6.5.36)$$

Пренебрегая в (6.5.36) членами порядка  $O(\varepsilon)$ , получаем задачу, соответствующую задаче теории эффективного модуля. Выбрав вид барометрического соотношения и проинтегрировав уравнения (6.5.36), можно получить макроскопическое распределение дав-

ления фильтрующегося вещества. Это давление, в свою очередь, может быть использовано для определения макроскопического распределения скорости в соответствии со вторым уравнением системы (6.5.36). Но вначале следует найти компоненты эффективного тензора проницаемости путём решения задачи на ячейке (6.5.32)–(6.5.34) и последующего усреднения решений для  $N_{ij}$ .

### 6.5.3. Решение задачи на ячейке с цилиндрическими каналами (одномерный случай)

В качестве примера рассмотрим случай фильтрации вязкого вещества сквозь среду, представляющую собой периодическую систему цилиндрических каналов в жёсткой матрице. Предположим, что каналы характеризуются радиусом  $R$  и ориентированы вдоль одной из координатных осей. Будем считать, что каждый объём ячейки периодичности мал по сравнению с глобальным характеристическим размером среды  $L$ .

Предположим, что каналы ориентированы вдоль оси  $x_3$ . Тогда получим, что линии тока параллельны той же самой оси, и для скорости будет справедливо выражение

$$\mathbf{V}^{(0)} = \{0, 0, V_3^{(0)}\}. \quad (6.5.37)$$

Учитывая это выражение для вектора скорости, из соотношения (6.5.29) следует, что

$$N_{1j} = N_{2j} = 0, \quad j = 1, 2, 3. \quad (6.5.38)$$

Далее, пользуясь условием (6.5.33), получим

$$N_{3j} = N_{3j}(\xi_1, \xi_2), \quad j = 1, 2, 3. \quad (6.5.39)$$

Подстановка (6.5.39) в (6.5.32) приводит к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_1}{\partial \xi_3} - \mu(p^{(0)}) \nabla_{\xi\xi}^2 N_{31} + \alpha^{(0)} N_{31} &= 0, \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \xi_3} - \mu(p^{(0)}) \nabla_{\xi\xi}^2 N_{32} + \alpha^{(0)} N_{32} &= 0, \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \xi_3} - \mu(p^{(0)}) \nabla_{\xi\xi}^2 N_{33} + \alpha^{(0)} N_{33} &= 1. \end{aligned} \quad (6.5.40)$$

Из (6.5.39), (6.5.40) следует, что  $\partial Q_j / \partial \xi_3 = \text{const}$  ( $j = 1, 2, 3$ ). Функции  $Q_j$  должны быть периодическими на ячейке, поэтому  $C_j(\xi_3) = \text{const} \cdot \xi_3$ . Наконец, требование  $\langle p^{(1)} \rangle = 0$  может быть удовлетворено, если принять  $\text{const}$  нулевыми. Откуда получаем, что  $C_j(\xi_3) = 0$ ,  $j = 1, 2, 3$ . Таким образом, задача на ячейке (6.5.32)–(6.5.34) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \mu(p^{(0)}) \nabla_{\xi\xi}^2 N_{3j} - \alpha^{(0)} N_{3j} &= 0, \\ \mu(p^{(0)}) \nabla_{\xi\xi}^2 N_{33} - \alpha^{(0)} N_{33} + 1 &= 0, \\ N_{3j}|_G &= 0, \quad N_{33}|_G = 0, \end{aligned} \quad (6.5.41)$$

где  $j = 1, 2$ .

Чтобы найти  $N_{3j}$  ( $j = 1, 2, 3$ ), перейдём к полярной системе координат и потребуем, чтобы функции  $N_{3j}(r)$  ( $0 \leq r \leq R$ ) были ограничены при  $r \rightarrow 0$  и удовлетворяли условию прилипания на границе раздела твёрдое тело–жидкость

$$N_{3j}(r = R) = 0. \quad (6.5.42)$$



В результате в качестве решения задачи на ячейке (6.5.32)–(6.5.34) для случая фильтрации сжимаемого баротропного вещества мы получаем [Саваторова, Талонов, Власов, 2010]:

$$N_{3j} = 0, \quad j = 1, 2, \quad (6.5.43)$$

$$N_{33} = \frac{1}{\alpha^{(0)}} \left( 1 - \frac{I_0 \left( r \sqrt{\alpha^{(0)}} / \mu(p^{(0)}) \right)}{I_0 \left( R \sqrt{\alpha^{(0)}} / \mu(p^{(0)}) \right)} \right), \quad (6.5.44)$$

где  $I_0(y)$  — модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

Усредняя (6.5.43)–(6.5.44) по ячейке периодичности, в соответствии с процедурой усреднения (6.5.33) получим выражения

$$\begin{aligned} \langle N_{33} \rangle &= \frac{2\pi m}{\alpha^{(0)}} \left( \frac{R^2}{2} - \frac{\sqrt{\mu(p^{(0)})} \cdot R \cdot I_1 \left( R \sqrt{\alpha^{(0)}} / \mu(p^{(0)}) \right)}{\sqrt{\alpha^{(0)}} \cdot I_0 \left( R \sqrt{\alpha^{(0)}} / \mu(p^{(0)}) \right)} \right) = \\ &= \frac{m}{\alpha^{(0)}} \frac{I_2 \left( R \sqrt{\alpha^{(0)}} / \mu(p^{(0)}) \right)}{I_0 \left( R \sqrt{\alpha^{(0)}} / \mu(p^{(0)}) \right)}, \quad \langle N_{3j} \rangle = 0, \quad j = 1, 2, \end{aligned} \quad (6.5.45)$$

где  $I_1(y)$  и  $I_2(y)$  — модифицированные функции Бесселя первого рода первого и второго порядка соответственно.

#### 6.5.4. Результаты численно-аналитического решения задачи на ячейке (трёхмерный случай)

В случае течения жидкости в пористой среде, составленной из дисперсных частиц, задача на ячейке периодичности не имеет простого решения. Однако в некоторых случаях решение может быть построено «почти» в аналитическом виде, в виде разложений, точно описывающих течение вблизи дисперсных включений сферической формы. Для этого в работе используется аналитико-численный метод решения задачи (6.5.32)–(6.5.34) на основе аппроксимации решения вспомогательными потенциалами и специальными системами функций, удовлетворяющими пространственному уравнению Лапласа и Гельмгольца [Волков-Богородский, 2008, 2016].

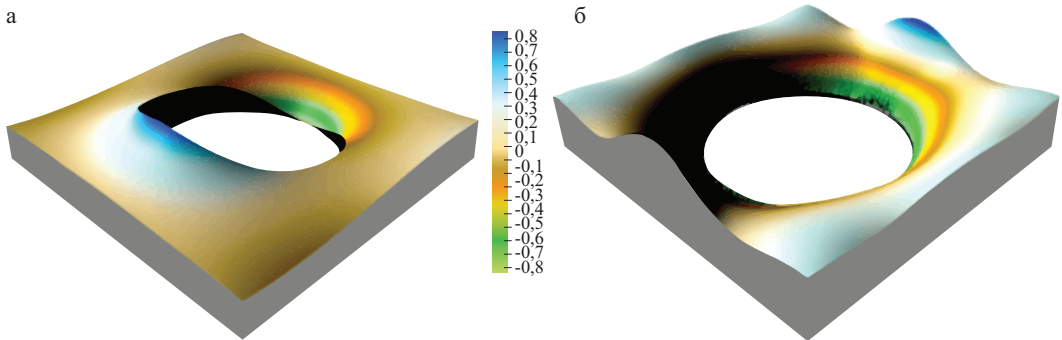
Рассмотрим ячейку периодичности, представляющую собой куб с ребром единичной длины, в центре которого расположена непроницаемая сферическая частица радиуса  $R$  ( $0 < R \leq 0,5$ ). Для решения уравнений (6.5.32)–(6.5.34) строится полная система вспомогательных потенциалов, определяющих решение (псевдоскорость и псевдодавление в ячейке) с учётом граничного условия на поверхности включения при помощи представления Гельмгольца [Власов, Волков-Богородский, 2012, 2016].

Эта система вспомогательных потенциалов определяется явно за счёт выбора их формы представления в виде произведения гармонических полиномов и радиальных множителей, соответствующих фундаментальному решению уравнения Гельмгольца и Лапласа. Выбранная форма представления является оптимальной с точки зрения алгоритмической реализации, поскольку для вспомогательных потенциалов были получены простые рекуррентные соотношения, позволяющие легко их вычислять, дифференцировать и интегрировать в явном аналитическом виде [Волков-Богородский, 2008].

Следует отметить, что для вспомогательных потенциалов не вводятся никаких специальных ограничений, кроме условия единственности представления. В результате решение задачи на ячейке получается с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов условий периодичности на границе ячейки. Соответственно эффективный тензор проницаемости пористой среды получается путём интегрирования вспомогательных потенциалов с учётом свойственных им рекуррентных соотношений.

Анализ условий симметрии задачи на ячейке в случае сферического включения приводит к заключению, что эффективный тензор проницаемости  $\langle k_{ij} \rangle$  имеет диагональную форму и определяется функцией «быстрых» переменных  $N_{33}(\xi)$ , соответствующей пространственной задаче обтекания сферической частицы в направлении оси  $x_3$  при заданном единичном скачке псевдодавления.

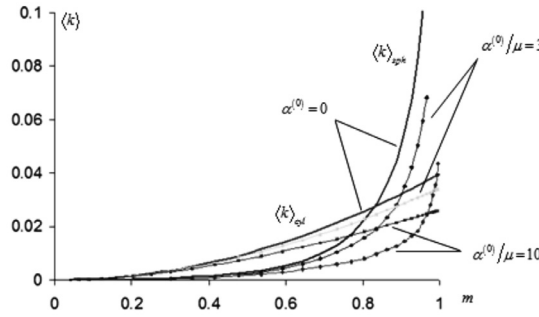
Результаты решения этой задачи аналитико-численным методом для сферических включений радиуса  $R$  представлены ниже на рис. 6.20. На рис. 6.20, а дано распределение псевдодавлений  $Q_3(\xi)$  в ячейке для одного значения радиуса сферического включения  $R$  при  $\alpha^{(0)} = 3\mu(p^{(0)})$ , на рис. 6.20, б представлено соответствующее распределение функции «быстрых» переменных  $N_{33}(\xi)$  (компоненты псевдоскорости). Результаты представлены для среднего сечения  $\{\xi_2 = 0\}$ . На левом рисунке дано изображение поверхности функции, на правом рисунке даны линии уровня для той же функции.



**Рис. 6.20. Распределение псевдодавлений (а) и псевдоскоростей (б) в ячейке с включением радиуса  $R = 0,3$**

На рис. 6.21 представлена зависимость эффективной проницаемости  $\langle k \rangle$  от коэффициента пористости  $m$  для среды, образованной частицами сферической формы  $\langle k \rangle_{sph}$  и для системы цилиндрических каналов  $\langle k \rangle_{cyl}$ . Приведено сопоставление эффективной проницаемости  $\langle k \rangle_{sph}$  с аналитическим решением  $\langle k \rangle_{cyl}$  при различных значениях коэффициента трения  $\alpha^{(0)}$ . Эффективная проницаемость определялась по формуле  $\langle k \rangle = \mu \langle N_{33} \rangle$ , где  $N_{33}(\xi)$  является компонентой матрицы-функции «быстрых» переменных  $N(\xi)$ , удовлетворяющей задаче на ячейке (32) — (34).

Из рис. 6.21 видно, что эффективная проницаемость среды сильно растёт с ростом пористости материала. При этом для заданной пористости эффективная проницаемость тем больше, чем меньше коэффициент трения. Зависимость эффективной проницаемости от пористости, полученная для среды, образованной частицами сферической формы, носит существенно более нелинейный характер в сравнении с аналогичной кривой, построенной для случая фильтрации в системе цилиндрических каналов.



**Рис. 6.21.** Зависимость эффективной проницаемости от пористости для сферических частиц и цилиндрических каналов при различных значениях параметра  $\alpha^{(0)}/\mu$

### 6.5.5. Исследование влияния нелинейностей на распределение давления и скорости

В этом параграфе будут представлены результаты решения макроскопической задачи о фильтрации вязкого сжимаемого баротропного вещества в недеформируемой среде, представляющей собой периодическую систему цилиндрических проницаемых каналов.

В рассматриваемом случае обезразмеренная макроскопическая задача (6.5.35) может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} m \frac{\partial \rho(p^{(0)})}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \rho(p^{(0)}) \langle N_{33} \rangle \frac{\partial p^{(0)}}{\partial x_3} \right) &= 0, \\ \langle v_3^{(0)} \rangle &= - \langle N_{33} \rangle \frac{\partial p^{(0)}}{\partial x_3}, \quad \langle k_{33} \rangle = \mu(p^{(0)}) \langle N_{33} \rangle, \\ f(p^{(0)}, \rho^{(0)}) &= 0. \end{aligned} \quad (6.5.46)$$

Возвращаясь к размерным переменным, перепишем задачу (6.5.46) в виде

$$\begin{aligned} m \frac{\partial \rho(p)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \rho(p) \langle N_{33}(p) \rangle \frac{\partial p}{\partial x_3} \right) &= O(\varepsilon), \\ \langle v_3 \rangle &= - \frac{K_{33}^{eff}}{\mu(p)} \frac{\partial p}{\partial x_3} + O(\varepsilon), \quad K_{33}^{eff} = l_c^2 \langle k_{33} \rangle, \\ f(p, \rho) &= O(\varepsilon). \end{aligned} \quad (6.5.47)$$

Теперь, выбрав вид барометрического соотношения и проинтегрировав первое из уравнений (6.5.47), можно получить макроскопическое распределение давления фильтрующегося вещества. Это давление, в свою очередь, может быть использовано для определения макроскопического распределения скорости в соответствии со вторым уравнением системы (6.5.47).

Здесь будут рассмотрены два вида барометрических соотношений. Пусть в первом случае давление и плотность фильтрующегося вещества связаны эмпирической формулой Доусона и Хиггинсона [Dowson, Higginson, 1977]:

$$\rho(p) = \rho_0 \left( 1 + \frac{ap}{1 + bp} \right), \quad (6.5.48)$$

где  $\rho_0$ ,  $a$ ,  $b$  — константы, значения которых будут указаны ниже.

Во втором случае рассмотрим барометрическое соотношение в виде [Николаевский, 1984]:

$$\rho(p) = \rho_0 \left( 1 + \frac{p - p_0}{K_p} \right), \quad (6.5.49)$$

где  $K_p$  — коэффициент объёмного сжатия,  $p_0$  — давление, соответствующее плотности  $\rho_0$ .

Ниже мы рассмотрим несколько возможных соотношений, связывающих вязкость и коэффициент трения с давлением жидкости. Для случаев, когда зависимость вязкости и коэффициента трения от давления описывается экспоненциальным и степенным соотношениями, также вычислим распределения давления и скорости для различных значений параметров, характеризующих степень нелинейности.

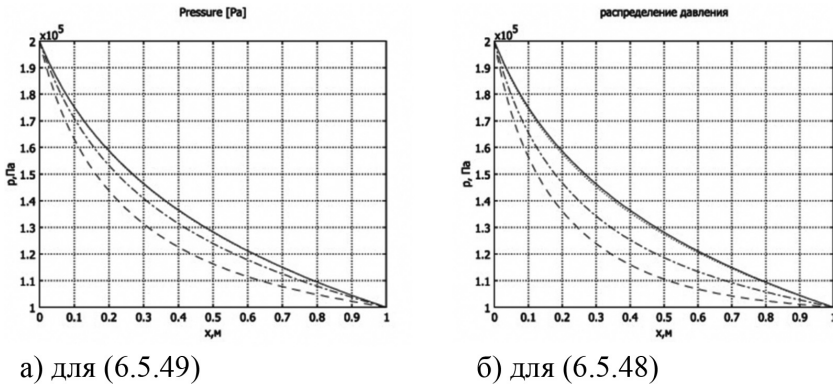
Предположим, что начальные и граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} p(t=0) &= p_{ini} = 100 \text{ кПа}, \\ p(x_3=0) &= 200 \text{ кПа}, \quad p(x_3=L) = 100 \text{ кПа}. \end{aligned} \quad (6.5.50)$$

Пусть плотность и вязкость фильтрующегося вещества равны  $\rho_0 = 850 \text{ кг/м}^3$  и  $\mu_0 = 0,051 \text{ Па}\cdot\text{с}$  соответственно, коэффициент вязкости равен  $\alpha_0 = \mu_0/k_c$ , где  $k_c = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ . Коэффициент объёмного сжатия положим равным  $K_p = 10^9 \text{ Па}$ , радиус  $R \sim 10^{-2} \text{ м}$ , характерный размер  $l \sim 10^{-2} \text{ м}$ , характерный размер  $L = 1,0 \text{ м}$ . Константы  $a$  и  $b$  будем считать равными  $a = 0,6 \text{ ГПа}^{-1}$  и  $b = 1,7 \text{ ГПа}^{-1}$  соответственно [Dowson, Higginson, 1977]. Пористость  $m = 0,3$ .

Решение одномерной задачи на ячейке позволяет определить компоненты тензора эффективной проницаемости среды. Пользуясь (6.5.45), получаем значение коэффициента проницаемости эффективной среды, равное  $K_{eff} = 1,195 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ .

На рис. 6.22 представлено распределение давления фильтрующегося вещества на различные моменты времени для случая, когда зависимость коэффициентов вязкости и трения от давления определяется соотношениями (6.5.4)–(6.5.5) при  $\beta = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ .



**Рис. 6.22. Распределение давления: штриховая линия —  $t = 0,1\text{с}$ ; штрих-пунктир —  $t = 0,2\text{с}$ ; пунктир —  $t = 0,6\text{с}$ ; сплошная линия —  $t = 1,0\text{с}$**

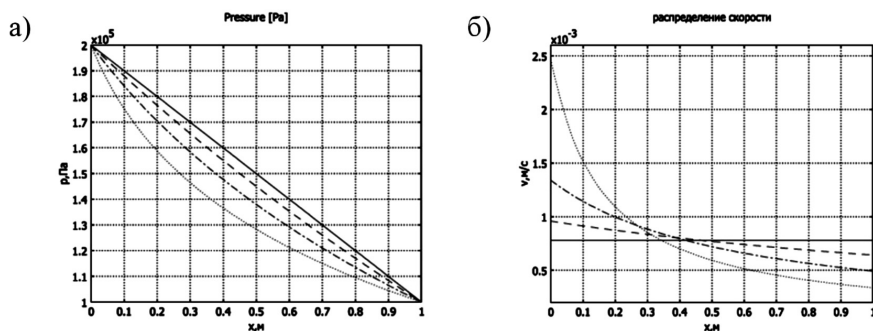
### 6.5.6. Результаты расчётов в случае зависимости вязкости, коэффициента трения и плотности от давления

Пример 1:

$$\rho(p) = \rho_0 \left( 1 + \frac{ap}{1 + bp} \right), \quad \mu(p) = \mu_0 \exp(\beta p), \quad \alpha(p) = \alpha_0 \exp(\beta p).$$

Интегрирование первого из уравнений (6.5.47) с учётом барометрического соотношения (6.5.48), зависимостей (6.5.4)–(6.5.5) и упомянутых выше начального и граничных условий (6.5.50) даёт распределение давления, вид которого приведён на рис. 6.23, а.

Из рис. 6.23, а видно, что в случае  $\beta = 0$ , когда не учитывается зависимость  $\mu$  и  $\alpha$  от давления, распределение  $p(x)$  представляет собой линейную функцию, и величина давления в любой точке внутри рассматриваемого интервала превышает соответствующие значения для случаев с другими значениями  $\beta$ . При этом, чем больше значение степени нелинейности  $\beta$ , тем больше кривизна графика зависимости давления от координаты и тем меньше величина давления в любой точке внутри рассматриваемой области. Следует также отметить, что согласно [Dowson, Higginson, 1977] кривые, учитывающие зависимость динамической вязкости от давления, находятся в лучшем согласии с данными экспериментов.



**Рис. 6.23. Распределение давления (а) и скорости (б) на момент времени  $t = 1,0$ с: сплошная линия —  $\beta = 0$ ; штриховая линия —  $\beta = 0,4 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ ; штрих-пунктир —  $\beta = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ ; пунктир —  $\beta = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$**

На рис. 6.23, б представлено макроскопическое распределение скорости, вычисленное для рассматриваемого случая в соответствии со вторым уравнением системы (6.5.47). Можно видеть, что, чем больше значение параметра  $\beta$ , тем больше кривизна графика зависимости скорости от координаты. Этого следует ожидать, поскольку в случае большей вязкости происходит большая диссипация энергии, и это ведёт к уменьшению скорости фильтрации жидкости.

*Пример 2:*

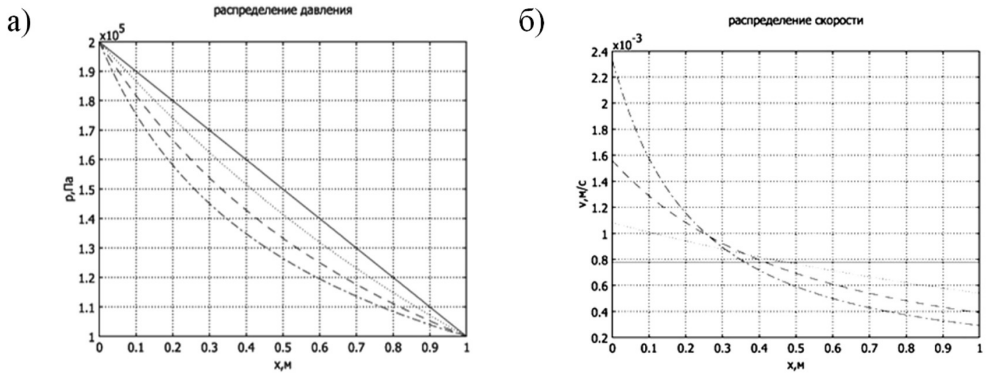
$$\rho(p) = \rho_0 \left( 1 + \frac{ap}{1 + bp} \right), \quad \mu(p) = \mu_0 (p/p_0)^n, \quad \alpha(p) = \alpha_0 (p/p_0)^n.$$

Рассматриваемый пример отличается от предыдущего несколько иным видом зависимости вязкости и коэффициента трения от давления. Интегрирование первого из уравнений (6.5.47) с учётом начального и граничных условий (6.5.50) даёт распределение давления, вид которого приведён на рис. 6.24, а.

Из рис. 6.24, а видно, что в случае  $n = 0$ , когда не учитывается зависимость  $\mu$  и  $\alpha$  от давления, распределение  $t = 1,0$ с: сплошная линия —  $\beta = 0$ ; штриховая линия —  $\beta = 0,4 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ ; штрих-пунктир —  $\beta = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ ; пунктир —  $\beta = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$  представляет собой линейную функцию, и величина давления в любой точке внутри рассматриваемого интервала превышает соответствующие значения для других случаев.



При этом, чем больше значение степени нелинейности  $n$ , тем больше кривизна графика зависимости давления от координаты и тем меньше величина давления в любой точке внутри рассматриваемой области.



**Рис. 6.24. Распределение давления (а) и скорости (б) на момент времени  $t = 0,1$ с: сплошная линия —  $n = 0$ ; пунктир —  $n = 1$ ; штриховая линия —  $n = 2$ ; штрих-пунктир —  $n = 3$**

На рис. 6.24, б представлено макроскопическое распределение скорости, вычисленное для рассматриваемого примера в соответствии со вторым уравнением системы (6.5.47). Из этого рисунка видно, что, чем больше значение параметра  $n$ , тем больше кривизна графика зависимости скорости от координаты.

*Пример 3:*

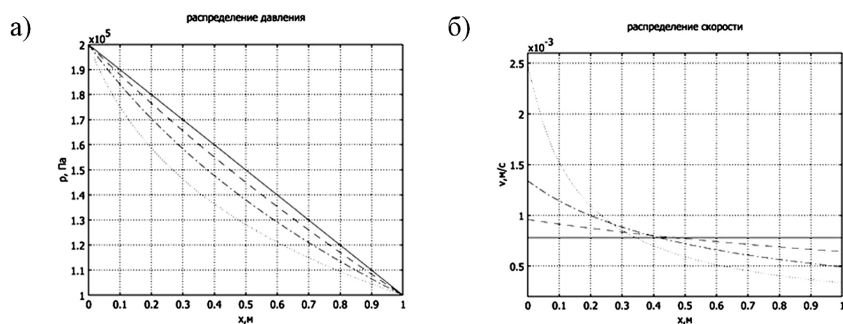
$$\rho(p) = \rho_0 \left( 1 + \frac{p - p_0}{K_p} \right), \quad \mu(p) = \mu_0 \exp(\beta p), \quad \alpha(p) = \alpha_0 \exp(\beta p).$$

Для рассматриваемого примера (как, впрочем, и для последующего) характерен иной вид барометрического соотношения. Интегрирование первого из уравнений (6.5.47) с учётом барометрического соотношения (6.5.49), зависимостей (6.24)–(6.25), а также условий (6.5.50) даёт распределение давления, вид которого приведён на рис. 6.25, а.

Из рис. 6.25, а видно, что в случае  $\beta = 0$ , когда не учитывается зависимость  $\mu$  и  $\alpha$  от давления, распределение  $p(x)$  представляет собой линейную функцию, и величина давления в любой точке внутри рассматриваемого интервала превышает соответствующие значения для случаев с другими значениями  $\beta$ . При этом, чем больше значение степени нелинейности  $\beta$ , тем больше кривизна графика зависимости давления от координаты и тем меньше величина давления в любой точке внутри рассматриваемой области. Следует также отметить, что согласно [Dowson, Higginson, 1977] кривые, учитывающие зависимость динамической вязкости от давления, находятся в лучшем согласии с данными экспериментов.

На рис. 6.25, б представлено макроскопическое распределение скорости, вычисленное для рассматриваемого примера в соответствии со вторым уравнением системы (6.5.47).

На рис. 6.25, б можно видеть, что, чем больше значение параметра  $\beta$ , тем больше кривизна графика зависимости скорости от координаты. Этого следует ожидать, поскольку в случае большей вязкости происходит большая диссипация энергии, и это ведёт к уменьшению скорости жидкости.



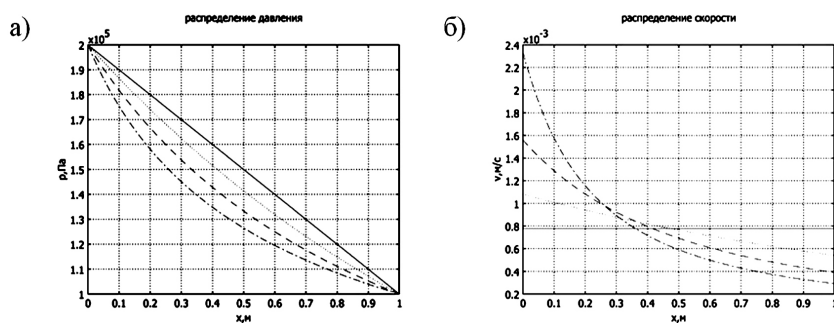
**Рис. 6.25.** Распределение давления (а) и скорости (б) на момент времени  $t = 1,0\text{с}$ : сплошная линия —  $\beta = 0$ ; штриховая линия —  $\beta = 0,4 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ ; штрих-пунктир —  $\beta = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ ; пунктир —  $\beta = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$

Пример 4:

$$\rho(p) = \rho_0 \left( 1 + \frac{p - p_0}{K_\rho} \right), \quad \mu(p) = \mu_0 \left( p/p_0 \right)^n, \quad \alpha(p) = \alpha_0 \left( p/p_0 \right)^n.$$

Рассматриваемый пример отличается от предыдущего степенным видом зависимости вязкости и коэффициента трения от давления. Интегрирование первого из уравнений (6.5.47) с учётом начального и граничных условий (6.5.50) даёт распределение давления, вид которого приведен на рис. 6.26, а.

Из рис. 6.26, а видно, что в случае  $n = 0$ , когда не учитывается зависимость  $\mu$  и  $\alpha$  от давления, распределение  $p(x)$  представляет собой линейную функцию, и величина давления в любой точке внутри рассматриваемого интервала превышает соответствующие значения для других случаев. При этом, чем больше значение степени нелинейности  $n$ , тем больше кривизна графика зависимости давления от координаты и тем меньше величина давления в любой точке внутри рассматриваемой области.



**Рис. 6.26.** Распределение давления (а) и скорости (б) на момент времени  $t = 1,0\text{с}$ : сплошная линия —  $n = 0$ ; пунктир —  $n = 1$ ; штриховая линия —  $n = 2$ ; штрих-пунктир —  $n = 3$

На рис. 6.26, б представлено макроскопическое распределение скорости, вычисленное для рассматриваемого примера в соответствии со вторым уравнением системы (6.5.47). Из этого рисунка видно, чем больше значение параметра  $n$ , тем больше кривизна графика зависимости скорости от координаты.

## 6.6. Многомасштабное усреднение уравнений переноса газовой фазы в пористой среде

В данном параграфе производится усреднение уравнения баланса масс газа в пористом веществе с учётом его уравнения состояния, возможности процессов адсорбции и десорбции, молекулярной и поверхностной диффузии, а также фильтрации. Исследуется влияние десорбции газа из нанопор в материале на распределение газа в образце, а также эффект зависимости проницаемости матрицы от величины давления.

### 6.6.1. Постановка задачи и определяющие уравнения

При построении модели будем считать вещество состоящим из микропористой неорганической матрицы с нанопорами и растворённым газом. Предполагается, что ввиду малой проницаемости нанопор, основным механизмом переноса вещества в органических включениях является диффузия десорбированного газа, перенос газа в органической матрице осуществляется за счёт молекулярной диффузии и фильтрации. Настоящая модель является обобщением и развитием подхода, изложенного в [Akkutlu, Efendiev, Savatorova, 2015]. Постановка задачи состоит из уравнения баланса масс, уравнения состояния газовой фазы, закона фильтрации, изотермы адсорбции, и выражения для зависимости проницаемости неорганической матрицы от давления.

Уравнение баланса масс может быть записано в виде:

$$\phi \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \phi) \gamma \frac{\partial C_\mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \phi D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (1 - \phi) \gamma D_{ij}^s \frac{\partial C_\mu}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\phi v_i C), \quad (6.6.1)$$

где  $x = (x_1, x_2, x_3)$  — координат,  $t$  — время;  $v = \{v_i\}$  — скорость газовой фазы;  $C$  — концентрация свободного газа (моль на единицу объёма);  $C_\mu$  — количество газа, адсорбированного матрицей (моль на единицу объёма матрицы);  $\phi$  — пористость:  $\phi = \phi_k$  в нанопорах,  $\phi = \phi_i$  в неорганической матрице;  $\gamma$  — параметр, определяемый как  $\gamma = TOC \cdot \rho_b / \rho_k$  в нанопорах и  $\gamma = 0$  в матрице. Здесь  $TOC$  обозначает общее содержание газа как отношение массы органического вещества к общей массе породы,  $\rho_k$  и  $\rho_b$  — плотность керогена и объёмная породы соответственно. Концентрации свободного и адсорбированного газа предполагаются связанными между собой. В стационарном состоянии эта связь выражается изотермой адсорбции в виде  $C_\mu = F(C)$ . В данной работе мы для простоты использовали линейную изотерму адсорбции (закон Генри), выражаемую соотношением:

$$C_\mu = F(C) = \kappa C, \quad \kappa = \text{const}. \quad (6.6.2)$$

Тензор диффузии  $D = \{D_{ij}\}$  определён в матрице как  $D = D^k$  и в неорганической матрице как  $D = D^i$ . Тензор  $D^s$  используется для описания поверхностной диффузии газа, адсорбированного матрицей.

Далее, мы вводим ещё два определяющих соотношения: уравнение состояния газа и закон фильтрации газа.

Уравнение состояния используется для связи количества свободного газа в порах с величиной порового давления. В качестве рабочего вещества мы рассматриваем метан (продукт разложения газогидратов) в диапазоне температур и давлений 300–450 К и 500–8500 psi соответственно. При таких условиях коэффициент сжимаемости близок к единице [Гуревич, Брусиловский, 1984], и метан можно считать идеальным газом, описываемым уравнением состояния в виде:

$$pV = \nu RT; \Rightarrow p = \frac{\nu}{V} RT = C RT, \quad (6.6.3)$$

где  $\nu$  — число молей газа в поровом объёме при температуре  $T$  и давлении  $p$ ,  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Мы предполагаем, что фильтрация газа в органической матрице подчиняется закону Дарси:

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p = -\frac{k}{\mu} RT \nabla C. \quad (6.6.4)$$

где  $k$  — тензор проницаемости,  $\mu$  — вязкость. Изменением давления с глубиной (вследствие гравитационных эффектов) мы пренебрегаем ввиду низкой плотности метана.

Существует ряд экспериментов, подтверждающих зависимость проницаемости сланцевых пород от давления. Например, мы можем обратиться к работе [Kwon, Kronenberg, Gangi, Johnson and Herbert, 2004], где на основании серии измерений, выполненных для сланцевых пород различной производительности, показана чувствительность проницаемости к величине эффективного напряжения. Для учёта зависимости проницаемости неорганической матрицы от давления мы используем модель, предложенную Ганги ([Kwon, Kronenberg, Gangi, Johnson and Herbert, 2004]):

$$k_{ij} = k_0 \delta_{ij} \left( 1 - \left( \frac{p_c - \alpha p}{p_t} \right)^m \right)^3. \quad (6.6.5)$$

В соотношении (6.6.5)  $k = \{k_{ij}\}$  — проницаемость неорганической матрицы;  $k_0$  — проницаемость при нулевом эффективном напряжении;  $(p_c - \alpha p)$  — эффективное напряжение;  $p$  — поровое давление (давление в пласте, — эффективный стресс, когда поры полностью закрыты ( $k = 0$ )). Чем больше величина  $p_t$ , тем труднее закрыть поры и тем слабее зависимость проницаемости от давления. Величина коэффициента  $m$  ( $0 < m < 1$ ) связана с шероховатостью поверхности пор и определяется по формуле  $3 - \dim S_p$ , где  $\dim S_p$  — Хаусдорфова размерность поверхности пор.

Таким образом, уравнения (6.6.1)–(6.6.5) определяют постановку задачи. Подставив уравнения (6.6.2)–(6.6.4) в уравнение (6.6.1), получим:

$$(\varphi + (1 - \varphi)\gamma\kappa) \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \varphi D_{ij} + (1 - \varphi)\gamma\kappa D_{ij}^s + \varphi \frac{k_{ij}}{\mu} RTC \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right), \quad 0 < t < T, \quad x \in D. \quad (6.6.6)$$

Эту задачу мы будем решать, дополнив её необходимыми начальным условием:

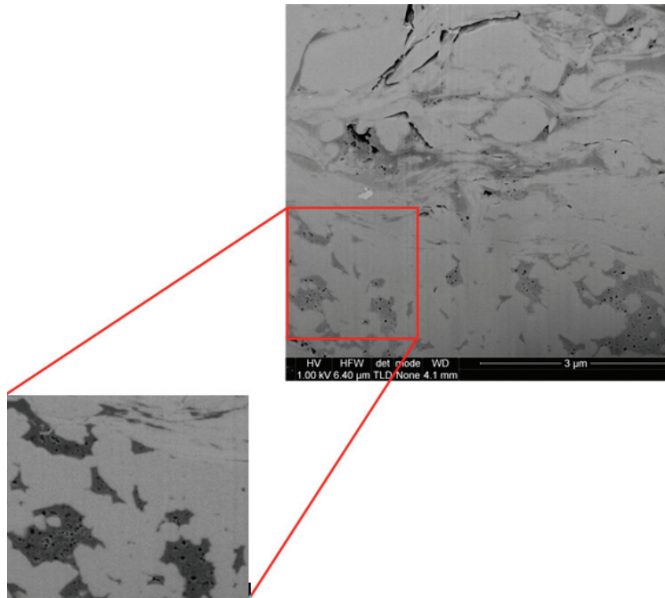
$$C(x, 0) = C_0 \quad (6.6.7)$$

и смешанными граничными условиями:

$$C(x, t)|_{\partial D_1} = C_1, \quad \nabla C(x, t)|_{\partial D_2} = 0, \quad \partial D_1 \cup \partial D_2 = \partial D. \quad (6.6.8)$$

### 6.6.2. Процедура усреднения

Сланцевый газ добывается из пород, представляющих собой неорганическую матрицу с органическими включениями. На рис. 6.27 приведено двумерное изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. На этом изображении чёрные участки представляют собой поры в неорганической матрице, тёмно-серые участки — включения из керогена, светло-серые участки — материал неорганической матрицы, состоящей из таких материалов, как глина, полевошпат, кварц, пирит и т.п.



**Рис. 6.27. Двумерное изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа [Ambrose, Hartman, Diaz-Campos, Akkutlu and Sondergeld, 2012]**

В предположении, что органические включения в матрице распределены достаточно регулярно, и в среде можно выделить характерный представительный объём (ячейку периодичности) с характерным размером  $l$ , к уравнениям переноса применяются методы усреднения с учетом нелинейных зависимостей [Власов, Волков-Богородский, 2014; Akkutlu, Efendiev, Savatorova, 2015]. При этом мы подразумеваем выполнение условия пространственного разделения масштабов, а именно считаем, что характерный размер неоднородности много меньше размера ячейки периодичности  $l$ , в то время как размер ячейки периодичности  $l$  много меньше характерного размера образца  $L$  ( $\epsilon = l/L \ll 1$ ). Будем считать, что на микроуровне среда обладает периодической структурой с характерным размером ячейки периодичности  $O(l)$  и характеризуется координатами  $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3\}$ , которые описывают процессы локально. На макроуровне среду будем описывать с помощью координат  $x = \{x_1, x_2, x_3\}$ , характеризующих процессы глобально. Таким образом, любая величина, зависящая от координат, будет функцией локальных переменных  $\xi$  и глобальных переменных  $x$ . Связь между глобальными и локальными координатами будет выражаться соотношением:

$$x = \epsilon \xi, \quad (6.6.9)$$

где  $\epsilon = l/L \ll 1$  представляет собой малый параметр.

В рамках метода асимптотического усреднения решения задачи (6.6.6)–(6.6.8) будем искать в виде разложений в ряд по малому параметру  $\epsilon$ :

$$C = C^{(0)}(x, \xi, t) + \epsilon C^{(1)}(x, \xi, t) + \epsilon^2 C^{(2)}(x, \xi, t) + \dots, \quad (6.6.10)$$

где слагаемые  $C^{(n)}$  предполагаются функциями, периодическими по локальной переменной  $\xi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).



Уравнение (6.6.6) можно теперь переписать в более компактном виде:

$$a(x, \xi) \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( b_{ij}(x, \xi, C) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right), \quad 0 < t < T, \quad x \in D, \quad (6.6.11)$$

где

$$a(x, \xi) = \varphi(x, \xi) + (1 - \varphi(x, \xi))\gamma(x, \xi)\kappa, \quad (6.6.12)$$

$$b_{ij}(x, \xi, C) = \varphi(x, \xi) D_{ij}(x, \xi) + (1 - \varphi(x, \xi))\gamma(x, \xi) D_{ij}^s(x, \xi)\kappa + \varphi(x, \xi) \frac{k_{ij}(x, \xi, C)}{\mu} RTC. \quad (6.6.13)$$

Подставляя разложение (6.6.10) в соотношения (6.6.11)–(6.6.13), а также в начальные и граничные условия (6.6.7)–(6.6.8), и приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях малого параметра  $\varepsilon$ , получим рекуррентную цепочку уравнений для функций  $C^{(n)}$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ). Произведем усреднение этих уравнений по ячейке периодичности в соответствии с процедурой:

$$\langle f \rangle_{\xi} = \frac{1}{|V_c|} \int_{V_c} f d\xi, \quad (6.6.14)$$

где  $|V_c|$  обозначает объём ячейки периодичности.

В результате усреднения нами было получено, что распределение концентрации газа в эффективной среде  $C^{(0)}(x, t)$  не зависит от переменной  $\xi$  и является решением макроскопической задачи вида:

$$a^* \frac{\partial C^{(0)}(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( d_{ij}^* \frac{\partial C^{(0)}(x, t)}{\partial x_j} \right), \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (6.6.15)$$

начальным условием:

$$C^{(0)}(x, 0) = C_0 \quad (6.6.16)$$

и смешанными граничными условиями:

$$C^{(0)}(x, t)|_{\partial D_1} = C_1, \quad \nabla C^{(0)}(x, t)|_{\partial D_2} = 0, \quad \partial D_1 \cup \partial D_2 = \partial D. \quad (6.6.17)$$

В уравнении (6.6.15)  $a^*$  и  $d_{ij}^*$  — эффективные коэффициенты, усреднённые по ячейке периодичности.

Эффективный коэффициент  $a^*$  определён соотношением:

$$a^* = \langle \varphi \rangle_{\xi} + \langle (1 - \varphi)\gamma \rangle_{\xi} \kappa. \quad (6.6.18)$$

Эффективный коэффициент  $d_{ij}^*$  определён соотношением:

$$d_{ij}^* = \left\langle b_{ij}^1(x, \xi, C^{(0)}) \left( \frac{\partial N_i(x, \xi, C^{(0)})}{\partial \xi_j} + \delta_{ij} \right) \right\rangle_{\xi}, \quad (6.6.19)$$

где

$$b_{ij}^1(x, \xi, C^{(0)}) = \varphi(x, \xi) D_{ij}(x, \xi) + (1 - \varphi(x, \xi))\gamma(x, \xi) D_{ij}^s(x, \xi)\kappa + \varphi(x, \xi) \frac{k_{ij}(x, \xi, C^{(0)})}{\mu} RTC^{(0)}. \quad (6.6.20)$$

Периодические по переменной  $\xi$  функции  $N_i$  находятся из решения задачи на ячейке периодичности:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( b_{ij}^l(x, \xi, C^{(0)}) \left( \frac{\partial N_l(x, \xi, C^{(0)})}{\partial \xi_j} + \delta_{ij} \right) \right) = 0, \quad l = 1, 2, 3, \quad (6.6.21)$$

$$\left\langle N_l(x, \xi, C^{(0)}) \right\rangle_{\xi} = 0.$$

В данной работе мы не приводим детали получения макроскопической задачи и задачи на ячейке периодичности. Подробный вывод этих уравнений можно получить, воспроизводя выкладки, аналогичные сделанным в работе [Akkutlu, Efendiev, Savatorova, 2015].

Заметим также, что в уравнении (6.6.21)  $C^{(0)}$  является параметром и уравнение решается для фиксированного значения  $C^{(0)}$  в каждой точке с макроскопической координатой  $x$ . Макроскопические эффективные коэффициенты вычисляются в каждой точке для каждого значения величины  $C^{(0)}$ .

Макроскопическое уравнение (6.6.15) является нелинейным параболическим уравнением, сходным по своему виду с уравнением диффузии. Эффективные коэффициенты  $d_{ij}^*$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) в этом уравнении зависят как от значений компонент тензора диффузии, так и от значений компонент тензора проницаемости. Главными механизмами переноса здесь являются диффузия свободного и адсорбированного газов и фильтрация свободного газа.

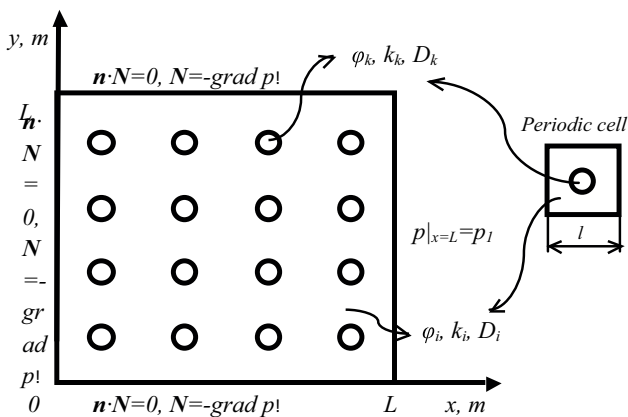
### 6.6.3. Результаты численного моделирования

В этом разделе представлены некоторые численные результаты для двумерного случая переноса газа в среде, представляющей собой микропористую неорганическую матрицу с нанопористыми органическими включениями из керогена. Исходя из принятого в рамках нашей модели пространственного разделения масштабов, мы реализуем двухуровневый алгоритм, согласно которому решение задачи на ячейке (6.6.21) используется для определения эффективных коэффициентов усредненной задачи (6.6.15)–(6.6.20). В общем случае, и макроскопическая задача, и задача на ячейке, являются нелинейными и зависят от величины  $C^{(0)}$ . В работе [Власов, Волков-Богородский, 2014] было показано, что при решении задачи на ячейки эта величина может рассматриваться как параметр.

Реализация предлагаемого двухуровневого подхода начинается с численного интегрирования задачи на ячейке (6.6.21) и последующего усреднения решений по ячейке периодичности с целью определения величин  $d_{ij}^*(x, C^{(0)})$  в каждой точке с макроскопическими координатами  $x$  для каждого значения величины  $C^{(0)}$ , рассматриваемой как параметр. На следующем этапе реализуется численное интегрирование усредненного уравнения, в котором величины  $d_{ij}^*(x, C^{(0)})$  являются эффективными коэффициентами.

Ячейка периодичности представляет собой квадрат единичного размера. Большую часть объёма ячейки составляет неорганическая матрица. Кероген моделируется как круглое включение радиуса  $R$ , расположенное в центре ячейки (рис. 6.28). Задача на ячейке (6.6.21) является краевой задачей с периодическими граничными условиями. Она решалась специальным аналитико-численным методом [Волков-Богородский, 2008, 2016; Волков-Богородский, Власов, Саваторова, Талонов, 2013], основанным на аппроксимации решения системой функций, точно удовлетворяющей уравнению на ячейке и всем необходимым контактными условиям на границе включений. Эта система функции может быть записана в явном виде и имеет большие преимущества с точки зрения численной реализации алгоритма, поскольку простые рекуррентные соотношения позво-

ляют легко дифференцировать и интегрировать базисные функции. Следует отметить, что эти функции отвечают всем условиям задачи на ячейки за исключением условия периодичности. В результате задача на ячейке решается аппроксимацией условий периодичности на её границах методом наименьших квадратов. Вследствие круговой симметрии, характеризующей керогеновые включения в рамках данной модели, тензор  $d_{ij}^*$  имеет диагональную форму, и его компоненты зависят от величины  $N_i(\xi)$ , являющейся функцией быстрых координат  $\xi$ .



**Рис. 6.28.** Двумерная модель рассматриваемого образца, представляющего собой неорганическую матрицу с круглыми органическими включениями

Далее будут представлены результаты решения макроскопической усредненной задачи. Макроскопическое уравнение с начальным и смешанными граничными условиями решалась в двумерной постановке методом конечных элементов с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics. Расчёты выполнялись для половины участка сланцевой породы шириной 2 м, справа и слева ограниченной трещинами (см. рис. 6.28). Пористость неорганического вещества матрицы была принята равной 6%, такой же была принята пористость керогена. Проницаемость керогена принималась пренебрежимо малой, проницаемость неорганической матрицы при нулевом эффективном напряжении была принята равной  $k_0 = 22,1 nD = 2g10^{-20} \text{ м}^2$ . Начальное давление было принято равным 8350 psi, давление в трещине (на правой границе) 500 psi. На одной из границ (правой) мы имеем граничное условие Дирихле, на всех остальных границах рассматриваем условие Неймана с фиксированным градиентом концентрации равным нулю (см. рис. 6.28). Основные параметры, использовавшиеся в расчётах, представлены в табл. 6.2.

На рис. 6.29 представлены распределения концентрации газа в образце на разные моменты времени. Усредненная задача (6.6.15)–(6.6.20) с начальным условием (6.6.16) и граничными условиями (6.6.17) решалась для случая адсорбции по закону Генри (6.6.2) с коэффициентом  $k = 0,1$  и с учётом нелинейной зависимости проницаемости неорганической матрицы от давления в виде (6.6.5). Объёмная концентрация керогена была принята равной 10%. На рис. 6.29 отчетливо видно, что вследствие выхода газа через правую границу (трещина), количество газа в образце со временем убывает. Тот же самый эффект можно наблюдать на рис. 6.30, где показана зависимость распределения концентрации свободного газа  $C$  от координаты  $x_1$ , выбранной вдоль полуширины образца сланцевой

породы между двумя трещинами. Вторая пространственная координата  $x_2$  была фиксирована и равна 0,5 м.

На рис. 6.31 представлены результаты исследования влияния коэффициента адсорбции Генри на изменение концентрации свободного газа в образце. Из закона Генри следует, что чем больше величина  $k$ , тем больше количество адсорбированного газа. В процессе добычи, сорбированный керогеном газ в ходе становится дополнительным источником свободного газа, замедляя убыль концентрации и поддерживая более высокий уровень давления в процессе производства сланцевого газа.

Далее мы исследовали влияние концентрации керогена на величину концентрации свободного газа в образце. Результаты показаны на рис. 6.32–6.37. Так, на рис. 6.36 видно, что на фиксированный момент времени концентрация свободного газа в образце тем выше, чем выше доля органических включений в матрице. Это может быть объяснено тем фактом, что, по мере выхода свободного газа через трещину на границе образца, большее содержание керогена ведет к более выраженному эффекту десорбции связанного газа.

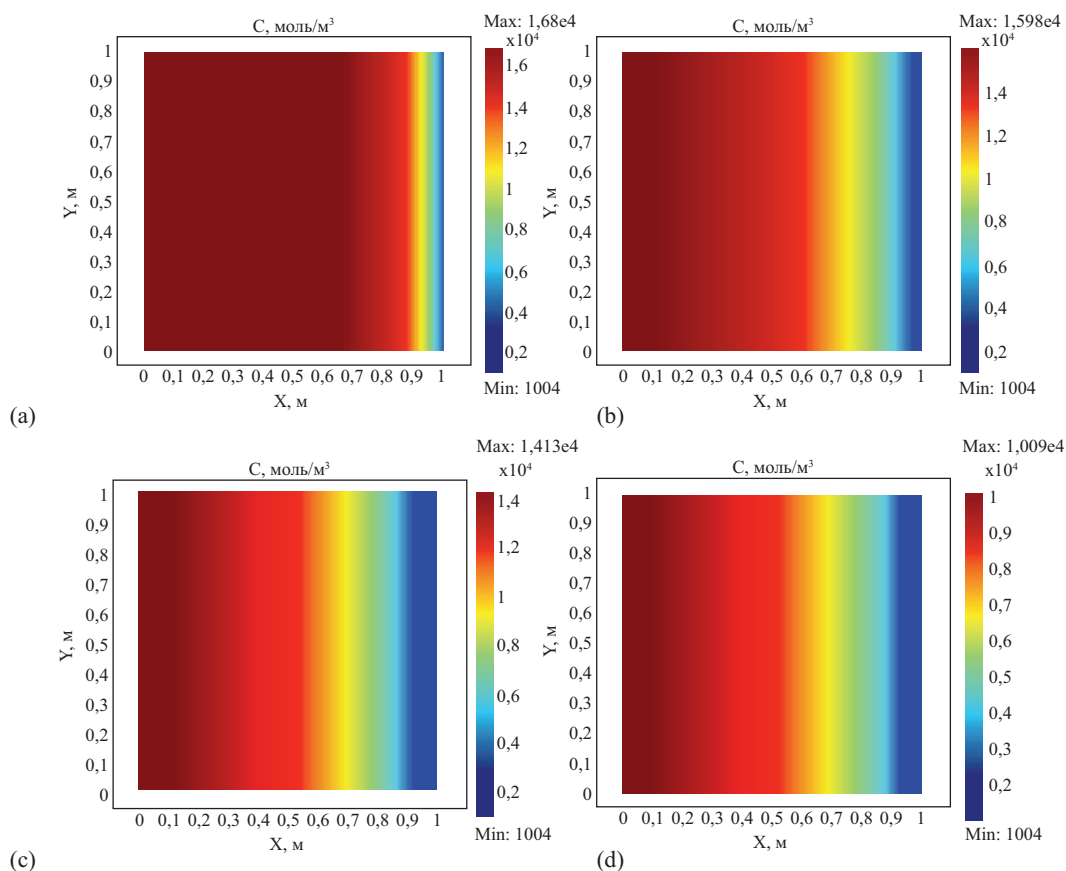
**Таблица 6.2. Основные параметры, использовавшиеся в расчётах (см. [Ambrose, Hartman, Diaz-Campos, Akkutlu and Sondergeld, 2012; Akkutlu, Efendiev, Savatorova, 2015])**

	Неорганическая матрица	Органическое включение (кероген)
Пористость	$\phi_i = 0,06$	$\phi_k = 0,06$
Коэффициенты диффузии	$D_i = D_k = 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$	$D_k = 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ $D_s = 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$
Температура	$T = 413 \text{ K}$	
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$	
Начальное давление (и концентрация)	$p_0 = 8350 \text{ psi} = 8350 \cdot 6895 \text{ Па}$ $C_0 = p_0/RT_1 = 16\,800 \text{ моль}/\text{м}^3$	
Давление и концентрация на границе с трещиной	$P_1 = 500 \text{ psi} = 500 \cdot 6895 \text{ Па}$ $C_l = p_1/RT_1 = 1004 \text{ моль}/\text{м}^3$	
Вязкость	$\mu = 10^{-7} \text{ кг}/(\text{смс})$	

Зависимость проницаемости от давления:

$$k = k_0 \left( 1 - \left( \frac{p_c - \alpha p}{p_l} \right)^m \right)^3$$

Проницаемость при нулевом эффективном напряжении $k_0$	$22,1 nD = 2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$
$p_l$	26 000 psi
$p_c$	15 000 psia
$m$	0,5
Коэффициент $\alpha$	0,5
Модель Генри: $C_\mu = kC$	
Коэффициент Генри	$k = 0,4; k \in (0,1)$



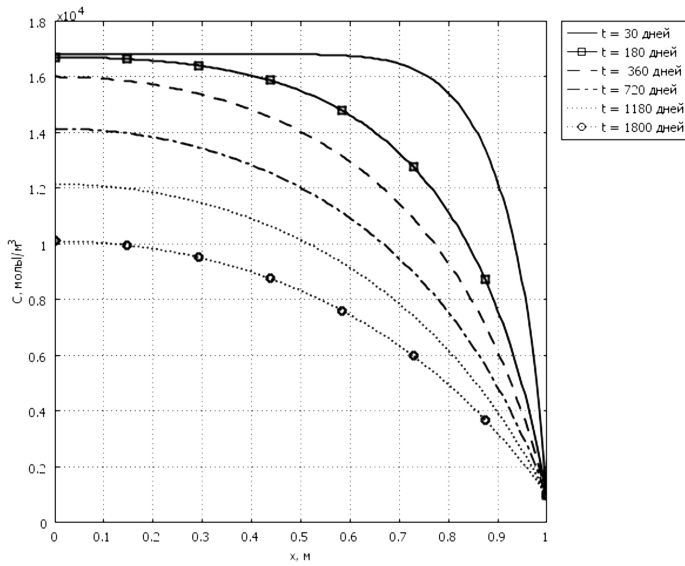
**Рис. 6.29. Распределение концентрации свободного газа в образце на разные моменты времени:**

**a —  $t = 30$  дней; b —  $t = 360$  дней; c —  $t = 720$  дней; d —  $t = 1800$  дней. Во всех четырех случаях концентрация керогена составляла 10%, рассматривалась нелинейная фильтрация по закону (5) и адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,1$**

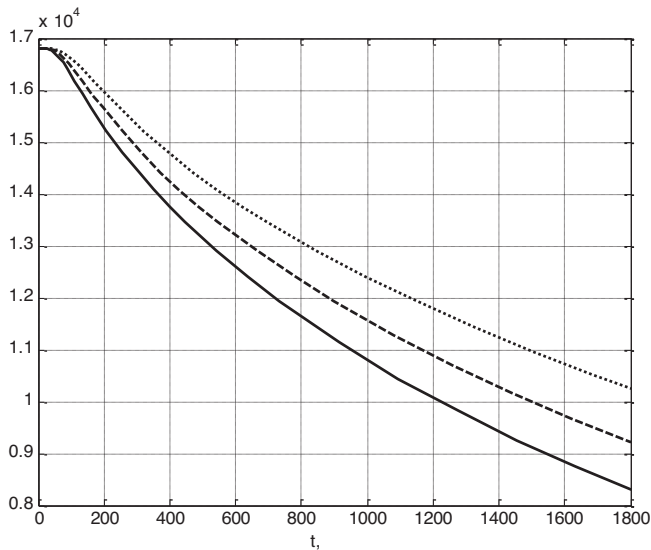
На рис. 6.33 показано, что убыль концентрации в фиксированной точке образца с течением времени тем быстрее, чем меньше концентрация керогена в образце. Можно прийти к заключению, что по мере выхода свободного газа через правую границу образца, связанный в керогене газ десорбируется и отчасти компенсирует убыль концентрации.

На рис. 6.34–6.36 представлено сравнение результатов, полученных с учётом и без учёта зависимости проницаемости неорганической матрицы от давления. Естественно ожидать, что с течением времени давление свободного газа в образце будет приближаться к давлению газа в трещине (на границе). Проницаемость неорганической матрицы при этом будет меняться медленно или практически перестанет меняться. Из приведенных зависимостей видно, что в рассматриваемом диапазоне давлений и интервалов времени учёт нелинейности весьма существен и им не стоит пренебрегать.

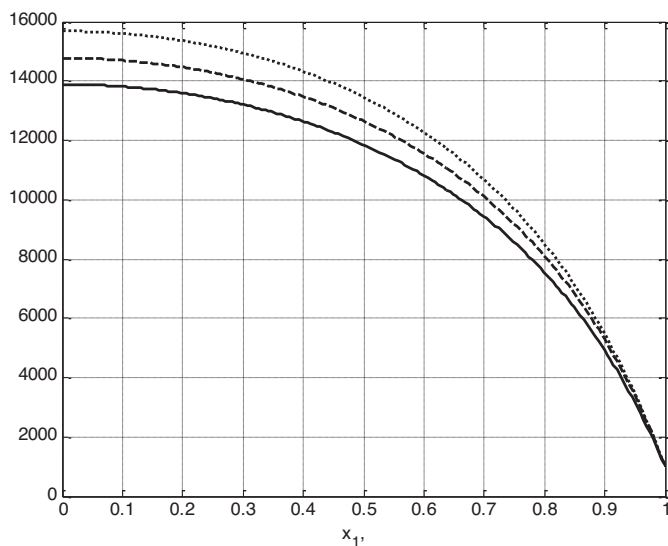




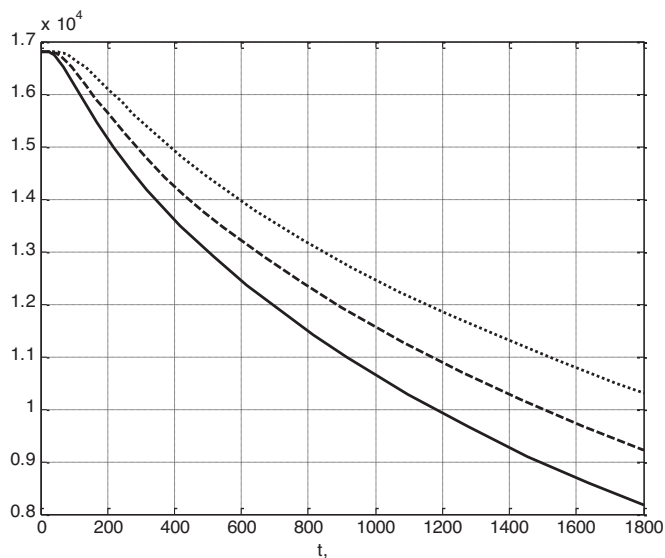
**Рис. 6.30.** Распределение концентрации свободного газа в образце как функция расстояния  $x_1$  от середины образца до его правой границы (трещины) на разные моменты времени. При этом координата  $x_2$  оставалась фиксированной и равной  $x_2 = 0,5$  м, концентрация керогена составляла 10%, рассматривалась нелинейная фильтрация по закону (5) и адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,1$



**Рис. 6.31.** Зависимость концентрации газа в фиксированной точке образца ( $x_1 = 0,5$  м,  $x_2 = 0,5$  м) от времени для разных значений коэффициента  $k$ . Сплошная линия соответствует значению  $k = 0,1$ , штриховая —  $k = 0,4$ , пунктир —  $k = 0,8$ . Рассматривалась нелинейная фильтрация по закону (5), концентрация керогена составляла 10%



**Рис. 6.32.** Зависимость концентрации газа от координаты  $x_1$  на фиксированный момент времени ( $t = 720$  дней) для разных значений концентрации керогена. Сплошная линия соответствует 2% керогена, штриховая — 10%, пунктир — 25%. Рассматривалась нелинейная фильтрация по закону (5) и адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,4$ . Координата  $x_2$  была фиксирована и равна  $x_2 = 0,5$  м



**Рис. 6.33.** Зависимость концентрации газа в фиксированной точке образца ( $x_1 = 0,5$  м,  $x_2 = 0,5$  м) от времени для разных значений концентрации керогена. Сплошная линия соответствует 2% керогена, штриховая — 10%, пунктир — 25%. Рассматривалась нелинейная фильтрация по закону (5) и адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,4$

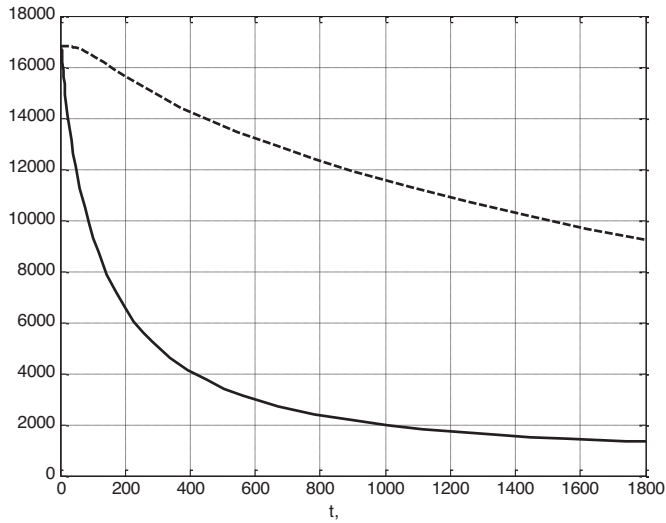


Рис. 6.34. Зависимость концентрации газа в фиксированной точке образца ( $x_1 = 0,5$  м,  $x_2 = 0,5$  м) от времени для разных зависимостей проницаемости неорганической матрицы от давления. Сплошная линия соответствует линейной зависимости  $k = k_0 = \text{const}$ ; штриховая — нелинейной зависимости по закону (5). Рассматривалась адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,4$ , концентрация керогена равнялась 10%

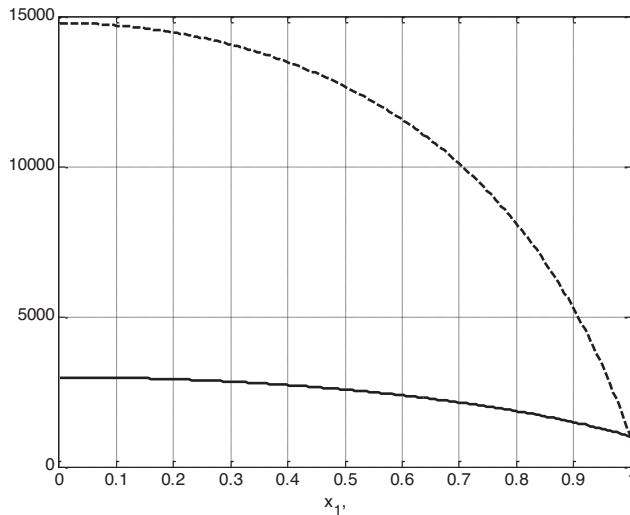
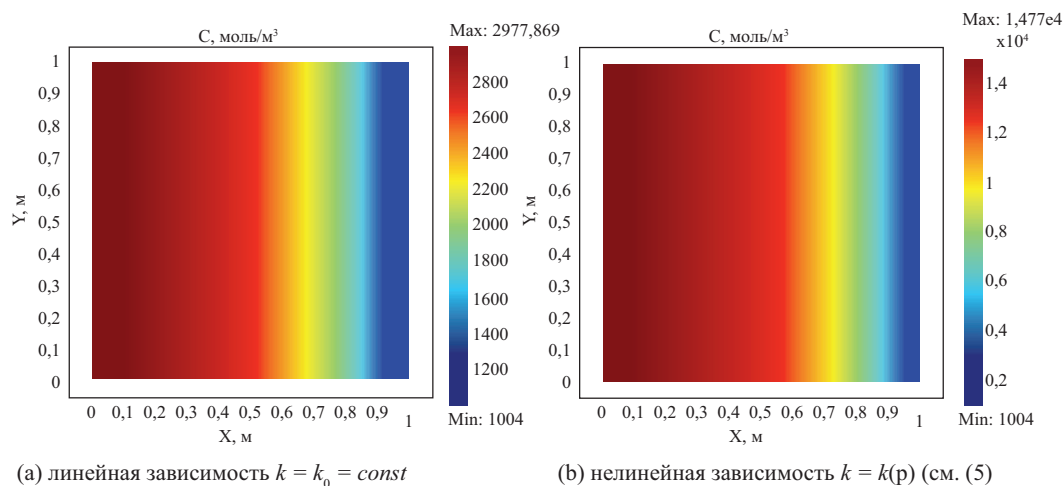
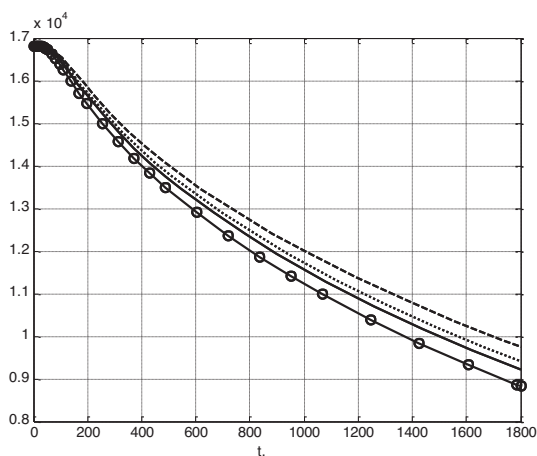


Рис. 6.35. Зависимость концентрации газа от координаты  $x_1$  на фиксированный момент времени ( $t = 720$  дней) для разных зависимостей проницаемости неорганической матрицы от давления. Сплошная линия соответствует линейной зависимости  $k = k_0 = \text{const}$ ; штриховая — нелинейной зависимости по закону (5). Рассматривалась адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,4$ , концентрация керогена равнялась 10%. Координата  $x_2$  была фиксирована и равна  $x_2 = 0,5$  м

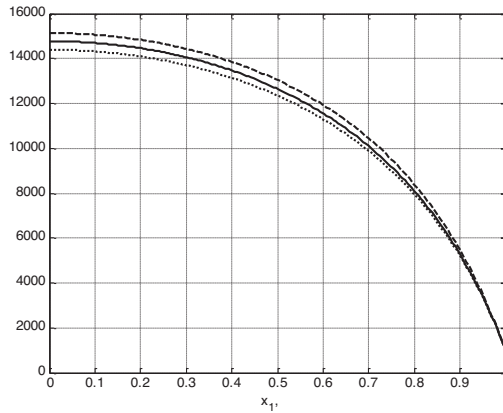


**Рис. 6.36. Распределение концентрации свободного газа в образце на фиксированный момент времени ( $t = 720$  дней) для разных зависимостей проницаемости неорганической матрицы от давления. Рассматривалась адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,4$ , концентрация керогена равнялась 10%**

Далее приведены результаты исследования влияния диффузионного переноса на изменение концентрации газа в образце. Фиксируя концентрацию в матрице и коэффициент диффузии свободного газа, мы исследовали влияние изменения коэффициента поверхностной диффузии  $D_s$ . Результаты приведены на рис. 6.37–6.38. Можно видеть, что при фиксированном значении концентрации керогена чем больше величина  $D_s$ , тем быстрее идет процесс поверхностной диффузии и тем быстрее газ выходит из образца.



**Рис. 6.37. Зависимость концентрации газа в фиксированной точке образца ( $x_1 = 0,5$  м,  $x_2 = 0,5$  м) от времени для разных значений значений коэффициента  $D_s$ . Сплошная линия соответствует значению  $D_s = D_k$ , штриховая —  $D_s = 0,1D_k$ , пунктирная —  $D_s = 10D_k$ . Рассматривалась нелинейная фильтрация по закону (5) и адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,4$ . Концентрация керогена равнялась 10%**



**Рис. 6.38. Зависимость концентрации газа от координаты  $x_1$  на фиксированный момент времени ( $t = 720$  дней) для разных значений коэффициента  $D_s$ . Сплошная линия соответствует значению  $D_s = D_k$ , штриховая —  $D_s = 0,1D_k$ , пунктирная —  $D_s = 10D_k$ . Рассматривалась нелинейная фильтрация по закону (5) и адсорбция по закону Генри с коэффициентом  $k = 0,4$ , концентрация газа в нанопорах равнялась 10%. Координата  $x_2$  была фиксирована и равна  $x_2 = 0,5$  м**

## Выводы

Формирующаяся полость без избыточного давления на данной глубине и при заданных габаритах существовать не может. Поэтому полость и избыточное давление появляются одновременно, причём оно значительно выше атмосферного.

Анализ условий симметрии задачи на ячейке в случае сферического включения газа соответствует пространственной задаче обтекания сферической частицы в направлении оси приложения давления. Фильтрацию вязкого вещества сквозь среду, представляющую собой периодическую систему цилиндрических каналов в жёсткой матрице, ориентированных вдоль направления давления, при этом линии тока параллельны той же самой оси.

Фильтрации вязкого сжимаемого баротропного вещества в недеформируемой среде, представляющей собой периодическую систему цилиндрических проницаемых каналов.

Уравнение состояния используется для связи количества свободного газа в порах с величиной порового давления. В качестве рабочего вещества рассмотрен метан (продукт разложения газогидратов) в диапазоне температур и давлений 300–450 К и 500–8500 psi, соответственно его можно считать идеальным газом, описываемым уравнением состояния в виде.

Представлены некоторые численные результаты для двумерного случая переноса газа в среде, представляющей собой микропористую неорганическую матрицу. При решении задачи предложен двухуровневый алгоритм. Его реализация начинается с численного интегрирования задачи на ячейке и последующего усреднения решений по ячейке периодичности в каждой точке с макроскопическими координатами для каждого значения величины, рассматриваемой как параметр. На следующем этапе реализуется численное интегрирование усредненного уравнения, в котором величины  $d_{ij}^*(x, C^{(0)})$  являются эффективными коэффициентами.

С течением времени давление свободного газа в образце будет приближаться к давлению газа в трещине (на границе). Проницаемость неорганической матрицы при этом будет меняться медленно или практически перестанет меняться. Из приведённых зависимостей



видно, что в рассматриваемом диапазоне давлений и интервалов времени учёт нелинейности весьма существенен.

Описан многомасштабный подход к моделированию процессов переноса газа в горных породах. Разработанная модель позволяет учитывать такие физические процессы, как диффузия и фильтрация свободного газа, десорбцию газа из нанопор с последующим переносом десорбированного газа. Техника многомасштабного усреднения используется для получения макроскопического уравнения с эффективными коэффициентами. Было показано, что усреднённое макроскопическое уравнение сходно по своему виду с нелинейным уравнением диффузии. Величина эффективных коэффициентов определяется деталями строения пород, а именно объёмной концентрацией и пространственным распределением нанопор в неорганической матрице. Немаловажными факторами являются также величины компонент тензора диффузии как свободного, так и десорбированного газа, пористость и проницаемость. Параметры, входящие в изотерму адсорбции, а также возможные нелинейности, связанные с зависимостью физических характеристик (например, проницаемости) от давления, также могут влиять на величины эффективных коэффициентов макроскопической задачи.

Эффективные коэффициенты находятся путём усреднения решения нелинейной краевой задачи, определённой на ячейке периодичности по объёму этой самой ячейки. При вычислениях используется численно-аналитический метод блоков, реализованный в двумерной постановке с учётом рассматриваемой геометрии.

После того как эффективные коэффициенты получены, двумерное макроскопическое уравнение, дополненное соответствующим начальным и граничными условиями, решается численно методом конечных элементов. Решением макроскопической задачи является распределение концентрации свободного газа в пространстве с течением времени. Полученные результаты ясно показывают важность изначально сорбированного количества газа в нанопорах. С увеличением величины объёмной концентрации нанопор в матрице влияние вклада десорбированного газа на транспорт газа в целом становится значительным. Ещё одним важным фактором представляется вклад нелинейности, связанной с зависимостью проницаемости неорганической матрицы от давления. Эта нелинейность проявляется особенно заметно в тех случаях, когда существует значительный перепад в величинах начального давления газа в горной породе и в трещине (трещинах) на границе матрицы. Влияние диффузионных характеристик и характеристик изотермы адсорбции также важно для оценки величин, характеризующих транспорт газовой фазы.

Полученные в результате математического моделирования данные согласуются с результатами исследования Ямальского кратера и позволяют объяснить особенности формирования находящейся под давлением газонасыщенной полости и морфологические особенности образовавшейся вокруг неё зоны деформаций.

Модель фильтрации газа, базирующаяся на представлениях о фильтрации вязкого вещества сквозь среду, представляющую собой периодическую систему цилиндрических каналов в жёсткой матрице, ориентированных вдоль направления давления, по параллельным линиям тока, хорошо согласуется с деформационно-фильтрационным механизмом миграции газа в мёрзлых породах, рассматриваемым в главе 3.

Предложенный многомасштабный подход к моделированию процессов переноса газа в горных породах учитывает такие физические процессы, как диффузия и фильтрация свободного газа, десорбцию газа из нанопор с последующим переносом десорбированного газа, что позволяет проводить расчёты по фильтрации газа в мёрзлых породах.

**Библиография**

1. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука, 1984. 352 с.
2. Богоявленский В.И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 4–10.
3. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Асимптотическое усреднение уравнений Бринкмана в многофазных средах с периодической структурой // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18, № 1. С. 92–110.
4. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Параметрический метод асимптотического усреднения для нелинейных уравнений термоупругости // Механика композиционных материалов и конструкций. 2014. Т. 20, № 4. С. 491–507.
5. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мнушкин М.Г. Программный комплекс «UWay». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2011611833, 28 февраля, 2011 г.
6. Власов А.Н., Мерзляков В.П. Усреднение деформационных и прочностных свойств в механике скальных пород. М.: Изд-во АСВ, 2009. 208 с.
7. Волков-Богородский Д.Б. Применение аналитических расчетов на основе метода блоков в связанных задачах механики сплошных сред // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Инженерные системы-2008», Москва, 7–11 апреля 2008. М.: Изд-во РУДН, 2008. С. 123–138.
8. Волков-Богородский Д.Б. Метод радиальных множителей в задачах механики неоднородных сред с многослойными включениями // Механика композиционных материалов и конструкций. 2016. Т. 22, № 1. С. 19–39.
9. Волков-Богородский Д.Б. Метод радиальных множителей в задачах механики неоднородных сред с многослойными включениями // Механика композиционных материалов и конструкций. 2016. Т. 22, № 1. С. 19–39.
10. Гуревич Г.Р., Брусиловский А.И. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. М.: Недра, 1984. 264 с.
11. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982.
12. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.
13. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства. Л.: Недра, 1985. 240 с.
14. Саваторова В.Л., Талонов А.В., Власов А.Н. Усреднение уравнений фильтрации Бринкмана в слоистой пористой среде // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16, № 4. С. 483–502.
15. Санчес-Паленсия Э. Неоднородные среды и теория колебаний. М.: Мир, 1984. 471 с.
16. Чувилин Е.М., Гребенкин С.И. Изменение газонепроницаемости мерзлых гидратонасыщенных песчаных пород при диссоциации газовых гидратов // Криосфера Земли. 2018. Т. 22, № 1. С. 44–50.
17. Шашенко А.Н., Ковров А.С. Оценка устойчивости естественных и искусственных породных откосов // Геотехническая механика. Вып. 91. С. 43–54.
18. Akkutlu I.Y., Efendiev Y., Savatorova V.L. Multi-scale Asymptotic Analysis of Gas Transport in Shale Matrix // Transport in Porous Media. 2015. 106 (2). DOI 10.1007/s11242-014-0435-z.
19. Ambrose R.J., Hartman R.C., Diaz-Campos M., Akkutlu I.Y., and Sondergeld C.H. Shale Gas in-place Calculations Part I — New Pore-scale Considerations. SPE Journal. 2012. 17 (1), pp. 219–229.

20. Auriault J.-L., “Dynamic behavior of a porous medium saturated by a Newtonian fluid”, *Int J Engng Sc*, v. 18, 775–785, 1980.
21. Auriault J.-L. Heterogeneous medium. Is an equivalent macroscopic description possible // *Int. J. Eng. Sci.*, v. 29, No 7, pp. 785–795, 1991.
22. Auriault J.-L. Upscaling Heterogeneous Media by Asymptotic Expansions // *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 128 (8), pp. 817–822, 2002.
23. Auriault J.-L., Geindreau C., Boutin C. Filtration Law in Porous Media with Poor Separation of Scales. // *Transport in Porous Media*, vol. 60, pp. 89–108, 2005.
24. Auriault J.-L. On the Domain of Validity of Brinkman’s Equation // *Transport in Porous Media*, vol. 79, pp. 215–223, 2009.
25. Bair S., Kottke P. Pressureviscosity relationships for elastohydrodynamics. *Tribol. Trans.*, 2003, v. 46, pp. 289–295.
26. Barus C. Isotherms, isopiestic and isometrics relative to viscosity. *American Journal of Science*, 1893, v. 45, pp. 87–96.
27. Bensoussan A., Lions J.L., Papanicolaou G. Asymptotic analysis for periodic structures. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1978. 700 p.
28. Bridgman P.W. The Physics of High Pressure. London, G. Bell & Sons, 1959, 445 p.
29. Brinkman H.C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles // *Appl. Scient. Res. A* 1, pp. 27–34, 1947 (1).
30. Brinkman H.C. On the permeability of media consisting of closely packed porous particles. // *Appl. Scient. Res. A* 1, pp. 81–86, 1947 (2).
31. Brinkman H.C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions // *J. Chem. Phys.*, v. 20, p. 571, 1952.
32. Childress S. Viscous Flow past a Random Array of Spheres // *J. Chem. Phys.* V. 56, p. 2527, 1972.
33. Darcy H. Les Fontaines Publiques de La Ville de Dijon. Victor Dalmont, Paris, 1856.
34. Dowson D., Higginson G.R. Elastohydrodynamic Lubrication. The Fundamentals of Roller and Gear Lubrication, Pergamon, Oxford, 1977, 235 p.
35. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit designed. // *Quarterly of Applied Mathematics*. 1952. V. 10. № 2, pp. 157–165.
36. Hoek E. Practical Rock Engineering. London: Institution of Mining and Metallurgy. 2002, 325 p.
37. Hoek E., Brown E.T. Underground excavation in rock. London: Institution of Mining and Metallurgy. 1980.
38. Hoek E., Torres C.C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion // *Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, 2002.
39. Mei C.C., Auriault J.-L. Mechanics of Heterogeneous Porous Media with Several Spatial Scales // *Proc. R. Soc. Lond. A*, v. 426, pp. 391–423, 1989.
40. Kannan K., Rajagopal K.R. Flow through porous media due to high pressure gradients. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, v. 199, № 2, pp. 748–759.
41. Kwon O., Kronenberg A.K., Gangi A.F., Johnson B., and Herbert B.E. Permeability of Illite-bearing Shale: 1. Anisotropy and Effects of Clay Content and Loading // *Journal of Geophysical Research — Solid Earth*. 2004, 109 (B10), B10205.
42. Nakshatrala K.B., Rajagopal K.R. A numerical study of fluids with pressure dependent viscosity flowing through a rigid porous media. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 2011, v. 67, № 3, pp. 342–368.

43. Nealer G., Nader W. Practical Significance of Brinkman's Extension of Darcy's Law: Coupled Parallel Flows within a Channel and a Bounding Porous Medium // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 52, August, pp. 475–478, 1974.
44. Popov P., Efendiev Y., Qin G. Multiscale Modeling and Simulations of Flows in Naturally Fractured Karst Reservoirs // *Communications in Computational Physics*, v. 6, № 1, pp. 62–184, 2009.
45. Quintard M., Whitaker S. Transport in ordered and disordered porous media: volume-averaged equations, closure problems, and comparison with experiments. *Chem. Eng. Sci.*, 1993, v. 48, № 14, pp. 2537–2564.
46. Rajagopal K.R. On a hierarchy of approximate models for flows of incompressible fluids through porous solids // *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, v. 17, № 2, pp. 215–252, 2007.
47. Savatorova V.L., Rajagopal K.R. Homogenization of a generalization of Brinkman's equation for the flow of a fluid with pressure dependent viscosity through a rigid porous solid. *ZAMM Z. Angew. Math. Mech.*, 2011, v. 91, No 8, pp. 630–648.
48. Tam C.K.W. The drag on a cloud of spherical particles in low Reynolds number flow // *J. Fluid Mech.*, v. 38, pp. 537–546, 1969.

## ГЛАВА 7.

# ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ГЕОСИСТЕМ В КРИОЛИТОЗОНЕ

### Введение

На территориях развития ММП обнаружено значительное количество разномасштабных газовых скоплений. Промерзание огромных объёмов насыщенных осадочных толщ сопровождалось действием специфических криогенных газоаккумулирующих механизмов: вымораживанием растворённых в подземных водах газов при льдообразовании, образованием газогидратов, концентрацией газов в локальных зонах при движении фронта промерзания. Массовый характер таких проявлений указывает на существование в криолитозоне специфических условий для формирования газовых залежей достаточно крупных размеров. Подобные проявления скоплений газа широко известны во всех российских регионах с интенсивной нефтегазодобычей: в Тимано-Печоре, на севере Западной Сибири, в Западной и Центральной Якутии [Бондарев и др., 2008]. В предыдущих главах было показано, что с газонасыщенными мёрзлыми породами связан значительный комплекс природных образований, процессов и явлений. Они широко распространены в различных генетических типах многолетнемёрзлых и сезонномёрзлых пород и встречаются в виде газовых карманов (бескорневые изометричные газонасыщенные образования), куполов газового вспучивания, газовых «труб» [Миронюк, Отто, 2014; Kraev et al., 2019], зон повышенного содержания газа на территориях, приуроченных к газовым месторождениям, воронок газового выброса, струй газа (сипов) из субаквальных осадков и др. Такое разнообразие прямых и косвенных проявлений газонасыщенных мёрзлых пород требует для своего изучения соответствующего комплекса методов.

### 7.1. Геофизические методы изучения газонасыщенных зон в толще многолетнемёрзлых пород

Наиболее перспективным направлением при изучении зон накопления газов в многолетнемёрзлых породах является использование геофизических методов [Фролов, 1998; Зыков, 2007; Кошурников и др., 2008; Кошурников и др., 2016], поскольку только они позволяют определить местоположение, границы и морфологию этих образований. Геофизические методы изучения криолитозоны основаны на различии физических свойств мёрзлых пород различного состава и строения. К таким методам относятся термометрия, сейсмоакустические и электроразведочные методы. Температура определяет упругие и электрические свойства горных пород криолитозоны. При температурах горных пород ниже 0 °С вода, содержащаяся в порах пород, переходит в твёрдое состояние (лёд), при этом резко возрастают скорости прохождения упругих волн и удельное электрическое сопротивление среды. И сейсмоакустические, и электрические свойства мёрзлых пород будут зависеть не только от температуры, но и от газонасыщенности, дисперсности, льдистости, засоленности грунтов. Эти зависимости определяют круг задач, решаемых геофизическими методами при исследованиях в криолитозоне. Такими задачами являются расчленение разрезов по литологии, выделение линз мёрзлых пород или таликов в мёрзлых толщах, газонасыщенности, определение глубины сезонного протаивания, мощности многолетнемёрзлой толщи и пластовых льдов, картирование жильных льдов, криопэггов. Частным случаем



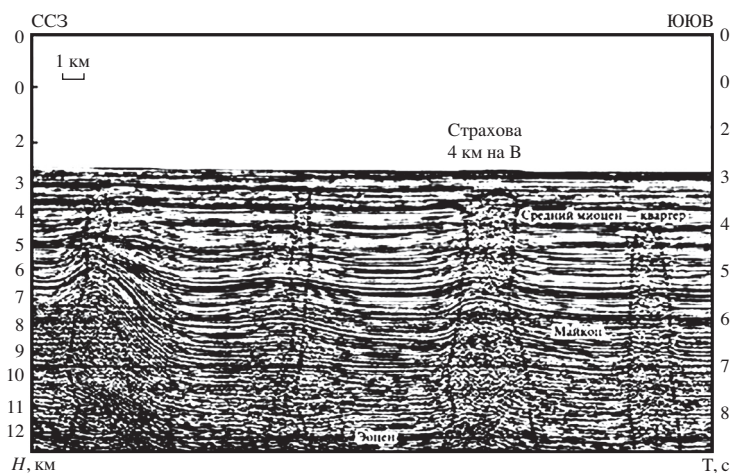
выделения таликов является задача определения границ ореолов оттаивания и растепления вокруг ствола газодобывающих скважин и в окрестности кустовых площадок.

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 отражённых волн [Безродных и др., 2001]. О наличии в грунтах свободного газа свидетельствуют пониженные скорости распространения упругих колебаний. Отражения от границ газосодержащих слоёв 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 мёрзлые льдистые и газонасыщенные грунты (по данным вертикального сейсмического профилирования), изменяются от 800 до 2800 м/с.

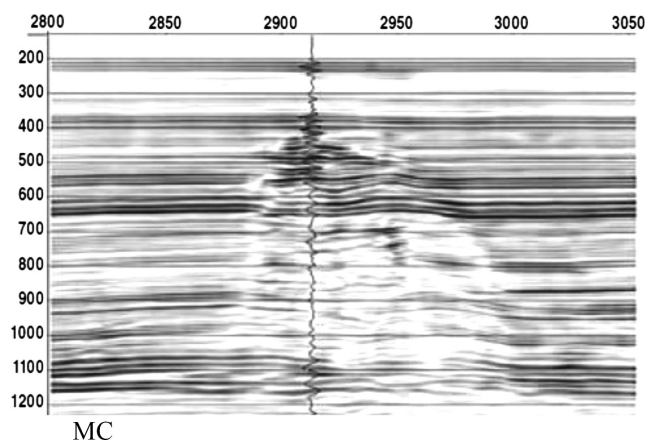
Геофизическими методами картирования областей насыщения осадков газонасыщенными флюидами и газовыводящих путей являются сейсмоакустическое высокочастотное профилирование, эхолотирование и гидролокация бокового обзора. Использование высокочастотных профилографов позволяет установить в стратифицированном разрезе четвертичных осадков участки акустического осветления (blankings) толщи как в виде субсогласных напластованию протяжённых объектов непосредственно над акустическим фундаментом, так и в виде ортогональной 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 [Чамов и др., 2014].

Сейсмоакустическое высокочастотное профилирование пока не применялось при исследовании воронок газового выброса, тем не менее этот метод исследования весьма перспективен поскольку позволяет выделять и чётко фиксировать газонасыщенные породы (рис. 7.1, 7.2).

Широко применяются в геофизике криолитозоны электроразведочные методы, что обусловлено их высокой информативностью, мобильностью и относительно невысокой стоимостью. Среди электроразведочных методов для решения геокриологических задач наиболее часто применяется группа методов сопротивления, в меньшей степени электромагнитные зондирования и методы электрохимической поляризации. В группу методов сопротивления входят вертикальные электрические зондирования в различных модификациях и электропрофилирование на постоянном или низкочастотном токе. Эти методы наиболее эффективны при исследовании разрезов высокого удельного электрического сопротивления, при определении мощности ММТ, пластовых льдов, картировании жильных льдов, таликов в диапазоне глубин от первых метров до первых десятков метров. При необходимости глубинность исследований может быть увеличена до первых сотен метров, однако при этом экспоненциально падает разрешающая способность методов по глубине.



**Рис. 7.1. Субвертикальные геологические тела, связанные с движением восходящих газовых флюидов на временном сейсмическом разрезе МОГТ [Шнюков, Нетребская, 2014]**

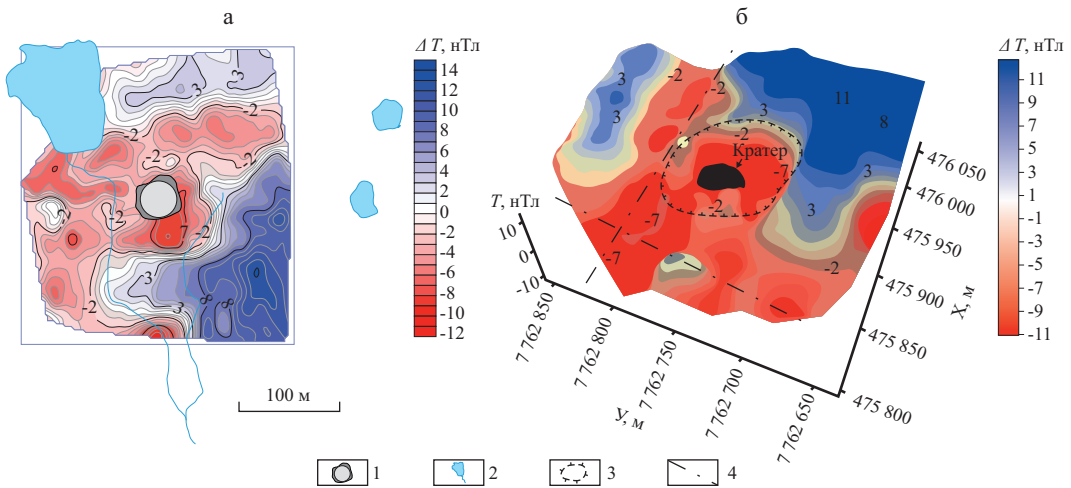


**Рис. 7.2. Газовые карманы на временном разрезе МОГТ в районе Магаданского шельфа [Богоявленский, 2015]**

Электромагнитные зондирования во временной области весьма эффективны в определении электропроводности пород на глубине от нескольких десятков метров до нескольких сотен метров. Зондирования становлением поля (ЗС) представляют собой мощный инструмент для обнаружения в разрезе хорошо проводящих (обладающих низким УЭС) слоёв и объектов. Такими объектами могут быть талики, слои глин, засоленных пород, криопэги, коллекторы минерализованных вод. При электромагнитных зондированиях не требуется устройств гальванических заземлений, поэтому метод менее чувствителен к приповерхностным неоднородностям. А самое главное — существует возможность работать со льда или снежного покрова. При электромагнитных зондированиях глубинности в 100–200 м можно достичь при использовании генераторной петли размером 50×50 м. При выделении

в разрезе проводящих слоёв зондирование становлением поля имеет лучшую разрешающую способность по глубине, чем методы сопротивлений.

На сегодняшний день наиболее информативным в отношении применения геофизических методов для изучения воронок газового выброса является комплекс геофизических методов, включающий электротомографию (ЭТ), зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), магниторазведку и радиометрию, применённый В.В. Оленченко в 2014 г. при исследовании Ямальского кратера. На рис. 7.3 приведена карта изолиний приращения модуля полного вектора магнитной индукции. Магнитное поле изменяется в узких пределах — от  $-11$  до  $+13$  нТл. Кратер расположен в области пересечения линейно вытянутых отрицательных аномалий магнитного поля северо-западного и северо-восточного направлений.

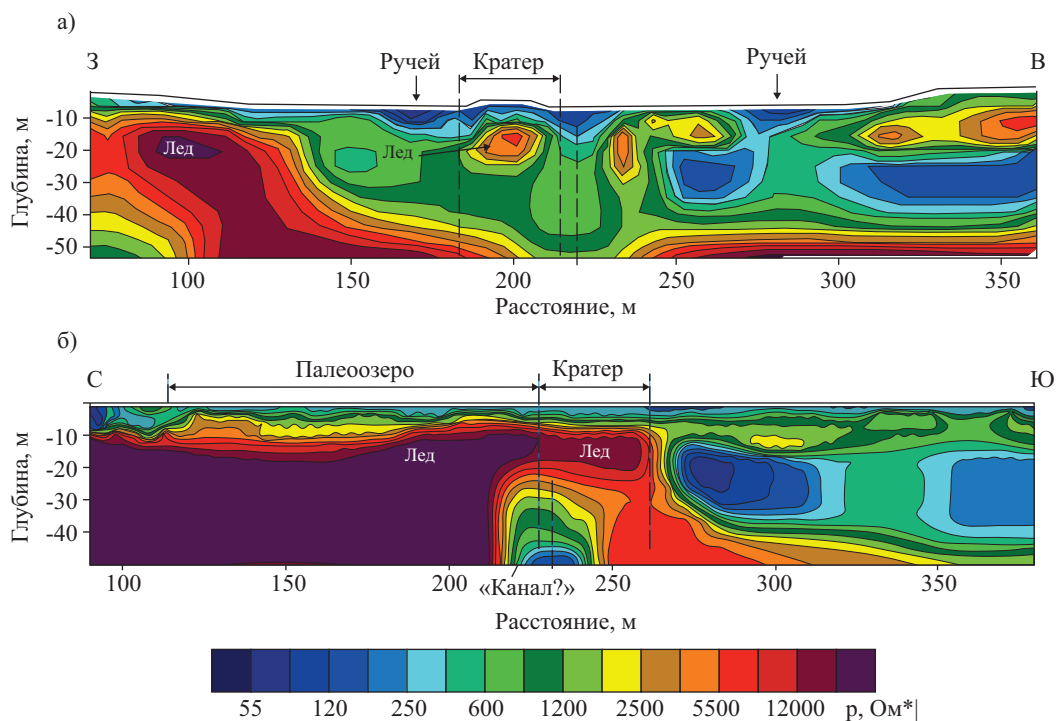


**Рис. 7.3. Карта (а) и поверхность (б) приращения полного вектора магнитной индукции ( $\Delta T$ ):**

**1 — кратер; 2 — гидросеть; 3 — контур изометричной отрицательной аномалии  $\Delta T$ ; 4 — оси линейных отрицательных аномалий  $\Delta T$  [Оленченко и др., 2015]**

На рис. 7.4 приведены геоэлектрические разрезы, сделанные при изучении Ямальского кратера, соответственно по профилю 1 (а) и профилю 7 (б), расположенным примерно в 15 м с южной и восточной сторон кратера. На разрезах с низким удельным электрическим сопротивлением (УЭС)  $100\text{--}250\text{ Ом}\cdot\text{м}$  соответствуют мёрзлые суглинки. Области с УЭС более  $2000\text{ Ом}\cdot\text{м}$  интерпретируются как высокольдистые отложения и лёд. На разрезе по профилю 1 справа от проекции кратера на разрез выделяется субвертикальная зона пониженного УЭС мощностью около 30 м (см. рис. 7.4, а). Несмотря на то что в стенках кратера на видимую глубину (23,1 м) вскрывается лёд, на геоэлектрическом разрезе с южной стороны видно, что обусловленная льдом аномалия локальна, а пластовый лёд в верхней части разреза с южной стороны кратера залегает несплошным слоем. На разрезе по профилю 7 (с восточной стороны кратера) в пределах палеоозера с глубины около 10 м выделяется пластовая залежь льда, нижняя граница которой не установлена (рис. 7.4, б). Экранирующий эффект не позволяет электрическому току проникать через слой изолятора (льда) при наличии обводнённого слоя низкого сопротивления (воды) на

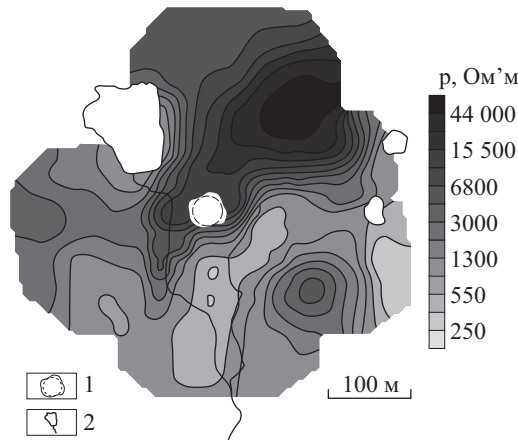
заболоченной поверхности. Рядом с кратером толщину пластового льда можно оценить по мощности слоя высокого УЭС, которая составляет примерно 18 м. В центральной части профиля (интервал 230–260 м) на глубине 30–50 м выделяется вертикальная аномальная область низкого УЭС (менее 500 Ом•м) с горизонтальной мощностью 30 м. Возможно, эта аномалия связана с (талым) подводящим каналом, по которому шла миграция газа к поверхности [Оленченко и др., 2015].



**Рис. 7.4. Геоэлектрические разрезы по профилю 1 с южной (а) и профилю 7 с восточной (б) стороны кратера. Штрих-пунктирные линии — оси вертикальных аномалий пониженного УЭС [Оленченко и др., 2015]**

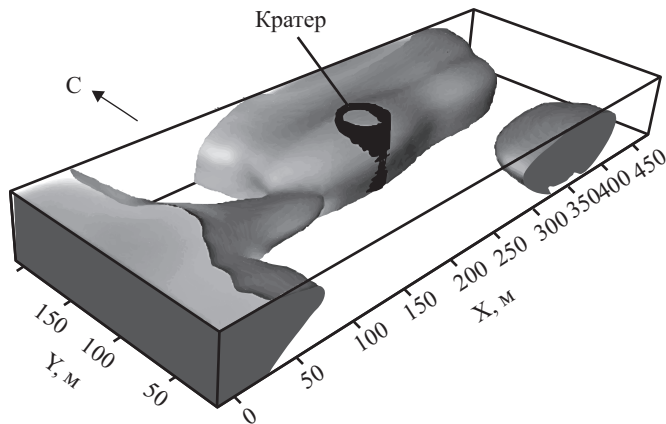
На рис. 7.5 показана карта распределения УЭС, представляющая собой срез трёхмерной модели по глубине 30 м. Северная часть площади характеризуется высоким УЭС (7000–100 000 Ом•м), что связано с распространением пластового льда в пределах палеозера. К югу от кратера вытягивается линейная зона пониженных УЭС (250–800 Ом•м) субмеридионального простираения. Эта зона пространственно совпадает с долиной ручья и может отражать меньшую льдистость пород или большую глинистость. На карте распределения УЭС видно, что кратер расположен несогласно геоэлектрическим структурам, не приурочен ни к одной из выделенных аномалий и прорывает геоэлектрические границы.

Трёхмерная модель распределения УЭС в среде приведена на рис. 7.6. Высокольдистые породы и лёд выделены изоповерхностью УЭС в 2000 Ом•м. Модель наглядно демонстрирует, что кратер образовался в краевой части комплекса пород высокого УЭС. По-видимому, с южной стороны кратера пластовый лёд отсутствует.



**Рис. 7.5. Карта распределения удельного электрического сопротивления на глубине 30 м:**

**1 — кратер; 2 — гидросеть [Оленченко и др., 2015]**



**Рис. 7.6. Трёхмерная геоэлектрическая модель среды. Непрозрачная область — горные породы с УЭС более 2000 Ом·м [Оленченко и др., 2015]**

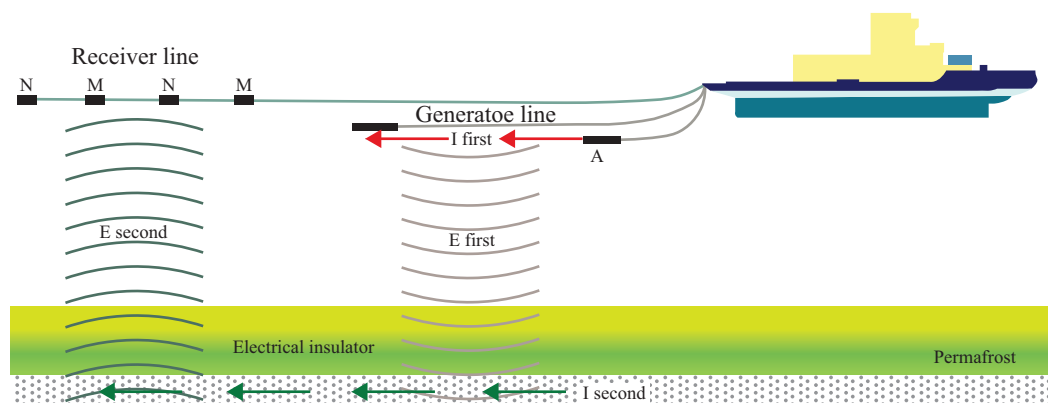
По данным зондирования становлением поля (ЗСП) геоэлектрический разрез на глубину до 200 м через участок исследований аппроксимируется четырёхслойным строением (рис. 89). Первый от поверхности слой имеет УЭС, равное 246–445 Ом·м, и мощность 50–65 м. Поляризуемость  $m$  первого слоя изменяется в пределах 0,12–0,27. Причём в области кратера отмечается контакт пород повышенной (0,27) и пониженной (0,13) поляризуемости. Второй слой аномально высокоомный, с УЭС 400–880 Ом·м, мощностью 7,5–20 м. Ниже, с глубины 55–80 м, залегает проводящий горизонт (7,5–11,0 Ом·м) большой мощности (70–100 м). Как правило, по данным ЗСБ кровля проводящего слоя выделяется с высокой точностью, поэтому глубина залегания выделенного низкоомного горизонта считается достоверной. В интервале глубин 60–80 м отмечается маломощный слой с аномально высоким УЭС (400–880 Ом·м). Аномально высокое значение может



быть объяснено высокой льдистостью или большим количеством включений реликтовых газогидратов (клатратов метана). Как правило, газогидраты залегают в коллекторах, представляющих горизонты с прослоями песка или супеси с пониженным содержанием солей [Чувиллин, 2007].

Опесчанивание разреза, снижение засоленности и присутствие газогидратов сильно увеличивают УЭС слоя, что, вероятно, мы и наблюдаем на геоэлектрическом разрезе по данным ЗСБ. Подстилающим является слой с ещё более низким УЭС (3,4–5,1 Ом•м), залегающий на глубине 135–190 м. Низкие значения УЭС (3–10 Ом•м) объясняются засоленностью пород.

Одним из наиболее актуальных направлений для решения геокриологических задач на глубине 10–1000 м, а также частотных зондирований (ЧЗ) на глубине 1–20 м является ЭМ-зондирование методом ЗСБ. Метод основан на технологии ЭМ-зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) путём создания первичного ЭМ-поля в среде и измерении возникающего вторичного ЭМ-поля, которое зависит от удельного электрического сопротивления (УЭС). Измерение напряжённости вторичного поля на разных периодах позволяет получить информацию о среде на разных глубинах (рис. 7.7).



**Рис. 7.7. Методика выполнения ЗСБ, ЧЗ на шельфе**

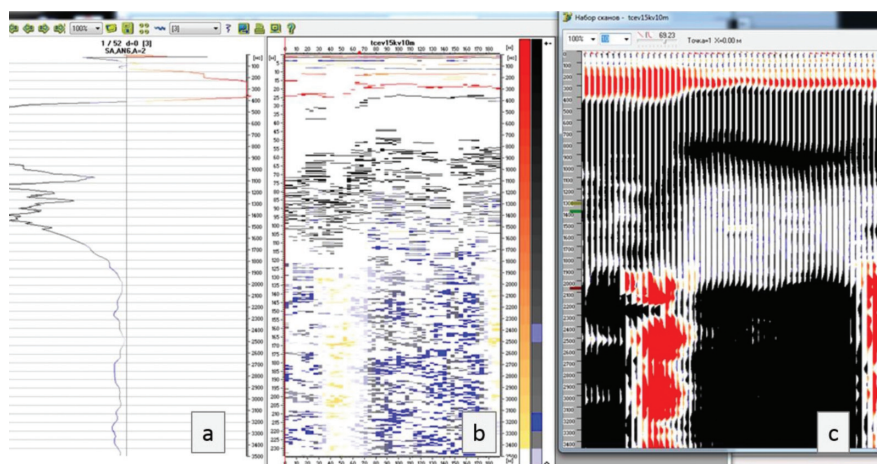
Разработка данного метода даст возможность использовать ЭМ-зондирование для картирования кровли подводной мерзлоты и выделения высокоомного слоя (слоёв) газогидратов [Кошурников и др., 2016]. Отражения от границ газосодержащих слоёв отличаются очень высокой амплитудой сигнала, во много раз превышающей амплитуды отражений от границ раздела грунтов, не содержащих газа. Как показала практика, для обнаружения газонасыщенных пород в верхней 100-метровой толще осадков наилучший результат даёт применение метода отражённых волн глубинной точкой (МОВ-ОГТ) и высокоразрешающая сейсморазведка 2D и 3D [Миронюк, Отто, 2014]. Выявления особенностей залегания подводной мерзлоты и распределения реликтовых мёрзлых толщ (ММП) — одно из актуальных направлений исследований на арктическом шельфе. Одним из перспективных направлений является электромагнитное (ЭМ) зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) путём создания первичного ЭМ-поля в среде и измерения возникающего вторичного ЭМ-поля. Измеряя вторичное ЭМ-поле на разных частотах, можно оценить удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород на разных глубинах. УЭС ММП на несколько порядков превышает УЭС талых пород.

Метод георадиолокации основан на эффектах отражения электромагнитных волн от границ неоднородностей в изучаемой среде, на которых скачкообразно изменяются электрические свойства — электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Основными величинами, измеряемыми при георадиолокации, являются время пробега электромагнитной волны от источника до отражающей границы и обратно до приёмника, а также амплитуды этих отражений. Передающая антенна георадара излучает короткие (единицы и доли наносекунды) электромагнитные импульсы, обеспечивающие высокую разрешающую способность и широкий спектр излучения. Генерируемый электромагнитный импульс отражается от границ находящихся в среде предметов (как металлических, так и неметаллических) или иных неоднородностей, отличающихся по диэлектрической проницаемости или электропроводности. Такими неоднородностями могут быть пустоты, границы слоёв различных пород, области с различной влажностью и т.д. Отражённый сигнал принимается приёмной антенной, преобразуется в цифровой вид и запоминается для дальнейшей обработки. Метод георадиолокации находит широкое применение при изучении верхней части мерзлотного разреза на глубину от 0,5 до 20 м. Многолетнемёрзлая толща, как объект с высоким удельным электрическим сопротивлением, низкой диэлектрической проницаемостью и слабым коэффициентом поглощения электромагнитной волны, является благоприятной средой для применения метода георадиолокации. Граница раздела талых и мёрзлых пород хорошо выделяется на радарограммах по интенсивному отражению электромагнитной волны, амплитуда которого зачастую во много раз превышает амплитуду отражения от литологических границ. Главное преимущество георадиолокационной съёмки — это мобильность и оперативность при высокой разрешающей способности метода по глубине. Георадарные антенны центральной части до 150 МГц достаточно компактные и мобильные устройства, неприхотливые к поверхностным условиям. Работы георадаром могут проводиться в любое время года. Однако, как и любой другой метод, георадиолокация имеет свои ограничения. Применение георадара нецелесообразно при изучении глинистых разрезов или засоленных отложений, не следует ожидать от метода и большой глубинности исследований.

В ходе обследования георадарами ГРОТ 12 и ГРОТ 12Н Ямальского кратера удалось получить первые георадарные данные, соответствующие дну кратера и прилегающих к нему участков. Анализ данных георадиолокационного исследования показывает, что с помощью метода георадиолокации георадарами серии ГРОТ 12 удалось получить детальный разрез от поверхности до глубины более 200 м. С помощью георадара можно анализировать состояние газогидратного слоя, а также определять наличие трещиноватости и тектонических нарушений, которые могут явиться спусковым механизмом для начала разложения газогидратов. На рис. 7.8 видны структуры грунта, имеющие аномалии, связанные с изменением проводимости как по профилю, так и по глубине. На отметках 750–1030 нс проявляются аномалии, имеющие линзовый характер. Для усреднённого значения диэлектрической проницаемости, равной пяти, глубина этих аномалий на данной радарограмме составляет 50–70 м. Отчётливо проявляется граница, связанная с затуханием сигнала на отметке 2000 нс, что при усреднённом значении коэффициента диэлектрической проницаемости, равной пяти, соответствует глубине 135 м. Можно интерпретировать эту границу как границу оттайки многолетнемёрзлых грунтов (ММГ). Проявляющиеся вертикальные аномалии в поведении отражённого сигнала являются следствием имеющихся вертикальных разломов [Волкомирская, 2015].

Полученные данные позволяют идентифицировать слой, который выделяется наличием неоднородных включений, создающих переотражения сигнала. Такая картина характерна для пород с прослоями. В данном случае, анализируя слабое ослабление сигнала внутри

слоя, можно говорить о прослоях песка с газогидратными включениями. Метод георадиолокации позволил определить линзовый характер слоя предположительной газогидратной залежи и локализовать границы линз по характерным признакам затухания отражённого сигнала [Волкомирская, 2015].



**Рис. 7.8. Волновая форма (а), радарограмма в представлении «максмин» (b) и радарограмма сканов (с) профиля tsev15kv10m, пройденного к воронке, выполненного георадаром ГРОТ 12 в представлении программы GROT [Волкомирская, 2015]**

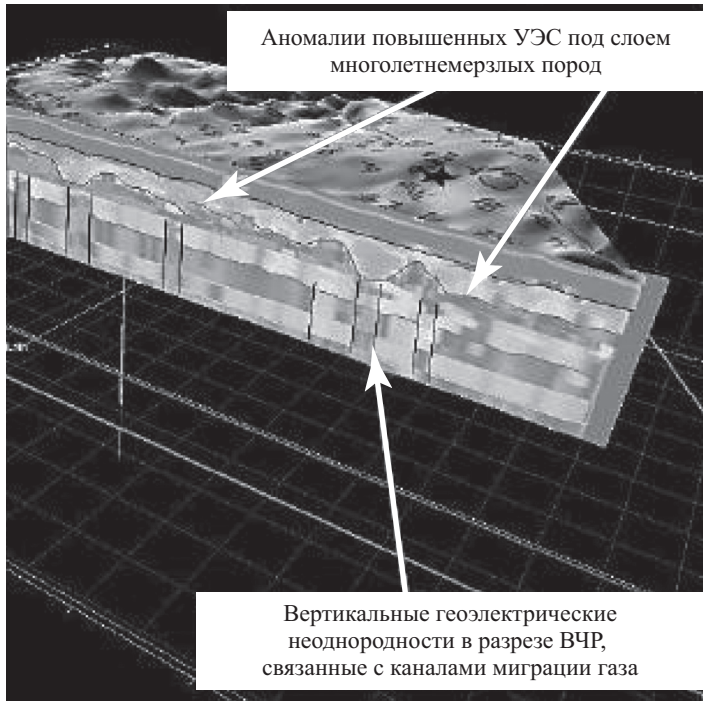
В табл. 7.1 приведены наиболее эффективные геофизические методы определения местоположения, глубины залегания и формы неоднородностей криогенного строения многолетнемёрзлых пород.

**Таблица 7.1. Определение местоположения, глубины залегания и формы локальных неоднородностей геофизическими методами [СП 11-105-97, 2000]**

Задачи исследований	Геофизические методы	
	Основные	Вспомогательные
Зоны газонасыщенных мёрзлых пород	МОГТ, ЭП, ВЭЗ, ВЭЗ, МДС, МПВ, георадиолокация, различные виды каротажа	ВЭЗ ВП, ДЭМП, ЧЭМЗ
Пластовые льды и грунты с льдистостью более 0,4	ЭП, ВЭЗ, ВЭЗ МДС, МПВ, георадиолокация, различные виды каротажа	ВЭЗ ВП, ДЭМП, ЧЭМЗ
Повторно-жильные льды	ЭП, ЭП МДС, георадиолокация, различные виды каротажа	ДЭМП, ЧЭМЗ
Талики, состав грунтов, их обводненность	ЭП, ВЭЗ МДС, МПВ	ПС, ВЭЗ ВП

**Обозначения:** ЭП — электропрофилеирование; ВЭЗ — вертикальное электрическое зондирование; ВЭЗ МДС — вертикальное электрическое зондирование по методу двух составляющих; ЧЭМЗ — частотное электромагнитное зондирование; ЭП МДС — электропрофилеирование по методу двух составляющих; ДЭМП — дипольно-электромагнитное профилирование; ВЭЗ ВП — вертикальное электрическое зондирование вызванных потенциалов; ПС — естественное электрическое поле; УЭС — удельное электрическое сопротивление; МЗТ — метод заряженного тела; ЕИЭМПЗ — естественное импульсное электромагнитное поле Земли; МПВ — сейсморазведка методом преломленных волн; МОВ — сейсморазведка методом отражённых волн; МОГТ — сейсморазведка методом общей глубинной точки; ВСП — вертикальное сейсмическое профилирование; ОГП — сейсморазведка методом общей глубинной площадки.

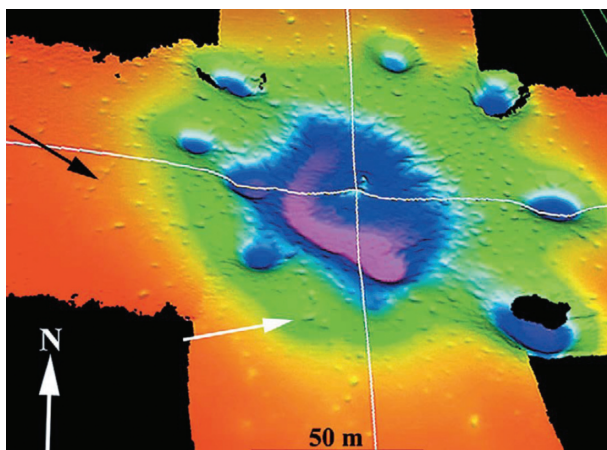
**Геоэлектрические модели** растущих бугров пучения показали, что непосредственно под некоторыми из них располагаются зоны разуплотнения, связываемые с каналами миграции газа (рис. 7.9). Такая связь носит систематический характер и явно не является случайной. Одним из признаков эндогенного влияния на формирование бугров пучения следует считать выбросы газа, которые происходят именно в местах расположения этих бугров. По данным электромагнитных исследований на участках увеличения мощности ММП под буграми пучения предполагается наличие залежей газогидратов, сформировавшихся, вероятно, за счёт поступления газа по каналам миграции [Мисюркеева и др. 2017].



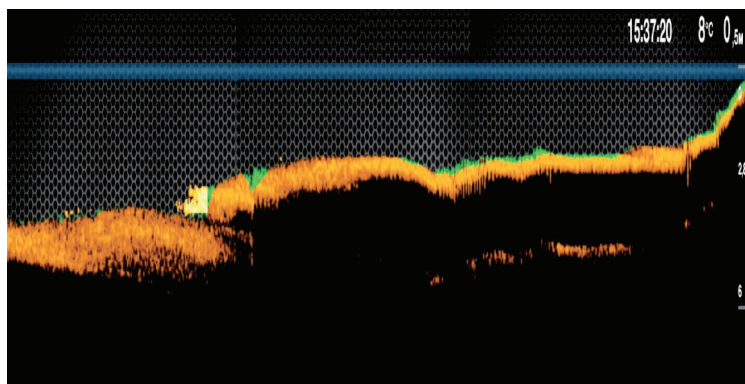
**Рис. 7.9. Геоэлектрическая модель верхней части разреза (ВЧР) с вертикальными каналами миграции углеводородов [Мисюркеева и др., 2017]**

Цифровая модель рельефа (ЦМР) является важнейшим компонентом базы пространственных данных геоинформационных систем (ГИС) различной направленности. Моделирование рельефа дна крупных акваторий всегда проводится в условиях дефицита данных гидрографического промера, поэтому необходимо использовать имеющуюся геолого-геоморфологическую информацию. Построенная цифровая модель отражает рельеф дна в заданном масштабе без потери первоначальной степени детальности, выраженной в исходных изобатах. Кроме этого, ЦМР дна даёт возможность строить профили с любой частотой и в любом направлении, а также использовать средства морфометрического анализа в ГИС (расчёт углов наклона и пр.). При создании карт наличие цифровой модели позволяет в полном объёме использовать современные геоинформационные (картографические) технологии (рис. 7.10).

При изучении динамики донной поверхности хорошие результаты даёт использование эхолота-глубиномера (рис. 7.11).



**Рис. 7.10. Вид цифровой модели рельефа дна для одной из серий «семейств покмарок» в Норвежской котловине рядом с месторождением Троль [Богоявленский и др., 2018]**



**Рис. 7.11. Эхограмма зондирования дна в озере [Богоявленский и др., 2015]**

#### **7.1.1. Комплекс геофизических методов для изучения ореолов оттаивания и растепления мёрзлых пород вокруг скважин и на территории кустовых площадок**

Комплекс методов для изучения ореолов оттаивания и растепления мёрзлых пород вокруг скважин и на территории кустовых площадок включает электротомографию, георадиолокацию, скважинную термометрию и может быть дополнен сейсморазведкой.

Электроразведочные работы на кустовых площадках имеют ряд специфических особенностей. Во-первых, это большое количество металлических конструкций, создающих электрические аномалии. Во-вторых, железобетонные плиты, осложняющие устройства заземлений. В-третьих, конструкции газосборной сети в приустьевой зоне, затрудняющие перемещения геофизических приборов. Высокий уровень электромагнитных помех и неконтролируемое распределение прямого электромагнитного поля в присутствии газосборного коллектора делают невозможным применение метода зондирования становлением поля для изучения геокриологического строения пород под кустовой площадкой. Таким образом, метод ЗС не рекомендуется включать в комплекс методов по изучению



ореолов оттаивания и растепления мёрзлых пород вокруг скважин и на территории кустовых площадок.

Метод электротомографии достаточно успешно решает геокриологические задачи, такие как выделение высокольдистых и газонасыщенных грунтов и пластовых льдов в разрезе, определение зон растепления, картирование засоленных грунтов и криопёгов. С учётом особенностей измерений в присутствии металлических объектов метод рекомендуется в комплекс для изучения ореолов оттаивания и растепления на кустовых площадках.

Метод ЭТ предлагается использовать для определения границ оттаивания приустьевых зон, для мониторинга состояния грунтов в основании кустовой площадки, а также для определения контуров растепления грунтов.

Георадарная съёмка показала высокую эффективность при обследовании приустьевых зон. Однако глубинность таких исследований ограничена первыми метрами. Метод георадиолокации рекомендуется для обследования околоскважинного пространства, определения границ оттайки и растепления в приустьевой зоне и положения кровли ММП в пределах кустовой площадки. В дополнение к методам ЭТ и ГРЛ рекомендуется использовать сейсморазведочные работы на SH-волнах. Эта методика показала высокую эффективность при исследованиях криолитозоны [Скворцов и др., 2006; Мельников и др., 2010]. Наземные геофизические исследования необходимо дополнять скважинной термометрией.

## 7.2. Исследование состава и свойств пород, слагающих флюидодинамические геосистемы

Прямое исследование состава и свойств пород, слагающих флюидодинамические геосистемы, находящиеся в подземном состоянии, проводится с помощью различного рода горных выработок.

Проходка горных выработок осуществляется с целью:

- установления или уточнения геологического разреза, условий залегания грунтов и подземных вод;
- изучения глубин сезонного оттаивания и промерзания;
- изучения мощности мёрзлых грунтов и характера их залегания, состава и криогенного строения, выявления и оконтуривания повторно-жильных и пластовых льдов, криопёгов, исследования геологических, инженерно-геологических, криогенных процессов и образований;
- изучения температурного режима;
- отбора образцов грунтов для определения их состава, состояния, криогенного строения и свойств, а также проб подземных вод для их химического анализа.

Выбор вида, глубины бурения необходимо производить с учётом особенностей геокриологических условий — состава, льдистости, температуры и мощности многолетнемёрзлых грунтов, но не менее 10–20 м. При бурении следует применять колонковое механическое бурение «всухую» со сплошным отбором образцов ненарушенной структуры, позволяющее при описании фиксировать расположение и толщину ледяных включений, определять их суммарную толщину, отбирать образцы мёрзлых грунтов для лабораторных определений.

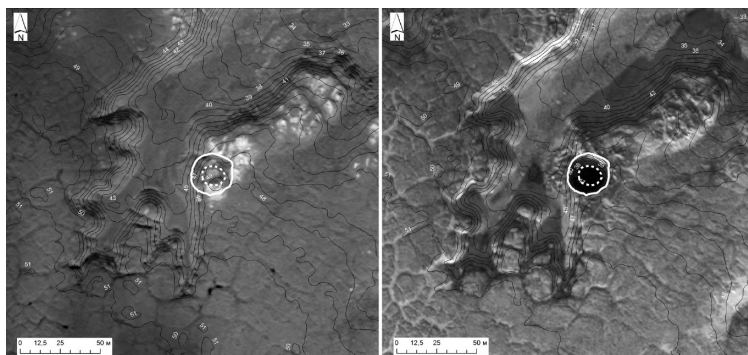
Шурфы следует проходить в случае невозможности отбора образцов мёрзлых грунтов ненарушенного сложения при бурении скважин.

### 7.3. Изучение структурно-текстурных особенностей флюидодинамических геосистем в геологических обнажениях

Основным методом изучения строения воронок газового выброса является структурно-текстурный анализ стенок геологических обнажений. Полевое изучение геологического обнажения должно выявить условия залегания слоёв, их выдержанность, нарушения в различных направлениях, группировки в определённые пачки. Описываются пачки однородных слоёв, а также характеристики отдельных слоёв в пределах описываемой пачки [Спиридонов, 1970]. Стандартные методы описания воронок газового выброса не эффективны из-за их значительных вертикальных размеров, крутизны и разной ориентации их стенок. В этих условиях наиболее эффективным может оказаться использование радиоуправляемых малых летательных аппаратов для проведения многоуровневой съёмки развёртки стенок воронки с переменным принудительным освещением её внутренней поверхности и выкладкой вертикальных масштабных лент. Следует максимально использовать многократное фотографирование и видеосъёмку стенок воронок с различных ракурсов, чтобы обеспечить съёмку всей поверхности. При фотографировании и видеосъёмке необходимо использовать хорошо различимые масштабные знаки, позволяющие определять размеры структурно-текстурных элементов и их пространственную ориентировку. Эти работы должны включаться как обязательные при планировании полевых работ.

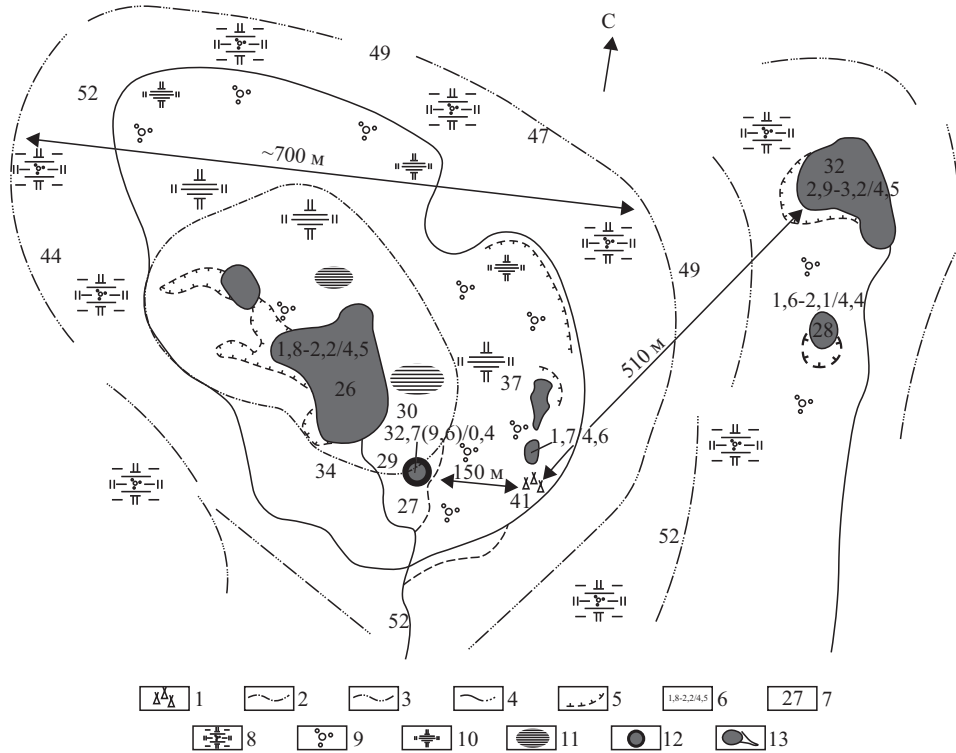
### 7.4. Методы инженерно-геологических изысканий при изучении морфологии поверхностных субэдральных образований, связанных с динамическими процессами в многолетнемёрзлых породах (на примере изучения воронок газового выброса)

Анализ разновременных космических снимков является одним из самых эффективных способов оценки динамики природной среды в местах развития воронок газового выброса. Для этого подбираются снимки, предшествующие взрыву, и снимки, соответствующие этапу после взрыва. Анализ ЦМР, построенных на основании высокдетальных космических снимков, позволяет уверенно выявлять даже небольшие бугры высотой 1–2 м, предшествующие образованию воронок газового выброса (рис. 7.12).



**Рис. 7.12. Космические снимки ключевого участка расположения АнТВГВ с наложенными горизонталями по построенным ЦМР: слева — снимок WorldView-2 от 21.08.2013 (до образования воронки); справа — снимок WorldView-1 от 11.10.2014 (после образования воронки). Сплошной белой линией обозначена бровка воронкообразной верхней части АнТВГВ, пунктирной белой линией — бровка цилиндрической части по состоянию на 11.10.2014 [Кизяков и др., 2017]**

Весьма ценными оказываются также традиционные геоморфологические исследования, выполненные по классическим схемам. Пример оформления результатов подобных работ приведён на рис. 7.13.



**Рис. 7.13. Геоморфологическая схема участка исследований:**

1 — полевой лагерь; 2 — берег палеозера № 1; 3 — берег палеозера № 2; 4 — водоразделы; 5 — криогенные оползни и сплывы, термокарст; 6 — глубина (м)/температура (°C) в озере или кратере; 7 — абсолютные отметки дневной поверхности; 8 — кустарничковая, редко мохово-лишайниковая, растительность, мелкобугристая тундра (полярная березка, ягодные кустарнички, осока, мхи, лишайники); 9 — кустарниковая растительность, ложбины стока, долины водотоков, подножия крутых склонов (разнотравный ивняк, ерник высотой 0,5–1,0 м, реже до 2 м); 10 — мохово-лишайниковая, осоковая, редко кустарничковая растительность (днища палеозер, склоны оврагов); 11 — осоковая, редко мохово-лишайниковая растительность, болото (днища палеозер, русла и долины водотоков); 12 — кратер; 13 — гидросеть [Оленченко и др., 2015]

## 7.5. Геохимические исследования

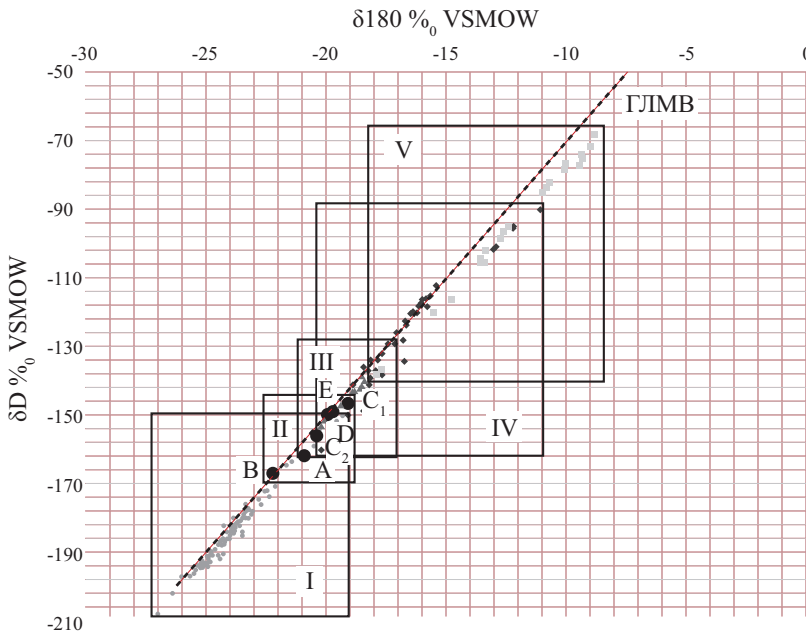
Наиболее полно изотопный состав многолетнемёрзлых пород и льдов из воронок газового выброса рассмотрен в работе И.Д. Стрелецкой с соавторами [Стрелецкая и др., 2017] (рис. 7.14). Ими проанализированы химический и изотопный составы различных структурных элементов самого изученного из рассматриваемых объектов — Ямальского кратера.

На момент опробования разрез стенок воронки выглядел следующим образом. В «раструбе» ВГВ (горизонт А) вскрывались субвертикально ориентированные прослои льда толщиной 1,0–3,0 см с включениями блоков минеральных частиц размером 2–4 мм, чередовавшиеся с прослоями чистого льда толщиной 0,5–1,0 см. С глубины 7 м в перегибе стенки к цилиндрической части залегала линза льда горизонта В мощностью до 3 м с большим количеством пузырьков воздуха и редкими тонкими (толщиной около 1 см) прослоями мутного за счёт минеральных включений льда. Лёд цилиндрической части (горизонт С) на глубине примерно от 10 до 25 м представлял собой вертикально-слоистую толщу: лёд с минеральными включениями чередовался с прослоями чистого льда толщиной от 0,5–1 до 2 см. Пузырьки газа во льду практически отсутствовали.

Результаты комплексного химического анализа образцов пород сезонноталого слоя бруствера и по профилю от кратера воронки по 13 компонентам показали практически неизменные их значения. Существенные вариации значений установлены только для иона хлора. Содержание хлор-иона в породах, слагающих бруствер, изменялось от 16,4 до 23,3 мг/кг, а в отложениях верхней части сезонноталого слоя сначала увеличивалось по мере удаления от воронки до 81,8 мг/кг на расстоянии 26 м, а дальше уменьшалось до 55,8 мг/кг на расстоянии 41 м и до 31,4 мг/кг на расстоянии 56 м от ВГВ. Лёд стенок воронки и вода из озера пресные и практически не содержат солей при pH 6,5–7,1. Минерализация льда слоя А не превышает 0,18 г/л, с глубины 6,0 м (слои В и С) минерализация льда меньше и составляет 0,01–0,1 г/л. Вода из озера имеет минерализацию в два раза больше — 0,29 г/л (слой D). В составе ионов водорастворимых солей во льду слоёв А, В и С преобладает гидрокарбонат-ион (45–81%), а в воде озера (слои D и E) гидрокарбонат-ион составляет 57%. Ионов хлора в растворах оказалось меньше, чем гидрокарбонатов, их количество не превышало 42%. Количество сульфат-иона во льду и воде озера ещё меньше — 5%. Количество ионов натрия меняется от 28 до 70%. Во льду (слои А, С) и воде (D) ионы натрия преобладают над остальными, но для льда горизонта В среди катионов преобладает кальций-ион, его почти в два раза больше (44%), чем натрий-иона (28%). В остальных образцах льда количество кальций-иона не превышало 13%, а в воде озера ионов кальция было ещё меньше — 5%. Во льду слоя С количество ионов кальция изменялось от 3 до 23% в образцах, отобранных из одного монолита. Количество ионов магния во льду и воде озера изменялось в диапазоне от 20 до 33% и максимальных своих значений достигало на глубине 23,8 м. Минерализация льда стенок воронки 0,01–0,18 г/л, как и у большинства пластовых залежей Ямала не превышает 0,3 г/л по 168 пробам [Фотиев, 1999] и соответствует минерализации слоистого пластового льда в районе полярной станции Марре-Сале (0,04–0,18 г/л) [Стрелецкая и др., 2013]. В составе ионов водорастворимых солей во льду воронки, как и в целом для ультрапресных пластовых льдов Ямала, половина анионов приходится на гидрокарбонат-ион. Количество хлор-иона (14–42%) и сульфат-иона (5–13%) во льду стенок воронки такое же или несколько меньше, чем в пластовых льдах Ямала (в среднем 37 и 13% соответственно). Магний-иона во всех образцах льда стенки воронки было столько же, сколько в слоистых пластовых льдах в районе Марре-Сале, и столько же ионов натрия и калия (54–70%), но в два раза меньше ионов кальция. Исключение составляет лёд слоя В: количество кальций-иона в нём достигает 44%, что является косвенным свидетельством участия атмосферных вод в формировании этого ледяного тела.

Значения изотопного состава льда стенок воронки и воды из озера в воронке сопоставлены со значениями изотопного состава подземных льдов района Марре-Сале и гло-

бальной линией метеорных вод. Значения содержания изотопов  $^{18}\text{O}$  (‰) во льду стенок воронки изменяются от  $-22,5$  до  $-18,4$ , D от  $-172,0$  до  $-142,0$ , а дейтериевый эксцесс (dexs) — от  $5,7$  до  $10,7$ . Для воды из озера внутри воронки значения содержания изотопов от 25 августа 2014 г. составляли для  $^{18}\text{O}$  —  $-19,9\text{‰}$  (слой E), а через несколько месяцев, 9 ноября 2014 г. —  $-19,7\text{‰}$  (слой D), т. е. мало изменились. Значения содержания изотопов воды тундровых озёр в районе воронки изменялись в большей степени для  $^{18}\text{O}$  (‰) от  $-14,5$  до  $-11,5$ , для D от  $-111,2$  до  $-89,6$ , среднее значение dexs составило  $3,5$ . Изотопный состав льда стенок грота на глубине  $23,8$  м (слой C) и лёд слоя A характеризовались близкими значениями, лёд слоя B отличался более легким составом и наибольшим дейтериевым эксцессом (среднее значение dexs составило  $10,5\text{‰}$ ). Значения стабильных изотопов льда стенки воронки и в слоистых пластовых льдах в районе Марре-Сале оказались в близком диапазоне, как и значения дейтериевого эксцесса.



**Рис. 7.14. Изотопный состав подземных льдов в районе метеостанции Марре-Сале, подземных льдов воронки газового выброса и озерной воде в воронке. Диапазоны значений изотопного состава: I — полигонально-жильные льды неоплейстоценового возраста, Марре-Сале; II — пластовый лёд из стенок воронки; III — слоистый пластовый лёд, Марре-Сале; IV — полигонально-жильные льды голоценового возраста, Марре-Сале; V — пластовый стекловидный лёд, Марре-Сале. Черными точками показаны значения изотопного состава льда стенок воронки и воды в озере. Буквы соответствуют горизонтам льда (A, B, C) и уровням воды в кратере: D — август 2014 г.; E — ноябрь 2014 г.; ГЛМВ — глобальная линия метеорных вод [Стрелецкая и др., 2013]**

Показания портативного газоанализатора, настроенного на определение содержания метана в атмосфере, в июне 2014 г. увеличивались с глубиной от  $0,3\text{--}2,8$  до  $9,6\text{--}9,8\%$



(26 000–98 000 ppmV) при измерении от поверхности до придонного воздуха в ВГВ. В ноябре 2014 г. значения содержания метана в воздухе в ВГВ составляли 8–16 ppmV по двум образцам, что во много раз меньше. В то же время метана в воздухе ВГВ оставалось в несколько раз больше, чем в атмосфере, для которой среднее значение метана составляет 2 ppmV. Во льду больше всего метана обнаружено в слое А, где его количество в пузырьках воздуха составляло от 683,5 до 1794,5 ppmV, в среднем 1286,5 ppmV. Ниже, соответственно в слоях В и С, количество метана в воздушных пузырьках по разрезу почти в 50 раз меньше и незначительно меняется по глубине, в среднем составляя 19,0 ppmV. Количество метана в пузырьках льда с одной и той же глубины (18,6 м) на расстоянии 2 м менялось на 10 ppmV в зависимости от количества включённых пузырьков и минеральных примесей во льду. Более чистый стекловидный лёд содержал 28,4 ppmV (в среднем по шести образцам), а лёд с суммарно большим количеством минеральных включений только 19,6 ppmV (в среднем по пяти образцам). Содержание метана в воздушных пузырьках во льду стенок воронки превышает его значения в воздухе ВГВ. Концентрация метана во льду стенки воронки в немногих проанализированных образцах на порядок меньше, чем в слоистых пластовых льдах в районе Марре-Сале [Васильев и др., 2015]. Высокое содержание метана в пластовых льдах является результатом его миграции из вмещающих пород и концентрирования в ледяном теле. В случае ВГВ метан, видимо, концентрировался и заполнял полость, которая фиксируется по наличию «грота» внутри ледяного тела. При образовании воронки метан полностью вышел на поверхность и смешался с воздухом. О том, что в воронке находился газ, в том числе метан, свидетельствуют большие значения концентрации газа, зафиксированные газоанализатором при первом посещении воронки в августе 2014 г., и повышенное содержание метана в воздухе внутри воронки, установленное в ноябре 2014 г. В пузырьках воздуха во льду слоя А метана было во много раз больше, чем в атмосфере.

При поиске и выделении газонасыщенных зон в мёрзлых породах высокую эффективность показали методы геохимических исследований. Эти исследования проводятся по профилям, секущим выявленные участки предполагаемых нефтегазоносных структур. Наземные геохимические исследования проводятся преимущественно по линиям сейсмических профилей и по естественным водотокам с отбором проб почв, придонных вод. Пробы газа отбираются в приземном слое воздуха, в шурфах глубиной 0,2–0,4 м, в мелких скважинах глубиной до 2 м. В водоёмах исследуются образцы придонных слоёв воды и верхние слои осадков. По итогам проведённых исследований выделяются аномальные зоны содержания углеводородных газов, которые соответствуют областям повышенного содержания углеводородных газов в мёрзлых породах.

## Выводы

При планировании работ по изучению геосистем газонасыщенных многолетнемёрзлых пород исследования должны соответствовать определённым критериям:

- учитывать гипотезу происхождения изучаемой геосистемы;
- быть комплексными, включать несколько взаимодополняющих методов;
- работы должны обязательно включать в себя изучение состава и строения как самих газонасыщенных пород, так и вмещающих пород;
- набор методов должен соответствовать морфологическим структурным особенностям объекта, а также предполагаемым (в рамках принятой гипотезы) процессам формирования геосистемы.

## Библиография

1. Безродных Ю.П. Применение сейсмоакустических и сейсмических методов для изучения газонасыщенности грунтов Северного Каспия // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеохимия. Геокриология. 2001. № 5. С. 476–480.
2. Богоявленский В.И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 4–10.
3. Богоявленский В.И., Мажаров А.В., Пушкарёв В.А., Богоявленский И.В. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // Бурение и нефть. 2015. № 7. С. 8–13.
4. Богоявленский В.И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1 (29). С. 48–54. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.
5. Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Зверева В.Б., Облеков Г.И., Шайдуллин Р.М., Гудзенко В.Т. Газогеохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал (на примере Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2008. № 5. С. 22–34.
6. Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е. Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465, № 5. С. 604–607.
7. Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Гулевич О.А., Сахтеров В.И. Результаты обследования малококонтрастных газогидратных включений на полуострове Ямал георадаром ГРОТ 12Н // Материалы V Всероссийских Армандовских чтений, V Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Всероссийская конференция «Практическая радиолокация». Муром, 2015. С. 44–50.
8. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 2007.
9. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Лейбман М.А. Оценка рельефообразующего эффекта образования Антипаютинской воронки газового выброса по данным спутниковой стереосъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 67–75.
10. Кошурников А.В., Зыков Ю.Д., Пушкарев П.Ю., Хасанов И.М. Электромагнитные исследования при инженерно-геологических изысканиях в криолитозоне // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 25–26.
11. 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. Т. 469, № 5. С. 616–620.
12. 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 геофизических методов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 169–177.
13. Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А. Модель формирования бугров пучения по электромагнитным данным. XXVII Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» 22–28 мая 2017 г. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. С. 151–152.
14. Миронюк С.Г., Отто В.П. Газонасыщенные морские грунты и естественные газовы-

- деления углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений // Геориск. 2014. № 2. С. 8–18.
15. Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю., Ельцов И.Н., Кушнарченко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В., Эпов М.И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 4. С. 94–106.
  16. Скворцов А.Г., Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Сметанин Н.Н., Украинцева Н.Г. Мониторинг напряженно-деформированного состояния берегового склона на геокриологическом стационаре «Болванский» с помощью сейсморазведки // Криосфера Земли. 2006. Т. X, № 2. С. 46–55.
  17. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV: Правила производства работ в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов. 2000.
  18. Спиридонов А.И. Основы общей методики геоморфологических исследований и геоморфологического картирования. М.: Высшая школа, 1970. 455 с.
  19. 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 // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 2017. № 2. С. 91–99.
  20. Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. Т. III, № 2. С. 40–65.
  21. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино: ОНТИ ПНЦ, 1998. 515 с.
  22. 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 звуко-рассеивающих объектов водной толщи в Российском секторе Баренцева моря // Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата: сб. тезисов Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2014. С. 101–102.
  23. Чувилин Е.М., Перлова Е.В., Баранов Ю.Б. и др. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М.: ГЕОС, 2007. 137 с.
  24. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. Грязевой вулканизм // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. № 2. С. 66–79.
  25. 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). p. 67

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование геосистем газонасыщенных мёрзлых пород происходит как на локальном, так и на региональном уровне. На локальном уровне геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород формируются при промерзании пород деятельного слоя или отдельных генетических типов пород. Это подозёрные или подрусловые талики, морские и прибрежно-морские осадки, в которых происходят активные биохимические процессы. К ним могут быть приурочены и выходы глубинных катагенетических газов. Над тектоническими структурами, являющимися газовыми ловушками, всегда наблюдается повышенное содержание углеводородных газов, рассеянных в верхней части геологического разреза. Локальная повышенная концентрация газов приурочена к трещинам, сопровождающим формирование тектонических структур. При эпигенетическом промерзании данных территорий рассеянный газ, а также биохимический газ, образующийся в различных генетических типах отложений за счёт жизнедеятельности бактерий, или катагенетический газ, поступающий из нижезалегающих горизонтов, подвергается криогенной концентрации. Часть газа может переходить в гидратное состояние. В этом случае получают развитие значительные по размерам (до десятков километров) структурно-геологические геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород.

Мёрзлые породы традиционно рассматриваются как относительно стабильные образования, сложенные в основном минеральными частицами, дополнительно сцементированными льдом при замерзании. В стабильных геокриологических условиях газовая компонента находится в равновесном «законсервированном» состоянии. В настоящее время накоплено множество фактов, показывающих, что такой подход не всегда позволяет дать полную характеристику свойств газонасыщенных мёрзлых грунтов и достоверно обосновать прогноз их изменения при строительстве и эксплуатации сооружений. Повсеместно происходящее изменение геокриологических условий, вызванное как общими изменениями климата, так и возрастающей техногенной нагрузкой, связанной с активизацией хозяйственной деятельности в арктическом регионе, и в первую очередь с разработкой месторождений углеводородов, приводит к активизации различных негативных процессов и явлений, влияющих на безопасность хозяйственной деятельности. Даже незначительное изменение температуры мёрзлых грунтов инициирует начало газовыделения в них. Перераспределение газа в криолитозоне обеспечивается определённым соотношением давления газа и прочности вмещающих мёрзлых пород, зависящей от температуры. При её повышении наблюдается увеличение порового пространства, возрастает количество незамёрзшей воды, появляются минерализованные ячейки, нарастает количество внутренних дефектов. Это обеспечивает перераспределение газа в высокотемпературных многолетнемёрзлых породах при достаточно низких давлениях. Проведённое авторами изучение материалов по строению воронок газового выброса, лабораторное моделирование, построение феноменологических моделей показали возможность миграции газов в многолетнемёрзлых породах и льдах. Теоретической базой исследования являются разработанные авторами положения о деформационно-фильтрационном механизме миграции газа в многолетнемёрзлых породах, основанные на представлениях о парагенетической связи процессов фильтрации и деформации. Миграция газовых флюидов неразрывно связана с пликативными и дизъюнктивными деформациями мёрзлых пород. Высокие давления внутригрунтовых газов, взаимодействуя

с породой, производят её разрыхление, при этом формируются порово-кавернозно-трещинные резервуары. Возникающие под воздействием повышающегося внутреннего давления пластические и разрывные деформации создают в толще породы ослабленные зоны, по которым начинается перемещение газового флюида. Возникающие под воздействием повышающегося внутреннего давления деформации формируют эволюционирующую структуру порового пространства, по которому происходит перенос газового флюида. Таким образом, формируется фильтрационно-деформационная зона, продвигающаяся вглубь массива породы.

Выход геосистемы газонасыщенных многолетнемёрзлых пород или хотя бы части её из устойчивого термодинамического состояния реализуется в виде локальных выбросов потоков газа. Данные выбросы являются физическими взрывами, формирующимися в результате возникновения очага повышенного давления газа, разрывающего мёрзлую кровлю. Увеличение давления газа в мёрзлых породах возникает при повышении их температуры за счёт разложения газогидратов или за счёт расширения свободного газа, а также при снятии внешнего давления, например при таянии ледника или уменьшении глубины моря. Изменения приводят к последовательной смене комплексов процессов, меняющих структуру первичной газонасыщенной геосистемы. В ней формируется локальная, вторичная геодинамическая газонасыщенная геосистема, развитие которой в конечном итоге приводит к физическому взрыву и образованию воронки газового выброса. Для формирования воронок газового выброса необходимо выполнение ряда существенных, далеко не всегда и не повсеместно реализующихся в природе условий, важнейшими из которых являются наличие:

- источников и условий длительной интенсивной генерации значительного количества природных газов (биогенных, катагенных, выделившихся при разложении газогидратов);
- каналов миграции природных газов, образующих достаточно мощные сосредоточенные потоки;
- локального газонепроницаемого барьера в поверхностной зоне, препятствующего миграции газов;
- условий для возникновения и поддержания аномально высокого пластового давления природных газов в зоне их скопления под газоупорным барьером.

В каждом конкретном случае следует рассматривать отдельный сценарий развития геосистемы, приводящего (или не приводящего) к формированию воронки газового выброса. Один и тот же процесс в различных природных условиях приведёт к различным результатам. При незначительном и кратковременном повышении температуры диссоциация газогидратов может быстро закончиться в результате самоконсервации. В итоге в ММП может сформироваться зона повышенной пористости за счёт небольших газовых полостей. Если гидратосодержащие ММП залегают на незначительной глубине (20–30 м), то давление газов, образовавшихся при разложении газогидратов, минуя стадию миграции в виде флюидов, может вызвать выброс кровли. При этом необязательно будет формироваться многолетний бугор пучения. Для неглубоко залегающих газогидратов то же самое может происходить в условиях, когда причиной локального повышения температуры является не термокарстовое озеро, а благоприятные ландшафтные условия («тёплые ландшафты»). При достаточной глубине и ширине озера газ, выделившийся при диссоциации, может не накапливаться в ММП, а выделяться из подозёрного талика. Выделение газа длится от нескольких месяцев до нескольких лет, но без взрыва, поскольку



есть возможность свободного выхода газа. Если скорость нарастания давления небольшая и кровля успевает деформироваться, то формируются бугры пучения, выраженные в рельефе. При быстром возрастании давления область пластических деформаций может быть слабо выраженной. Рост давления при диссоциации газовых гидратов может усиливаться быстро. После того как давление в полости превысит прочность кровли, происходит выброс. При этом возможны различные варианты: от небольшого взрыва без образования бугра пучения до образования большого многолетнего бугра, предшествующего пневматическому выбросу мёрзлой кровли. В конечной фазе миграции сквозь многолетнемёрзлые породы газ или высачивается в атмосферу, преимущественно через таликовые зоны и поверхностные водоёмы, или накапливается под приповерхностными низкотемпературными газонепроницаемыми мёрзлыми породами. Во втором случае повышение давления выше предела прочности пород вызывает взрыв сжатого газа. Разброс обломков породы достигает десятков, а иногда и сотен метров. Если взрыв сжатого газа сопровождается его возгоранием (а такие случаи отмечены), то сила взрыва многократно увеличивается. В случаях, когда в промерзающих таликах содержится достаточно большое количества газа, воронки газового выброса могут образовываться по типу формирования гидролакколитов.

В ходе лабораторных исследований было установлено, что газонепроницаемые при низких отрицательных температурах мёрзлые грунты, в ходе повышения температуры до определённых границ (для каждого вида грунта границы будут индивидуальны) оставаясь в мёрзлом состоянии, начинают пропускать газ под давлением. Фильтрация газа в мёрзлых образцах и льдах обусловлена различными процессами. В засолённом льду с многочисленными рассольными ячейками миграция газа реализуется путём газлифтового механизма. Двигающийся пузырьёк газа толкает перед собой жидкость, при этом формируется газово-жидкостный поток, переносящий жидкость в область меньшего давления. Газ, находя ослабленные зоны, проникает по ним и образует цепочки газовых пузырьков, постепенно уменьшающихся в сторону меньших давлений. Там, где проникновение газа затруднено, газовые пузырьки сливаются и образуют скопления червеобразных и ветвящихся каналов; давление газа деформирует и частично разрушает первичные криотекстуры, образуя зоны пластических и разрывных деформаций. Изучаемые в лабораторных условиях процессы миграции газа в образцах мёрзлого грунта обусловлены фильтрационно-деформационным механизмом, заключающимся в совместном действии процессов деформации пород под давлением и фильтрации газа по формирующимся при этом ослабленным зонам. Комплекс парагенетически связанных фильтрационно-деформационных процессов, создавая локальные зоны повышенной проницаемости, обуславливает резкое усиление миграции газовых флюидов в мёрзлых породах.

Газодинамические потоки, развивающиеся в мёрзлых породах при формировании и разрушении геосистем газонасыщенных мёрзлых пород, чрезвычайно трудно изучать непосредственно в естественных условиях. Наиболее эффективным способом решения этих задач является математическое моделирование. В частности, была разработана математическая модель с использованием асимптотического усреднения, позволяющая учитывать взаимовлияние фильтрационного потока газа и деформации мёрзлой породы в поле локальных напряжений в окрестности возникающих дефектов. Было проведено моделирование напряжённо-деформированного состояния ледогрунтового массива в окрестности первичной полости избыточного давления, формирующейся на начальной стадии разложения газогидратов в многолетнемёрзлых породах, с использованием мо-

делей Хоека–Брауна и Друкера–Прагера. Для описания процесса фильтрации вязкой ньютоновской жидкости сквозь пористую среду были проведены расчёты с использованием уравнения Бринкмана. Исследовалось влияние десорбции газа из нанопор в материале на распределение газа в образце, а также эффект зависимости проницаемости матрицы от величины давления.

В последние десятилетия зафиксировано нарастание опасностей, связанных с содержанием газов в мёрзлых породах. К ним относятся:

1. Поступление парниковых газов из области распространения многолетнемёрзлых пород, особенно на шельфе арктических морей. Если этот процесс будет возрастать, а это возможно на фоне глобального потепления климата, может возникнуть синергетический эффект, при котором потепление ускорит поступление парниковых газов в атмосферу, а увеличение количества парниковых газов ускорит потепление климата.

2. Освоение нефтегазовых месторождений на севере РФ, в том числе на арктическом шельфе, связано с бурением всё большего количества скважин. В свою очередь, буровые работы приведут к масштабному техногенному воздействию на всю мощность многолетнемёрзлых пород, выражающемуся в формировании зон оттаивания и растепления криогенных толщ. Кроме того, бурение приводит к сбросу пластового давления на глубине. Оба процесса, и повышение температуры, и сброс пластового давления, приводят к разложению газогидратов, обнаруженных в мёрзлых породах. Таким образом, в ближайшие годы можно ожидать роста техногенно обусловленных выбросов углеводородных газов и соответственно роста аварийных ситуаций.

3. Глобальное потепление вызывает нагрев многолетнемёрзлых пород и соответственно изменение прочностных и деформационных свойств. Однако зависимость данных свойств от их изменения практически неизвестна. Учитывая возрастание давления в газах при повышении температуры можно предположить, что прочность газонасыщенных мёрзлых пород будет уменьшаться гораздо интенсивней, чем в породах без газа.

4. Формирование обнаруженных в 2014 г. воронок газового выброса также связано с газонасыщенными мёрзлыми породами. Несомненно, образование данных форм наблюдалось и прежде. Опасность заключается в том, что возможно увеличение количества формирующихся воронок. Каждый выброс — это физический взрыв сжатого газа, который представляет опасность для попавших в зону его воздействия инженерных сооружений. Кроме того, в результате выброса в атмосферу поступает значительное количество парниковых газов.

Осознание естественных и техногенных опасностей, связанных с газонасыщенными мёрзлыми породами, не выразилось в соответствующих научных разработках. Не создана общая теория газонасыщенных мёрзлых пород, не выявлены процессы, происходящие при их формировании и разрушении. Сами газонасыщенные породы не выделены как самостоятельные инженерно-геологические объекты. Практически не изучены прочностные и деформативные свойства газонасыщенных мёрзлых пород в зависимости от количества и состава газов, вещественного состава минеральной составляющей, криогенного строения и льдистости, а также особенности изменения свойств при колебаниях температуры. Недостаточно исследовано распределение геосистем газонасыщенных пород в пределах криолитозоны. Не разработаны методы прогноза динамики газонасыщенных мёрзлых пород при глобальных изменениях климата и техногенных воздействиях.

Монография «Геосистемы газонасыщенных мёрзлых пород» не претендует на решение перечисленных проблем. Главными результатами проделанной работы являются: вы-

деление газонасыщенных мёрзлых пород как самостоятельного типа, проведение анализа существующих данных и их обобщение в виде некоторых положений теории формирования и разрушения геосистем газонасыщенных мёрзлых пород в субэвральных и субаквальных условиях. С помощью экспериментальных работ показана возможность фильтрации газа в мёрзлых льдистых грунтах. Показана возможность математического моделирования при изучении фильтрации газа в мёрзлых породах. Разработка данной темы позволит в будущем обоснованно прогнозировать возможность возникновения зон фильтрации газа и условий формирования газовых выбросов на участках залегания гидратонасыщенных мёрзлых пород при техногенном воздействии; разработать методику геофизических исследований зон развития деформаций и фильтрационных потоков газа в многолетнемёрзлых породах; создать комплекс математических моделей перераспределения газа в многолетнемёрзлых породах при различных соотношениях температуры пород и давления внутригрунтовых газов; разработать методику составления прогноза поступления парниковых газов из высокотемпературных мёрзлых пород. Следует отметить, что в целом проблемы формирования и разрушения газонасыщенных мёрзлых пород следует рассматривать в рамках геокриологии. При этом необходимо широкое привлечение данных, наработанных в смежных областях наук о Земле, таких как геодинамика, вулканология, флюидогеодинамика и др.

А.Н. Хименков, А.Н. Власов, А.В. Брушков, А.В. Кошурников,  
Д.Б. Волков-Богородский, Д.О. Сергеев, В.Е. Гагарин, П.А. Соболев

## **ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД**

Научная монография

Ответственный редактор  
Ю.Д. Зыков

Подписано в печать 06.06.2021 г.

Формат 70х100/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура: Times New Roman. Печ. л. 18.  
Тираж 300 экз.