

А. Н. Хименков, А. В. Брушков

ВВЕДЕНИЕ В СТРУКТУРНУЮ КРИОЛОГИЮ

УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ

2-е издание, переработанное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в
качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по естественнонаучным направлениям*

**Книга доступна на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва ■ Юрайт ■ 2020

УДК
ББК

Авторы:

Хименков Александр Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук (темы 1—3, 6);

Брушков Анатолий Викторович — доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (темы 4, 5, 7, 8).

Хименков, А. Н.

Введение в структурную криологию : учебник для вузов / А. Н. Хименков, А. В. Брушков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 3 03 с. — (Высшее образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-13702-6

Курс посвящен рассмотрению структурной организации криосферы — оболочки Земли с отрицательной температурой, где лед является важнейшим компонентом. С единых позиций проанализированы криогенные геосистемы литосферы, гидросферы, биосферы. Показано их влияние на различные аспекты деятельности человека. Представлены данные о криогенных образованиях других планет Солнечной системы.

Для студентов высших учебных заведений географического, геологического, экологического, биологического профилей, специалистов в области изучения криогенных образований в различных геосферах, а также всех интересующихся проблемами холодных регионов Земли.

УДК
ББК

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-13702-6

© Хименков А. Н., Брушков А. В., 2006
© Хименков А. Н., Брушков А. В., 2020,
с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2020

Оглавление

Предисловие	7
Введение.....	10
Тема 1. Первичные криогенные системы	15
1.1. Кристалл льда — материальная основа криосферы.....	15
1.2. Формирование кристаллов льда в воде	15
1.2.1. Кристаллизация в растворах	22
1.2.2. Нарастание льда на твердое основание	27
1.2.3. Плавление (термическое разрушение) льда	28
1.3. Формирование льда в атмосфере.....	29
1.4. Формирование кристаллов льда в дисперсных отложениях.....	39
Выводы	42
Тема 2. Криогенные системы в литосфере	44
2.1. Эпигенетические мерзлые породы	45
2.2. Сингенетические мерзлые породы	50
2.3. Криодигенетические субаквальные мерзлые осадки	53
2.4. Погребенные мерзлые породы	56
2.5. Сезонно-мерзлые породы.....	58
2.6. Засоленные мерзлые породы как особый тип криогенных систем криолитозоны	61
2.7. Локальные криогенные системы	65
2.7.1. Многолетние и сезонные бугры пучения	65
2.7.2. Гидролакколиты (булгуниахи, пинго).....	68
2.7.3. Повторно-жильные (полигонально-жильные) льды	70
2.7.4. Поверхностные мозаичные образования.....	73
2.7.5. Пластовые льды.....	74
2.7.6. Газонасыщенные мерзлые породы	76
2.7.7. Воронки газового выброса.....	77
2.7.8. Флюидодинамические криогенные геосистемы.....	87
Выводы	92
Тема 3. Криогенные системы на границах геосфер	94
3.1. Граница «литосфера — атмосфера».....	94
3.1.1. Снежный покров	94
3.1.2. Метаморфизм снега	97

3.1.3. Разновидности снега.....	100
3.1.4. Рельеф снежной поверхности.....	101
3.1.5. Проблемы систематизации.....	103
3.1.6. Разрушение снежного покрова.....	103
3.1.7. Снежники	104
3.1.8. Ледники	105
3.2. Граница «гидросфера — атмосфера»	112
3.2.1. Процессы, развивающиеся на границе	113
3.2.2. Структурно-генетическая классификация льда.....	122
3.3. Граница «литосфера — гидросфера»	128
3.3.1. Донные льды.....	128
3.3.2. Консервация поверхностных льдов в субаквальных осадках.....	129
3.3.3. Формирование криогенных систем в субаквальных осадках.....	130
3.3.4. Стадии океанического криолитогенеза	131
3.3.5. Газонасыщенные и газодинамические криогенные геосистемы шельфа арктических морей	136
Выводы	144
Тема 4. Криогенные системы в биосфере	145
4.1. Криобиология.....	146
4.2. Взаимодействие льда с живым веществом.....	149
4.2.1. Образование кристаллов льда в клетке.....	150
4.2.2. Криопротекторы	155
4.2.3. Блокаторы образования льда. Витрификация	160
4.3. Практическое использование криогенных биосистем	161
4.3.1. Криоконсервация.....	161
4.3.2. Трансплантация органов	163
4.3.3. Криогенная деструкция и криохирургия	164
4.3.4. Репродуктивная медицина	166
4.3.5. Промораживание растений.....	166
4.3.6. Крионика.....	168
4.4. Живое вещество в криолитозоне.....	171
4.4.1. Микроорганизмы в мерзлых породах	171
4.4.2. Вирусы в вечной мерзлоте.....	187
4.4.3. Роль льда в происхождении и эволюции жизни	188
Выводы	189
Тема 5. Переходные зоны в криосфере	191
5.1. Переходные зоны как структурный элемент криосферы.....	191
5.1.1. Кристалл льда	192
5.1.2. Промерзающий грунт	194
5.2. Перестройка криогенных систем	195
5.2.1. Повышение температуры выше температуры фазовых переходов (оттаивание)	195

5.2.2. Изменение строения криогенных систем при механическом воздействии.....	197
5.2.3. Температурные деформации мерзлых грунтов.....	210
5.3. Природные факторы, влияющие на динамику и распределение криогенных переходных зон литосферы	215
5.3.1. Ландшафтные факторы.....	215
5.3.2. Тектонические факторы	217
5.4. Структура переходных зон в криосфере	219
Выводы	220
Тема 6. Криосфера как иерархическая система	221
6.1. Проблемы классификации	221
6.2. Понятийный аппарат	223
6.3. Некоторые методические требования к исследованиям криогенных систем.....	229
6.4. Мерзлые породы как геосистемы	231
6.5. Уровни организации криогенных геосистем	237
6.5.1. Иерархия	237
6.5.2. Состояния криогенных систем.....	240
6.5.3. Динамика криогенных геосистем	243
6.5.4. Гетерохронность развития криогенных геосистем	244
6.5.5. Временные аспекты формирования криогенных систем....	245
6.5.6. Криогенные процессы	248
Выводы	250
Тема 7. Криосфера и человек	251
7.1. Криосфера как социально-экономический фактор.....	251
7.2. Природно-технические системы криосферы.....	260
7.3. Искусственные криогенные системы	269
Выводы.....	278
Тема 8. Криогенные системы в космосе.....	279
8.1. Типы криолитогенеза.....	279
8.2. Мерзлые породы в Солнечной системе	285
8.3. Планетный криолитогенез и жизнь.....	295
Выводы	298
Заключение.....	299
Список рекомендуемой литературы.....	302

Предисловие

Курс «Введение в структурную криологию» предназначен для студентов высших учебных заведений географического, геологического, экологического, биологического профилей. Цель дисциплины — сформировать у студентов глубокие и устойчивые знания о развитии природных процессов в области низких температур на Земле и в космосе, выработать умение ориентироваться в современной научной информации для последующего использования в учебной и практической деятельности.

Важнейшие задачи курса:

- обеспечить усвоение основных понятий и законов формирования криогенных систем;
- обеспечить понимание общих закономерностей действия природных и техногенных факторов развития криогенных систем на различных уровнях организации криосферы;
- обеспечить понимание принципов, проблем и перспектив рационального природопользования в условиях криолитозоны;
- развить способности к творчеству, в том числе научно-исследовательской работе, и выработать потребность к самостоятельному приобретению знаний в геокриологии, криобиологии, изучении криогенных процессов на Земле и космических объектах, экологических проблем землепользования на территории криолитозоны.

Изучение предлагаемого курса направлено на формирование у студентов — будущих работников в сфере охраны окружающей среды и природопользования — комплексного представления об устройстве и механизмах функционирования природных и антропогенных криогенных систем, для исследования которых необходимы фундаментальные знания, прежде всего по физике, геологии, географии, климатологии, грунтоведению, которые в значительной мере интегрирует и концентрирует в себе криология.

В результате освоения курса студент должен обладать следующими компетенциями:

знать

- основные понятия и законы криологии;
- основные криогенные явления, протекающие в различных геосферах Земли и на космических объектах;
- закономерности протекания криогенных процессов;

— строение, морфологию, историю развития основных типов криогенных систем;

— возможные экологические проблемы, связанные с антропогенным воздействием;

уметь

— ставить и решать научно-исследовательские задачи в области криологии;

— диагностировать и классифицировать криогенные системы по их морфологическим признакам, составу и строению;

— систематизировать и анализировать сведения о факторах и процессах формирования криогенных систем;

— раскрывать многосторонние связи между компонентами различных геосфер и криогенными системами;

— прогнозировать хозяйственные и экологические последствия деятельности в области развития многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых пород;

— выбирать оптимальные управленческие решения при практическом использовании криогенных систем;

владеть

— методами научно-исследовательской работы при изучении криогенных систем;

— приемами планирования мероприятий по повышению эффективности использования, мониторингу и природоохранным мероприятиям на территории криолитозоны;

— навыками ведения просветительской, воспитательной и педагогической деятельности в области криологии.

Курс состоит из введения, заключения и восьми тем.

Во введении анализируются общие закономерности строения криосферы Земли.

В первой теме рассматриваются особенности формирования первичных криогенных систем, кристаллов льда в различных средах.

Вторая тема посвящена рассмотрению закономерностей формирования криогенных геосистем в литосфере.

Третья тема содержит сведения об особенностях формирования криогенных систем на границах геосфер (литосфера — атмосфера, гидросфера — атмосфера, литосфера — гидросфера).

В четвертой теме дается характеристика криогенных систем в живом веществе, анализируется льдообразование в клетке, рассматриваются направления применения процессов криогенеза для практических целей.

В пятой теме раскрываются особенности протекания процессов криогенеза в переходных зонах, соответствующих нестационарному состоянию криогенных систем.

В шестой теме раскрываются особенности иерархической организации криосферы.

Седьмая тема посвящена рассмотрению социально-экономических факторов криогенеза, обуславливающих особенности функционирования природно-технических систем в криолитозоне и особенности создания искусственных криогенных систем.

Восьмая тема содержит сведения о криогенных процессах и криогенных явлениях на космических телах Солнечной системы.

В заключении рассмотрена общая методология научного направления «структурная криология». Отмечена важность перехода от детерминистских подходов к вероятностным.

Во втором издании переработана и дополнена вторая тема, где дополнительно рассмотрены некоторые локальные криогенные геосистемы, среди которых особое место занимают газонасыщенные геосистемы в многолетнемерзлых породах на северных территориях и Арктическом шельфе. Проанализированы гипотезы формирования недавно обнаруженных объектов криолитозоны — воронок газового выброса. Шестая тема дополнена анализом истории развития геосистемных представлений в геокриологии.

В учебном пособии изложены основные феноменологические модели процессов, протекающих в криосфере. Для рассмотрения выбраны основные криогенные процессы и связанные с ними явления, изучение которых в настоящее время наиболее актуально.

Введение

Не я ли, отправляясь затем от крохотной души самого маленького из живых существ, трижды обнаруживал душу самого большого из живых существ — земного шара — в атоме снега...

Иоганн Кеплер. «Новогодний подарок, или о шестиугольных снежинках»

Криосфера — оболочка Земли с отрицательной температурой (ниже 0 °С, или 273,15 К), распространенная в пределах атмосферы, гидросферы и литосферы. Ее отличительной чертой является то, что вода в ней может существовать в твердой фазе (лед, снег, иней). Земля — довольно холодная планета, несмотря на то что ее средняя температура — около +15 °С; ее самым холодным местом является Полюс недоступности в Антарктике, где среднегодовая температура –58 °С, а абсолютный полюс холода расположен в центральной части Антарктиды, на российской станции «Восток», где в 1983 г. зафиксировали температуру воздуха –89,2 °С. Нижняя граница криосферы совпадает с подошвой слоя мерзлых и охлажденных горных пород. Этот слой характеризуется большой устойчивостью и достигает максимальной глубины в высоких широтах — в Антарктиде (свыше 4 км) и Субарктике (около 1,5 км), но отличается сезонной изменчивостью и вовсе выклинивается в средних и низких широтах. Верхняя граница криосферы проходит на высотах около 100 км над уровнем моря в разреженных слоях атмосферы.

Общая характеристика криосферы на Земле приведена в табл. В.1. Приблизительно 75 % ресурсов пресной воды сконцентрировано в виде льда.

Криология, как отрасль наук о Земле, развивается по трем основным направлениям — структурное, генетическое, динамическое. Структурная криология представляет морфологическое направление в исследованиях, направленных на изучение строения криосферы как единой иерархической природной системы. Но так как природные явления тесно друг с другом связаны, настоящие структурные исследования невозможны без использования данных двух других направлений. Задачами структурной криологии являются:

1) изучение структуры и пространственного положения криогенных систем различного уровня;

2) исследование механизма их возникновения и последовательности развития.

Таблица В.1

Снег и лед на Земле¹

Виды льда	Масса		Площадь распространения	
	г	%	км ²	% от площади
Ледники и ледниковые покровы	$2,389 \cdot 10^{22}$	98,95	$1,621 \cdot 10^7$	10,9 (суши)
Подземные льды	$(2+5) \cdot 10^{20}$	0,83	$2,10 \cdot 10^7$	14,1 (суши)
Морские льды	$3,483 \cdot 10^{19}$	0,14	$2,60 \cdot 10^7$	7,2 (океана)
Снежный покров	$1,05 \cdot 10^{19}$	0,04	$7,24 \cdot 10^7$	14,2 (суши)
Айсберги	$7,65 \cdot 10^{18}$	0,03	$6,35 \cdot 10^6$	1,87 (океана)
Лед в атмосфере	$1,68 \cdot 10^{18}$	0,01	$5,10 \cdot 10^8$	100 (земной поверхности)
Всего	$2,423 \cdot 10^{22}$	100	—	

Наш подход заключается в том, что криосфера представляет собой иерархическую природную систему, отличительным элементом которой является присутствие (или потенциальная возможность появления) льда, предстающего в различных формах. Пространством криосферы является область с отрицательной температурой, т. е. основой криосферы является энергетический фактор. Материальная основа криосферы — кристалл льда, являющийся объектом, в котором реализуются процессы теплообмена между Землей и космосом.

Льдом насыщена вся криосфера. А. Б. Добровольский писал, что «лед образует на земном шаре постоянную оболочку, криосферу, весьма однородную по составу, но очень различную по внешнему виду. Эта оболочка находится в тесных связях, своеобразных и определенных, с литосферой, гидросферой, и атмосферой. У нее есть свой верхний и свой нижний пределы, причем последний очень высоко поднимается вверх в жаркой зоне, постепенно опускаясь по направлению к холодным зонам (где он частично проникает вглубь земли), и, вообще говоря, является переменным в зависимости от времени года»². По мнению П. А. Шумского, именно лед определяет неустойчивость криосферы. Он считает, что от всех остальных высокотемпературных минералов лед, образующий прерывистую оболочку в пограничной зоне атмосферы, гидросферы и литосферы, мало где находит термодинамические условия, отвечающие его устойчивому состоянию. Таким образом, равновесие в криосфере гораздо менее

¹ Маэно Н. Наука о льде. М. : Мир, 1988.

² Dobrowolski A. B. Historia naturalna lodu. Warszawa, 1923.

устойчиво, процессы льдообразования чаще сменяются противоположными по направлению¹.

Распределение льда в природной системе зависит от следующих факторов:

- особенностей, присущих льдообразованию в данной среде;
- закономерностей развития природной системы, в которой реализуется льдообразование;
- изменений среды в ходе трансформации или разрушения льда.

Реализуясь в геологических телах, участвуя в различных природных процессах, кристаллы льда определяют строение криосферы: от эпизодических, кратковременных, формирующих нестабильные системы облаков, содержащих атмосферные льды, до сезонных и многолетних, образующих снежный покров, сезонномерзлые почвы и горные породы, ледяные покровы водоемов, наледи и, наконец, многовековые криогенные образования: ледники, толщи мерзлых горных пород.

Отрасль науки, изучающей лед во всех видах и проявлениях, получила название криология. Единство материального носителя предполагает общность внутренних связей, процессов, свойств. Однако развитие криологии пошло по пути дифференциации. Формирование и распределение льда (снега) в атмосфере и на поверхности Земли изучается метеорологией; развитие сезонных льдов на поверхности морских и пресноводных водоемов рассматривается океанологией и гидрологией; формирование и движение ледяных скоплений (ледников) — гляциологией; изучением формирования льда в литосфере занимается геокриология (мерзлотоведение, криолитология), а в живых системах — криобиология. Положение исследований взаимоотношений криосферы и социума вообще оказалось неопределенным (история, этнография, экономика, медицина). В новом тысячелетии формируется новое научное направление — североведение, в котором эта проблема рассматривается². Такое разделение криологии объяснимо, поскольку объекты изучения определялись прикладными хозяйственными задачами. Однако необходимость целостного рассмотрения криосферы ощущалась всегда. В последние десятилетия приходит понимание, что понижение температуры среды до значений, при которых вода переходит в лед, является мощным фактором, воздействующим не только на природу, но и на социальные структуры. В качестве основного структурного элемента криосферы выделяется устойчивую (квази стационарную) криогенную систему, под которой мы понимаем

¹ Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. М. : Изд-во АН СССР, 1955.

² Голубчиков С. Н., Ерохин С. В. Российский Север на переломе эпох. М. : Пасьева, 2003.

закономерно построенный природный объект (геологическое тело, биологический объект, атмосферное или водное ледяное образование и др.), имеющий отрицательную температуру, общность происхождения, содержащий лед, обладающий структурными связями и устойчивостью к внешним воздействиям. Квазистационарные криогенные системы обладают одним общим качеством: в пределах каждой из них сохраняется структурная упорядоченность и обеспечиваются определенные параметры системы (температуру, структуру, свойства). Устойчивость параметров и строения соответствует времени, когда криогенная система находится в равновесном состоянии с окружающей средой. Если же рассматривать период формирования системы или разрушения, то наблюдаются несоответствия и в строении, и в параметрах. Такое состояние системы мы выделяем как переходное, а область пространства, ему соответствующую, — как переходную зону или область.

В курсе уделяется особое внимание рассмотрению переходных состояний криогенных систем. Эта тема недостаточно разработана, хотя имеет большое значение при изучении криосферы. Поэтому в рамках предложенного подхода мы рассматриваем криосферу как совокупность областей стабильного состояния (криогенные квазистационарные системы), разделенных переходными областями. И те и другие имеют особые черты строения, их соотношение соответствует определенным палеогеографическим и современным условиям. Наиболее динамичными элементами криосферы являются переходные зоны. Их время существования и занимаемая область меньше, чем соответствующие характеристики квазистационарных криогенных систем, но их влияние на структуру и свойства последних исключительно велико.

В настоящее время в геокриологии ведущую роль играют линейно-детерминистические представления о процессах формирования, трансформации или разрушения мерзлых пород. Промерзающие, мерзлые или оттаивающие массивы рассматриваются как объекты с усредненными показателями (льдистость, влажность, содержание солей и газов, гранулометрический состав, теплопроводность и др.). Эти параметры зависят от температуры, определяемой поверхностными условиями, и меняются с соответствием с теплообменными процессами. Считается, что, обладая значениями усредненных характеристик строения и теплообмена, можно с помощью соответствующего математического аппарата предсказать состояние мерзлых толщ, изменение их характеристик и развитие криогенных процессов.

Авторы курса попытались продемонстрировать, что криолитозона и криосфера в целом представляет собой совокупность криогенных систем и их развитие происходит крайне неравномерно. Спокойные периоды квазистационарного, устойчивого состояния

в равновесии с окружающей средой сменяются этапами потери устойчивости, когда внутренние связи ослабевают (и даже разрушаются) и сменяются напряженными критическими периодами, в которые определяется, каким будет строение новой системы. При этом происходит самоорганизация новой структуры, соответствующей новым условиям. На этапе самоорганизации — в переходном состоянии — важна связь структур различного строения и уровня. В таких состояниях действуют смешанные энергетические и вещественные потоки, зарождаются новые формы, отбираются параметры порядка, регулирующие процесс на системном уровне. Происходит кооперация частей системы с возникновением нового качества. В таких состояниях определяющую роль играет не порядок, а хаос. И без этой неупорядоченной, неконтролируемой компоненты были бы невозможны новые качественные изменения.

В траектории развития системы различают точки бифуркации или, шире, полифуркации, когда траектория разветвляется. И в законе движения нет указания на то, по какой ветви следовать. Есть лишь спектр возможностей. Выбор ветви зависит от флуктуаций, от факторов локального масштаба. Через малые блуждания система попадает в область притяжения одной из возможных траекторий дальнейшего движения. Хаос сначала обеспечивает возможность схода с прежней траектории при потере устойчивости в зоне кризиса, а затем помогает подключиться к новому аттрактору, вымывая помехи на этом пути¹.

¹ Баранцев Р. Г. Синергетика в современном естествознании. М. : URSS, 2003.

Тема 1

ПЕРВИЧНЫЕ КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Из чьего чрева выходит лед и иней небесный, кто рождает его?..

Иов, гл. 38

1.1. Кристалл льда — материальная основа криосферы

Существование криосферы в первую очередь обусловлено тепловыми процессами, образующими на Земле и в околоземном пространстве области с отрицательной температурой. Фактор низкой температуры хотя и является необходимым, но недостаточен. Многообразие форм и явлений, наблюдаемое в криосфере Земли, разбивается как результат льдообразования.

Ледники, покрывающие огромные пространства, бескрайние снега равнин Евразии, льды, сковывающие Мировой океан и воды суши, миллиметровые снежинки (рис. 1.1¹) и многолетнемерзлые породы с пластовыми льдами (рис. 1.2), впечатляющие искусственные криогенные образования, такие как ледяные скульптуры на снежном фестивале в г. Саппоро (Япония) (рис. 1.3), иней (рис. 1.4), изморозь и многое другое — результат перехода воды в твердую фазу.



Рис. 1.1. Снежинка



Рис. 1.2. Пластовые льды на побережье Карского моря, Югорский полуостров

¹ Фото из работы: Libbrecht K. G. The physics of snow crystals // Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 855—895.



Рис. 1.3. Ледяная скульптура на снежном фестивале в г. Саппоро (Япония)

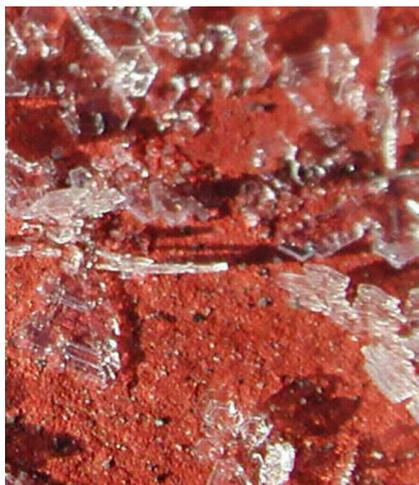


Рис. 1.4. Иней — звездообразные ледяные образования на поверхности земли как результат резкого ночного понижения температуры (фото Ф. Л. Хоффмана)

Криосфера состоит из многочисленных криогенных подсистем различного масштаба. Каждая подсистема обладает определенными пространственными, временными и структурными характеристиками, обеспечивающими ее устойчивое существование и определяющими последовательность процессов трансформации. Единство всех криогенных подсистем, организующих криосферу, базируется на общем материальном субстрате — водном льде. Кристалл льда — тот элементарный компонент, из которого построены все криогенные системы, существующие на Земле. Именно поэтому, прежде чем перейти к их рассмотрению, необходимо рассмотреть особенности формирования их основы.

1.2. Формирование кристаллов льда в воде

Для воды известно около сорока физико-химических аномалий: высокая температура плавления твердой фазы (льда), высокая температура кипения, высокое поверхностное натяжение, вязкость, которая уменьшается с давлением, уменьшение объема при плавлении, аномалия плотности, способность переохлаждения до низких температур и др. Объяснение этих аномалий связано главным образом с водородными связями и структурой воды. Необычные свойства воды определяют сложный характер и динамику кристаллообразования. Фазовая диаграмма для некоторых категорий льда представлена на рис. 1.5.

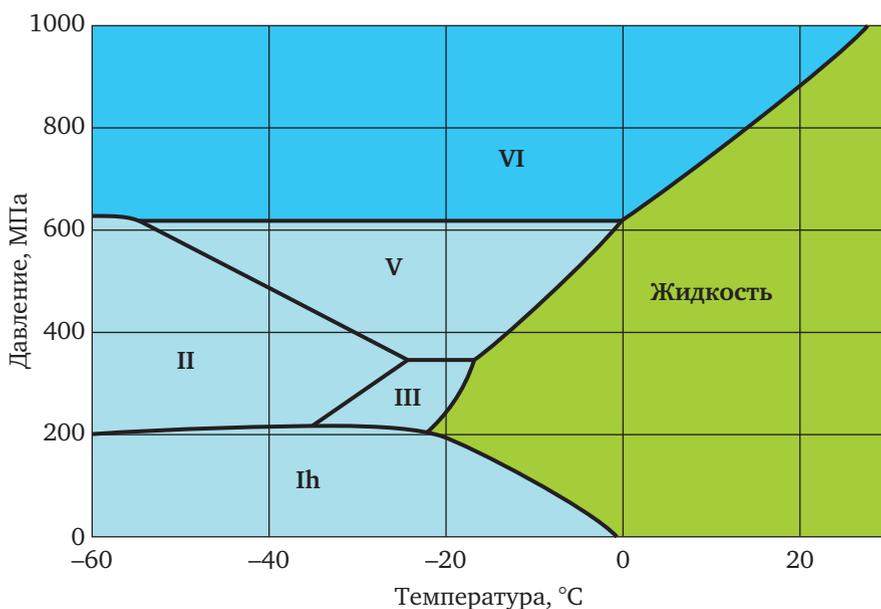


Рис. 1.5. Фазовая диаграмма воды (римскими цифрами обозначены некоторые модификации льда)

Из всех установленных модификаций льда обыкновенный гексагональный лед Ih наиболее широко распространен в природе, он существует при нормальных условиях, Лед II существует при температурах $-83\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении выше 300 МПа, его можно обнаружить в нижней части Антарктических ледников при температурах ниже $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Остальные льды в земных условиях не встречаются, они могут существовать только при очень высоких давлениях. При понижении температуры воды до точки кристаллизации жидкость переходит в твердую фазу, т. е. возникает новая, более устойчивая в пространстве и во времени сеть водородных связей между молекулами H_2O . Согласно исследованиям Н. Флетчера и других исследователей, вода может оставаться в жидком состоянии при температурах около $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в тонких адсорбированных слоях, возможно, до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Реально она, однако, в зависимости от минерализации, переходит в твердую фазу при отрицательных температурах, близких к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Процесс кристаллизации начинается в дискретных локальных областях — зародышах кристаллов.

Существуют две теории роста кристаллов:

- а) гомогенная, в соответствии с которой зарождение кристаллов начинается в однофазной среде, в местах случайных столкновений молекул; при этом образуются очаги новой фазы;
- б) гетерогенная, согласно которой центрами кристаллизации являются имеющиеся в расплаве (жидкости) инородные частицы.

Условия, благоприятствующие росту кристалла льда в воде, определяются степенью переохлаждения, наличием ядер кристаллизации и скоростью удаления теплоты кристаллизации (см. рис. 1.5). Каждому состоянию соответствует определенный минимальный размер кристалла, называемый критическим, при котором начинается его спонтанный рост. Кристаллы размером меньше критического для данных условий не могут расти и будут растворяться. Понятие о минимальном совершенном кристалле льда, предложенное В. Н. Голубевым в 1976 г, позволяет охарактеризовать критический размер зародыша при кристаллизации воды в 460—470 молекул с объемом 15,7 нм³, что соответствует сфере радиусом 1,56 нм.

После формирования первичного устойчивого центра кристаллизации рост продолжается во всех направлениях. Для рассмотрения особенностей роста кристаллов льда в воде воспользуемся кластерной моделью, предложенной Х. Фрэнком и В. Уэном в 1957 г. Она довольно успешно объясняет особенности возникновения и роста кристаллов льда. В модели 1962 г. Г. Немети и Х. Шерага вода состоит из отдельных областей льдоподобной ажурной структуры с незаполненными пустотами. В модели Робинсона и др.¹ вода описывается как смесь взаимно конвертирующихся кластеров малой плотности, структурноподобных льду Ih, и высокоплотных кластеров с компактной структурой льда II. Современные представления о структуре воды можно найти, например, в работе С. Д. Захарова с соавторами².

Согласно модели Х. Фрэнка и В. Уэна жидкая вода является конгломератом крупных ассоциатов молекул H₂O (кластеров), возникающих и вновь распадающихся. Представление о льдоподобном строении таких «мерцающих» кластеров основано на ИК и рентгеновских исследованиях воды, которые показали, что расположение молекул внутри кластеров похоже на расположение их в кристаллической решетке льда (рис. 1.6).

При фиксированных термодинамических условиях, возможно, существует определенный пространственный каркас ассоциатов, имеющих статистическое распределение по размерам. При этом считается, что каждая молекула воды при комнатной температуре совершает около $6 \cdot 10^8$ трансляционных скачков в секунду. Повышение температуры ведет к возрастанию количества кластеров при одновременном уменьшении их размеров. Полное разрушение водородных связей в воде и переход молекул в мономерное состояние происходит лишь при температуре 300—370 °С.

¹ Yao H., Lee J., Robinson G. W. Water structure affected by a weak base // J. Am. Chem. Soc. 1990. Vol. 112. P. 5698—5700.

² Захаров С. Д. и др. Структурные перестройки в водной фазе клеточных суспензий и белковых растворов при светокислородном эффекте // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. С. 149—162.

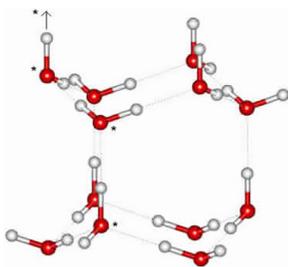


Рис. 1.6. Кристаллическая решетка льда

Понижение температуры приводит к увеличению молекул в кластере. При температуре $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ среднее число молекул в кластере составляет 15—50 ед., при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 90—120 и достигает 150—180 ед. при температуре $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹. Таким образом, согласно этой модели еще до формирования устойчивых кристаллов льда в воде существуют льдоподобные образования, хотя, по-видимому, несколько отличающиеся по структуре от льда.

Как правило, чем больше удельная поверхностная энергия грани или, другими словами, чем меньше ее ретикулярная плотность, тем больше скорость ее роста при равном пересыщении (переохлаждении). Объясняется это тем, что меньшая ретикулярная плотность связана с меньшим расстоянием между плоскими сетками пространственной решетки кристалла и, следовательно, с большей прочностью связи молекул в перпендикулярном к ним направлении. Поэтому образование двумерных зародышей на таких гранях наиболее облегчено, и рост их происходит быстрее.

У льда базисная плоскость обладает значительно большей ретикулярной плотностью, чем все другие грани, следовательно, скорость роста базисной плоскости в направлении главной оси должна быть меньше, чем у граней призмы в направлении побочных осей. В результате этого во время роста часто развиваются пластинчатые кристаллы, сплюснутые по главной оси и ограниченные базисными плоскостями.

Кластер в случае близкого согласования его квазирешетки с решеткой кристалла может присоединиться к растущей грани с формированием поверхности срастания, свободная энергия которой может изменяться от нуля (при идеальном согласовании решеток) до $0,065\text{ Дж/м}^2$. Последнее значение отвечает поверхностной энергии граней соседних кристаллов льда².

¹ Голубев В. Н. Структурное ледоведение. Теоретические основы конжеляционного льдообразования. М. : Изд-во МГУ, 1999.

² Голубев В. Н. Структурное ледоведение. Теоретические основы конжеляционного льдообразования.

Рост кристаллов льда происходит не постоянно как результат отложения на гранях отдельных молекул, а скачками, за счет присоединения отдельных блоков размером примерно 10^{-7} — 10^{-3} см. Это вызывает в отдельных микроблоках изменение кристаллографических осей $\langle c \rangle$ и $\langle a \rangle$ на несколько угловых минут и даже градусов. В кристаллах, образующихся в условиях переохлаждения до -10 °С, разориентация отдельных блоков достигает 1—3 угловых градусов, а в случае малых переохлаждений такая разориентация не превышает долей градуса.

Механизм кластерного роста, однако, не исключает возможность присоединения к растущей грани кристалла отдельных молекул, хотя такой процесс, очевидно, является второстепенным, особенно в случае значительных переохлаждений воды. При малых переохлаждениях (доли градуса Цельсия) встраивание кластера становится возможным при практически полном согласовании ориентации кластера с ориентацией растущего кристалла¹.

Рост кристалла может происходить не только в растворе, но и в газовой среде; при этом молекулы воды из пара осаждаются на лед. Считается, однако, что фактически кристалл обычно растет за счет жидких капель, образующихся при полном насыщении пара (при относительной влажности 100 %) на поверхности кристалла и немедленно замерзающих. Если в такой среде с насыщенным паром продолжать понижать температуру, пар становится пересыщенным. На рис. 1.7 представлена степень пересыщения пара при различных температурах: при -5 °С она составляет около 5 %, а при -20 °С возрастает до более чем 20 %; соответственно, возрастают скорость осаждения молекул и кристаллизация.

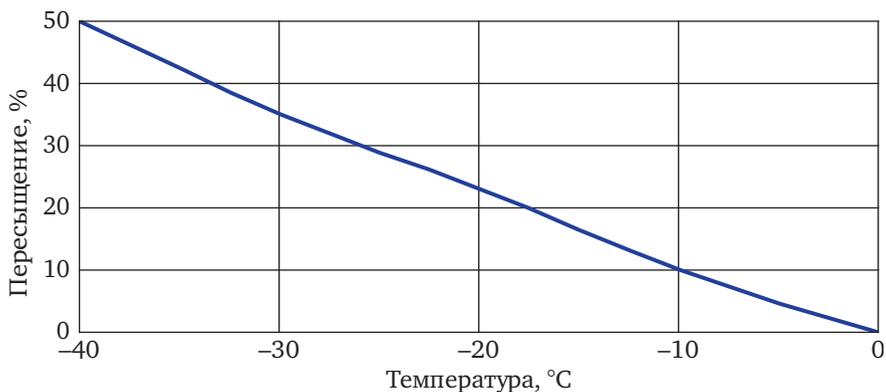


Рис. 1.7. Пересыщение водного пара при различных температурах²

¹ Голубев В. Н. Структурное ледоведение. Теоретические основы конжеляционного льдообразования. М. : Изд-во МГУ, 1999.

² Rodgers R. R. A short course in cloud physics. 2nd ed. New York : Pergamon Press, 1979.

Процесс перехода воды из жидкого состояния в твердое происходит в некотором объеме, и следует говорить не о фронте кристаллизации, а об области кристаллизации, которая захватывает: 1) часть переохлажденной воды, в пределах которой кластеры с соответствующей ориентацией квазирешетки могут присоединяться к поверхности кристалла; 2) ближайшую к границе раздела зону внутри кристалла, где происходит релаксация структурного несовершенства кристалла. Таким образом, существует определенная переходная зона, которая, реагируя на изменение внешних условий, определяет строение и морфологию кристаллов.

Скорость роста кристалла льда будет определяться скоростью притока вещества или скоростью отвода теплоты кристаллизации. Используя методы термодинамики необратимых процессов, для потока массы растущего льда q_s Б. В. Дерягин¹ получил следующее выражение:

$$q_s = \alpha_{11} \left(dP + \rho_s Q \frac{dT}{T} \right),$$

где α_{11} — коэффициент, который характеризует сопротивление смещению льда, зависящее от гидродинамического сопротивления коммуникаций; ρ_s — плотность; Q — теплота фазовых переходов; dT — понижение температуры; dP — перепад давления. В работе С. Е. Гречищева² на основе рассмотрения кинетики взаимодействия фаз в области границы фазовых переходов было получено выражение

$$v_w d(Cq_w) = -Q \frac{dT}{T} - v_{ice} dG^{sk} - (v_{ice} - v_w) dP,$$

где v_w и v_{ice} — удельные объемы соответственно пленки воды и льда; q_w — поток влаги; C — коэффициент; G^{sk} и P — давление соответственно во льду и в водяной пленке. Нетрудно видеть сходство выражений С. Е. Гречищева и Б. В. Дерягина, а впервые формула подобного типа для описания скорости фазового перехода была предложена, по-видимому, академиком Н. С. Акуловым еще в 1946 г. Другие аспекты кинетики кристаллизации льда можно найти, например, в работе А. А. Шибкова, М. А. Желтова, А. Е. Золотова или В. Д. Мюррея³.

¹ Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. М., Наука, 1987.

² Гречищев С. Е., Чистотин Л. В., Шур Ю. Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980.

³ Шибков А. А., Желтов М. А., Золотов А. Е. Морфологический отбор евклидовых и фрактальных форм неравновесного роста льда в переохлажденной воде // Кристаллография. 2011. Т. 56. № 2. С. 362—366; Murray B. J. et al. Kinetics of the homogeneous freezing of water // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. Vol. 12. P. 1

Благодаря большой скорости реакции форма кристаллов льда очень чувствительна к внешним условиям; изменение среды может вызвать быструю смену способных расти или сохраняться форм. Так, выступ на поверхности растущего кристалла будет находиться в более благоприятных условиях роста. Поэтому поверхность растущих кристаллов, как правило, неровная.

При медленном росте образуются сплошные грани, несущие параллельную базису штриховку линии нарастания. Если базисная плоскость кристалла параллельна поверхности роста, то на ней наблюдаются отдельные ступени высотой порядка 0,4—0,6 мм. В том случае, когда базисная плоскость растущего кристалла расположена под углом к плоскости роста, на ней формируется система параллельных борозд. Каждый выступ представляет собой ледяную пластинку толщиной в доли миллиметра. На ребрах пластинок часто наблюдается мелкая зазубренность под углом 60° — зачатки скелетного роста по одной из побочных осей. В случае большого наклона главной оси к направлению роста и большому содержанию примесей в растворе высота выступающих частей достигает размера в несколько миллиметров. Это явление известно как *штриховка Фореля*. Она представляет собой тонкую прямолинейную ребристость на поверхности ледяных кристаллов, расположенную по линиям сечения поверхности базисной плоскостью.

Свежеобразованный лед претерпевает многочисленные микроструктурные преобразования, связанные с рекристаллизацией и достройкой структуры кристаллов. Этот процесс выделяется как *первичный диагенез* льда.

1.2.1. Кристаллизация в растворах

В природной воде всегда содержатся растворенные соли, что оказывает влияние на процессы замерзания воды и кристаллизации льда. Взаимодействие ионов солей с молекулами воды (гидратация) эквивалентно повышению температуры жидкости или понижению потенциальных барьеров между молекулами, что приводит к понижению температуры замерзания. Химический состав природных растворов разнообразен, поэтому рассмотрим процесс их охлаждения и замерзания на примере морской воды; такие растворы обычны, например, в засоленных мерзлых породах Арктического побережья.

Морская вода, в среднем, состоит из следующих химических элементов: Cl — 19,7 г/кг; Na — 10,8; SO_4 — 2,7; Mg — 1,3; Ca — 0,4; K — 0,4; HCO_3 — 0,1; Br — 0,07; Sr — 0,08 г/кг¹. При понижении температуры в определенной точке, зависящей от концентрации раствора и возможностей переохлаждения (табл. 1.1), начинает кристаллизоваться лед; остающийся по мере выделения льда раствор становится более концентрированным.

Состав и соотношение фаз при разных температурах при вымораживании морской воды¹

Температура, °С	Состав и количество солей (г) на 1 кг морской воды							Соотношение фаз		
	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	CaSO ₄	NaCl	KCl	MgCl ₂	жидкая (на 1000 г смеси)	твердая (чистый лед + + соль на 1000 г смеси)		
0,0	—	—	—	—	—	—	1000	—		
-1,8	—	—	—	—	—	—	1000	—		
-5,6	648,2	—	—	—	—	—	351,8	648,2		
-7,6	78,0	0,16	—	—	—	—	273,6	726,4		
-9,5	40,1	1,65	—	—	—	—	231,9	768,1		
-10,6	21,8	0,47	—	—	—	—	209,6	790,4		
-12,3	18,2	0,32	—	—	—	—	191,0	809,0		
-15,0	21,1	-0,04	0,15	—	—	—	169,3	830,7		
-17,0	16,7	-0,09	0,11	—	—	—	152,6	847,4		
-22,6	32,8	-0,24	0,36	2,47	—	—	117,6	882,4		
-24,2	27,3	-0,08	0,29	11,43	—	—	68,8	931,2		
-26,0	15,5	-0,15	0,10	4,40	—	—	48,9	951,1		
-28,0	6,7	-0,09	1,80	1,80	—	—	40,4	959,6		
-30,8	5,5	-0,05	0,06	1,30	—	—	33,6	966,4		
-32,2	1,2	-0,05	0,03	0,70	—	—	32,7	967,3		
-34,2	3,7	-0,04	0,02	0,52	0,13	—	27,4	972,6		
-35,5	1,2	-0,01	0,02	0,28	0,10	—	25,8	974,2		

¹ Хорн Р. Морская химия. М. : Мир, 1972.

Если температура продолжает понижаться, то при $-8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (или $-7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ по Гиттерману из рассола кристаллизуется глауберова соль (мирабилит) — $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, а при $-22,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ — NaCl . При температуре $-36,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ из рассола выпадает KCl , при $-43,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и при $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ¹. Выпадает также некоторое количество CaCO_3 . Наконец, при температуре $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ замерзает весь раствор. В системе при понижении температуры непрерывно меняется состав солей и соотношение фаз. Если замерзание началось с большей или меньшей концентрации раствора в сравнении с морской водой, то изменяются скорость замерзания и количество льда, а система проходит аналогичные стадии. При этом до температуры $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ (и выше) основная масса солей (99,65 %) находится в растворе, за исключением глауберовой соли². Показательно также сравнение данных по вымораживанию Na_2SO_4 . По Рингеру с понижением температуры в системе происходит непрерывное увеличение Na_2SO_4 в твердой фазе, по Гиттерману вначале наблюдается нарастание Na_2SO_4 в жидкой фазе до температуры $-7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (за счет увеличения концентрации рассола в результате выделения пресного льда), а затем наступает понижение концентрации Na_2SO_4 до температуры $-22,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. При дальнейшем понижении температуры концентрация Na_2SO_4 в жидкой фазе вновь возрастает, достигая второго максимума при $-35,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это явление объясняется регенерацией солей в разных фазовых состояниях (согласно реакции $\text{CaSO}_4 + 2\text{NaCl} = \text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, а потом наоборот по мере вымерзания). 1 кг морской воды с соленостью 35,5 %, замороженной при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ содержит: твердая фаза: 931,9 г — лед; 203,2 — кристаллы NaCl ; 3,95 — кристаллы Na_2SO_4 ; следы кристаллов CaCl_2 ; рассол 43,95 г (из них 23,3 г H_2O ; остальное Na — 1,42 г, Mg — 1,31 г, K — 0,38 г, Ca — 0,39 г, Cl — 7,03 г, Br — 0,08 г, SO_4 — 0,09 г)³.

Соли выпадают в осадок при замерзании раствора преимущественно в виде кристаллогидратов. В естественных условиях они образуют своеобразную криотермную горную породу, например отложения мирабилита в Тянь-Шане или в донных отложениях озер Забайкалья⁴. При этом кинетика процесса весьма сложна, при быстром замерзании раствора электролит может попасть в состав льда (захват ионов, рассола), процесс захвата ионов селективный, с образованием электрических потенциалов (так называемый эффект Воркмана — Рейнольдса, предложенный для объяснения причины электризации при грозе). В реальных условиях замерзания более

¹ Савельев Б. А. Физика, химия, и строение природных льдов и мерзлых горных пород. М. : Изд-во МГУ, 1971.

² Зубов Н. Н. Морские воды и льды. М. : Гидрометиздат, 1938.

³ Зубов Н. Н. Морские воды и льды.

⁴ Иванов А. В. Теория криогенных и гляциогенных гидрохимических процессов. М. : ВИНТИ, 1987.

плотный рассол может опускаться вниз и лед образуется из опресненной воды, возникают различные конвективные потоки, обусловленные градиентами концентрации, плотности, температуры и т. д. В результате захвата ионов, быстро образующийся лед является более соленым, чем медленно образующийся (от 5,64 % при $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 10,16 % при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)¹. Ячейки с рассолом во льду являются подвижными (от нескольких миллиметров в день до нескольких миллиметров в час), скорость их движения зависит от температурного градиента. Важное значение имеет также процесс захвата ионов кристаллами льда. Во льду возрастает концентрация водородных ионов и снижается рН.

В поверхностных и подземных водах криолитозоны, в отличие от морской воды, часто содержится большое количество растворенного углекислого газа CO_2 и, соответственно, гидрокарбонатов, что приводит к выпадению в осадок при замерзании в первую очередь кальцита CaCO_3 при довольно высоких отрицательных температурах — около $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Например, белесые налеты карбонатов на поверхности земли или стволах деревьев после схода снежного покрова или после оттаивания наледей — довольно распространенное явление. Это наблюдается и в случае морского ледяного покрова.

Замерзание поровой воды осложняется в дисперсных грунтах также ориентирующим влиянием твердых частиц, что приводит к понижению температуры замерзания. Так, в ямальском суглинке (оз. Тюрин-То) с естественной засоленностью 0,4 % при температуре $-3\text{...}-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ еще содержится от 10 до 20 % незамерзшей воды, т. е. концентрация порового раствора составляет 20—40 г в 1 л. Соответствующие данные по суглинку из района Югорского полуострова свидетельствуют о том, что при засоленности 1,5 % и влажности 16 % температура замерзания составляет $-6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, при $W = 19\text{ }%$ — $-4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, при $W = 32\text{ }%$ — $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В некоторых случаях необходимо учитывать тепловые эффекты растворения и солей в осадок в поровом растворе. Сами по себе эти эффекты невелики, особенно в сравнении с теплотой кристаллизации воды. В частности, при растворении 1 моля NaCl (58 г) поглощается 5,36 кДж (или 1,28 ккал), т. е. около 22 кал на 1 г соли. Теплота плавления льда составляет около 80 кал/г, а теплоемкость воды — 1 кал/(г·градус). При обычном содержании солей около 3—5 % тепловой эффект растворения едва достигает 1—2 % от теплоты фазового перехода вода — лед. Например, необходимо растворить около 100 г соли, чтобы поглощенного тепла было достаточно для замораживания 27 г воды. При этом растворение 45 г NaCl способно понизить температуру 1 л воды на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. точные расчеты температуры породы должны

¹ Иванов А. В. Теория криогенных и гляциогенных гидрохимических процессов.

учитывать тепловые эффекты растворения/выпадения солей. Еще более важное значение этот эффект может приобретать в случаях, когда растворяются большие объемы соли. При соприкосновении залежей каменной соли с водой возможно значительное понижение температуры пород до отрицательных значений, с образованием локальных мерзлых участков. Нечто подобное, возможно, происходит в условиях высокогорных соленых озер¹.

Таким образом, замерзание порового раствора представляет собой сложный процесс, сопровождающийся выделением льда (в той или иной степени содержащего соли) и концентрированием остающегося раствора, в котором происходят химические реакции и осаждение солей. Температура полного замерзания (при морском составе солей) является экспериментальной величиной и изменяется, по различным данным, от $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ для свободного раствора морской воды и, вероятно, еще ниже для порового раствора засоленных мерзлых пород. Концентрация порового раствора является функцией температуры, но физико-химические и особенно химические процессы при изменениях температуры не всегда являются обратимыми. Такой характер процесса замерзания свидетельствует о неустойчивом характере равновесия в поровом растворе засоленных мерзлых пород.

Формы ледяных кристаллов, растущих в растворах, своеобразны. Пластинчатое строение кристаллов льда и обусловленная им ребристость бывают видны в результате кристаллизации из воды, богатой растворимыми примесями, которые располагаются через более или менее равные промежутки в виде тончайших прослоек по базисным плоскостям кристаллов.

В процессе охлаждения раствора происходит отдельное формирование решеток льда и у каждой из солей. При этом происходит расслаивание раствора (расплава), причем соли вытесняются к периферии области роста зародыша, а затем и кристалла льда. Вокруг кристаллов образуются как бы «клетки» и «каналы» из ячеек раствора повышенной концентрации (рис. 1.8).

Поверхность фронта кристаллизации льда становится ячеистой (вместо плоской структуры). Изменение подвижности молекул воды в растворе и температуры фазового перехода наиболее сильно сказывается на стадии возникновения зародышей льда, а преобразование формы фронта кристаллизации и формирование прослоек и ячеек рассола — на стадии роста сформировавшихся зародышей. Процессы выпадения кристаллогидратов солей и миграция рассолов определяют уже отвердевание поликристаллического ледяного образования. Минеральные примеси и растворенные соли в ходе роста распределяются между элементарными пластинками внутри

¹ Иванов А. В. Теория криогенных и гляциогенных гидрохимических процессов.

кристаллов и между кристаллами. В соленых льдах рассол образует прослойки в базисных плоскостях кристаллов, разделяющих кристаллы на ряд пластинок. Чем быстрее происходила кристаллизация и чем больше концентрация солей, тем толще прослойки рассола (до нескольких миллиметров при близкой к нулю температуре) и тем тоньше относительно разделяемые ими элементарные пластинки льда. Расстояние между соседними прослойками включений в кристалле тем меньше, чем больше концентрация примесей в растворе.



Рис. 1.8. Каналы с солевым раствором внутри морского льда¹

1.2.2. Нарастание льда на твердое основание

Экспериментами установлено, что кристаллы льда нарастают на подложку преимущественно главной осью параллельно основанию (по закону Кальба) в условиях обратной температурной стратификации, когда переохлаждение возрастает по мере удаления от поверхности основания внутрь толщи воды и основание играет роль только места зарождения кристаллов, а не источника холода. При намерзании растущая поверхность кристалла льда в этом случае сформирована ребрами базисных пластинок и будет иметь полосчатое строение.

Кристаллы льда нарастают преимущественно главной осью по нормали к основанию (по так называемому закону Бэртэна)

¹ Фото из книги: *Thomas D. Frozen oceans: the floating world of pack ice*. British Museum Press, 2005.

в условиях теплоотдачи в этом направлении, когда переохлаждение в стадию протокристаллизации ограничено более или менее тонким слоем воды, прилегающим к основанию. Чем тоньше переохлажденный слой в момент зарождения кристаллов, тем однообразнее ориентировка.

1.2.3. Плавление (термическое разрушение) льда

Пластинчатое строение кристалла льда проявляется в процессах, происходящих при его таянии. Разрыв связей происходит не только на поверхности льда, но и в определенном слое, который в зависимости от свойств льда (прозрачности, плотности и др.) может достигать десятков сантиметров. Ослабление промежутков между базисными плоскостями отчетливо проявляется в распространении по этим плоскостям областей внутреннего таяния, так называемых «цветов Тиндаля»¹ (рис. 1.9), при поглощении тепловой энергии. «Цветы» расположены параллельно друг другу в базисных плоскостях, а лепестки «цветов» — в направлении побочных кристаллографических осей. Возникновение фигур плавления указывает на анизотропию внутреннего таяния, распространяющегося по базисной плоскости.

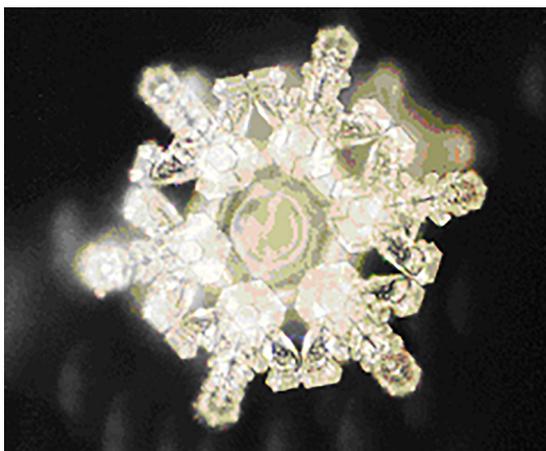


Рис. 1.9. Водный цветок, образующийся при плавлении льда, — феномен, известный как «цветы Тиндаля» (фото М. Емото)

Монокристалл льда можно представить как агрегат, состоящий из тонких (около 0,06 мм), но прочных пластинок, перпендикулярных оптической оси, которые соответствуют слоям густого расположения атомов. Минеральные примеси и соли в ходе роста равно-

¹ Tyndall J. On some physical properties of ice // Philosophical Transactions of the Royal Society. London, 1958; Takeya S. Growth of internal melt figures in superheated ice // Applied Physics Letters. 2006.

мерно распределяются между элементарными пластинками внутри монокристалла льда. Несмотря на то что кристаллы льда имеют сложное строение и состоят из отдельных слоев, они могут считаться монокристаллами, поскольку имеют по всему объему одно и тоже направление главной оптической оси.

1.3. Формирование льда в атмосфере

Нет двух снежинок одинаковой формы

(старая поговорка, справедливость которой трудно проверить)

Лишь около 15 % водяного пара, постоянно присутствующего в атмосфере, дают начало атмосферным ледяным образованиям, которые могут достигать земной поверхности в виде твердых осадков (снег, снежные зерна, крупа, ледяной дождь, град). Однако благодаря именно этой составляющей природных льдов поддерживается существование снежников и ледниковых щитов и на 14 % поверхности Земли (72 млн км²) ежегодно формируется устойчивый снежный покров¹.

Начало кристаллизации воды в атмосфере зависит от температуры (табл. 1.2). В зависимости от термодинамических условий в тропосфере и в приземном слое во время выпадения снежные кристаллы могут иметь разнообразную форму и размеры.

Таблица 1.2

Вероятность возникновения ледяных кристаллов в атмосфере²

Температура, °C	Потенциальное начало кристаллизации
0	Нет зародышеобразования
-4	
-10	60%-ная вероятность зародышеобразования и присутствия льда
-12	70%-ная вероятность зародышеобразования и присутствия льда
-15	90%-ная вероятность зародышеобразования и присутствия льда
-20	100%-ная вероятность зародышеобразования и присутствия льда

¹ Snow and climate: physical processes, surface energy exchange and modeling / R. L. Armstrong, E. Brun (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 2008; Atlas of Canada: Average maximum snow depth // Reference Out-line Map Series 6355, Scale 1 : 7 500 000. Ottawa, ON, Canada : Natural Resources Canada, 2010.

² Pruppacher H. R., Klett J. D. Microphysics of clouds and precipitation. 2nd ed. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1997.

Международная ассоциация гидрологии предложила следующую классификацию формы снежных кристаллов: пластинка, звездчатый кристалл, столбик, игла, древовидный кристалл, увенчатый столбик, неправильный кристалл, крупа. В соответствии с формой первичных снежных кристаллов носят название и их сростки: звездчатые, пластинчатые, столбчатые и пр. Согласно опытам У. Накая, при температурах от 0 до -4 °C вырастают плоскопараллельные пластинки, от -4 до -10 °C — вытянутые столбики, от -10 до -22 °C — вновь пластинки и при температурах ниже -22 °C — опять столбики (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Формы ледяных кристаллов в зависимости от температуры¹

Температура, при которой происходит зарождение, °C	Морфология кристаллов	Изображение
От 0 до -4	Тонкие простые пластинки	
От -3 до -6	Иглы	
От -6 до -10	Пустотелые колонны	
От -10 до -12	Пластинки разной формы, в том числе разветвленные	
От -12 до -16	Дендриты, а также разнообразные пластинки	
От -16 до -22	Пластинки разной формы, в том числе разветвленные	
От -22 до -40	Целые и пустотелые колонны, розетки	

Чем ниже температура воздуха, тем мельче размеры выпадающих снежинок. Диаметр «ледяных иголочек», выпадающих в безветренную погоду при очень сильных морозах, не превосходит нескольких микронов. Например, в Антарктиде на станции «Пионерская»² при температуре воздуха -50 °C отмечался размер кристаллов выпадающего снега около 0,1 мм. При температуре от -30 до -40 °C диаметр снежинок составляет 0,15—0,25 мм, а при -3 °C он равен 1—2 мм, т. е. на порядок больше. Наиболее крупные снежинки выпадают в условиях морского климата, где зимняя температура воз-

¹ Ibid.

² Котляков В. М. Снежный покров Земли и ледники. Л. : Гидрометеиздат, 1968.

духа близка к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹. На Черноморском побережье Кавказа и юго-западных склонах Главного Кавказского хребта, на острове Хоккайдо и Курильских островах, на Сахалине диаметр свежееотложившихся снежинок может превышать 5 см.

Роль примесей в зарождении кристаллов. Еще Оствальдом было сформулировано так называемое *правило ступеней*, гласящее, что если из ставшего неустойчивым состояния вещество может перейти в другие агрегатные состояния различной степени устойчивости, то сначала появляются менее устойчивые и лишь затем более устойчивые формы². Согласно этому правилу перенасыщенный водяной пар при отрицательных температурах должен сначала конденсироваться в капли переохлажденной воды, которая затем кристаллизуется³.

Формирование льда в атмосфере и в самом деле происходит, как правило, в виде двухступенчатого процесса. На первой ступени происходит конденсация водяного пара на различных частицах примесей, на второй — гетерогенная кристаллизация капель сконденсировавшейся влаги при столкновении их с присутствующими в атмосфере ледяными или инородными частицами. Основанием для выдвигения этой гипотезы гетерогенного механизма формирования льда в атмосфере послужили:

а) присутствие в ледяных кристаллах инородных частичек, нерастворимых в воде;

б) развитие конденсационных процессов при парциальном давлении водяного пара ниже требуемого для реализации гомогенного механизма;

в) кристаллизация капель при относительно высокой температуре воздуха (выше $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Ядрами кристаллизации могут служить различные объекты⁴. Некоторые материалы ускоряют кристаллизацию, и она обычно начинается при более высокой температуре, называемой температурой активации, чем в присутствии других (табл. 1.4). Интересно, что хорошими ядрами кристаллизации могут служить некоторые бактерии, в которых найдены белки, стимулирующие зародышеобразование. Необходимым условием эпитакии, т. е. нарастания одного материала на другой, является близкое совпадение параметров решеток субстрата и нарастающего материала.

¹ Pike W. S. Unusually-large snowflakes // J. Meteor. 1988. Vol. 13. P. 3—16.

² Супота Н. Н. О причинах появления метастабильных состояний при кристаллизации. Существует ли правило ступеней Оствальда в теории кристаллизации // Журнал технической физики. 1948. Т. 18. Вып. 9. С. 36—48.

³ Shibkov A. A. et al. Morphology diagram of nonequilibrium patterns of ice crystals growing in supercooled water // Phys. A. 2003. Vol. 319. P. 65—79.

⁴ Petrenko V. F., Whitworth R. W. Physics of ice. Oxford, UK : Oxford Univ. Press, 1999; Libbrecht K. G. The physics of snow crystals // Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 855—895.

Ядра кристаллизации льда и температуры их активации¹

Материал	Температура активации, °С	Источник
Некоторые бактерии	-2,9	Найдены на разлагающихся древесных листьях
Иодистое серебро	-4	Используется для образования искусственных облаков
Сульфид меди	-7	Находится в сточных водах
Хлористый натрий	-8	Морская вода
Каолинит	-9	Глинистый минерал
Вулканический пепел	-13	Обычный аэрозоль
Вермикулит	-15	Глинистый минерал

У. Накая² экспериментально установил, что образование атмосферных кристаллов льда проходит через стадию сжижения. Процесс формирования капли на твердой частице включает в себя несколько этапов. На первом этапе на поверхности твердого тела конденсируются мелкие зародышевые капельки. При высокой концентрации водяного пара изолированные капельки, разрастаясь по поверхности частицы, наконец, сливаются в одну каплю, вмещающую в себя частицу, явившуюся инициатором конденсации.

Дальнейший рост кристаллов может происходить двумя путями. Во-первых, лед образуется в результате сублимации на ядре из водяного пара, непосредственно переходящего в твердое состояние. Во-вторых, он возникает на ядре в результате отвердевания жидкой пленки или присоединившихся капель воды. Последующее встраивание молекул водяного пара в кристаллическую решетку льда можно рассматривать как двухстадийный процесс, включающий в себя:

1) вхождение молекул в концентрационную зону, распространяющуюся от поверхности кристалла приблизительно на длину свободного пробега молекул (10^{-5} см);

2) собственно встраивание молекулы в решетку льда, что предполагает возникновение водородной связи между адсорбированной молекулой и поверхностной молекулой льда и последующую миграцию адсорбированной молекулы по поверхности к месту присоединения (к ступени роста или к дислокации).

Существует зависимость между кривизной поверхности растущего кристалла и упругостью пара. Над кристаллами, имеющими

¹ Rodgers R. R. A short course in cloud physics.

² Nakaya U. The formation of crystals // Compendium of Meteorology. Amer. Meteorol. Soc. Boston, 1951.

форму шестиугольной пластинки, упругость пара над вершинами выше, чем над ребрами и плоскими гранями; в свою очередь упругость пара над ребрами превышает упругость пара над гранями, а упругость пара над последними больше, чем в углублениях. Соответственно, диффузия пара к плоскости пластинки начинается при меньшем пересыщении, чем диффузия к ребрам и вершинам. Следовательно, при незначительных пересыщениях формируются столбчатые кристаллы, а при повышении пересыщения возникают пластинки, еще большее пересыщение приводит к образованию дендритной формы кристаллов атмосферного льда¹.

Многообразие форм кристаллов льда в атмосфере объясняется тем, что льдообразование происходит при очень высоких для льда температурах, поэтому давление паров воды велико и физические процессы на поверхности растущих кристаллов протекают чрезвычайно интенсивно. При температурах, близких к точке плавления льда, его поверхность покрывается тонкой жидкой пленкой. Такая пленка носит название квазижидкого или переходного слоя. Первым мысль о существовании на поверхности льда квазижидкого слоя высказал в 1850 г. М. Фарадей, открывший явление «перезамораживания» льда. Спустя примерно 100 лет американский химик В. Уайл (W. A. Weyl), воспользовавшись аналогией с двойным электрическим слоем, который образуется на поверхности ионных кристаллов, дал теоретическое обоснование возможности существования на поверхности льда квазижидкого слоя.

Для рассмотрения состояния поверхности кристалла льда воспользуемся представлениями Н. Маэно². На поверхности квазижидкого слоя расположение дипольных молекул воды в достаточной мере упорядочено. При 0 °С степень ориентации составляет 0,74, т. е. 74 % молекул воды ориентированы протонами наружу. По мере продвижения вглубь от поверхности степень ориентации экспоненциально спадает и в толще кристалла льда принимает характерное для неупорядоченного расположения значение 0,5. Следовательно, квазижидкий слой можно назвать переходным: по его глубине от поверхности до границы с кристаллом льда происходит непрерывное изменение расположения диполей, и в результате образуется двойной электрический слой. Название «квазижидкий» дано этому слою потому, что он и не жидкий, и не кристаллический, расположение молекул воды внутри него хаотично, как в жидкости, но ориентация диполей по сравнению с самим кристаллом льда отличается упорядоченностью. Переходный слой захватывает от нескольких десятков до нескольких сотен молекулярных слоев. Соответственно

¹ Савельев Б. А. Физика, химия, и строение природных льдов и мерзлых горных пород.

² Маэно Н. Наука о льде. М. : Мир, 1988.

меняется и его толщина, причем при приближении к точке плавления она резко возрастает. Хотя строение переходного слоя требует дальнейшего изучения, можно предположить, что в нем так же, как и в воде, вблизи растущей поверхности формируются ассоциации молекул (кластеры), встраивающихся затем в кристаллическую решетку ледяного кристалла.

У льда базисная плоскость обладает значительно большей ретикулярной плотностью, чем все другие грани, следовательно, скорость роста в направлении побочных осей будет наибольшая. В результате во время роста ледяных кристаллов в атмосфере развиваются преимущественно пластинчатые кристаллы. Поскольку наибольший рост наблюдается у вершин растущих граней, то кластеры, сформировавшиеся в квазижидком слое, для того чтобы восстановить нарушенное равновесие, перемещаются в первую очередь именно сюда. В результате скелетного роста формируются плоские снежинки. Интересные особенности кристаллизации льда были получены при изучении некоторых биологических молекул¹, например так называемых *binding proteins*².

Облака. Отдельные элементарные криогенные системы, формирующиеся в атмосфере, не играют существенной роли в природных процессах. Однако роль эта резко усиливается при формировании скоплений данных образований в виде облаков.

Облака являются результатом разнообразных физических процессов, происходящих в атмосфере³. Чаще всего их образование происходит в результате восходящего движения воздуха. При подъеме воздуха на каждые 100 м происходит его адиабатическое охлаждение на один градус. Таким образом, для воздуха, не очень далекого от насыщения, вполне достаточно подняться вверх на несколько сотен метров, в крайнем случае на одну-две тысячи метров, чтобы в нем началась конденсация.

В результате подъема воздуха и скопления в определенных зонах продуктов конденсации — капелек и кристаллов — возникают облачные системы, достигающие площади в сотни тысяч квадратных километров. Размеры облачных элементов — капелек и кристаллов — настолько малы, что их вес уравнивается силой трения еще тогда, когда они имеют очень малую скорость падения. Установившаяся скорость падения капелек получается равной лишь долям сантиметра в секунду. Скорость падения кристаллов еще меньше. Это отно-

¹ Wang W. Lyophilization and development of solid protein pharmaceuticals // Int. J. Pharm. 2000. Vol. 203. P. 1—60; Knight C. A., Wierzbicki A. Adsorption of biomolecules to ice and their effects on ice growth. 2. A discussion of the basic mechanism of antifreeze phenomena // Cryst. Growth. Des. 2001. № 1. P. 439—446.

² Bissoyi A. et al. Ice nucleation properties of ice-binding proteins from snow fleas // Biomolecules. 2019. Vol. 9 (10). P. 532.

³ Беспалов Д. П. и др. Атлас облаков. СПб. : Д'АРТ, 2011.

сится к неподвижному воздуху. Но турбулентное движение воздуха приводит к тому, что столь малые капельки и кристаллы вовсе не выпадают, а длительное время остаются взвешенными в воздухе. Облака переносятся воздушными течениями. Если относительная влажность в воздухе, содержащем облака, убывает, то облака испаряются. При определенных условиях часть облачных элементов укрупняется и утяжеляется настолько, что выпадает из облака в виде осадков. Механизмы такого подъема воздуха различны. Воздух может подниматься в процессе турбулентности в виде неупорядоченных вихрей. Он может подниматься в более или менее сильных восходящих токах конвекции. Может происходить и подъем больших количеств воздуха на атмосферных фронтах и в гребнях атмосферных волн.

Отдельные облака существуют подчас очень короткое время. Например, индивидуальное существование кучевых облаков иногда исчисляется всего 10—15 минутами. Это значит, что недавно возникшие капельки, из которых состоит облако, снова быстро испаряются. В действительности облака находятся в процессе постоянного новообразования и исчезновения (испарения; часто неправильно говорят — таяния). Одни элементы облака испаряются, другие возникают заново. Длительно существует определенный процесс облакообразования; облако же является только видимой в данный момент частью общей массы воды (в жидком и твердом состоянии), вовлекаемой в этот процесс.

Облака могут состоять и только из жидких капель, и только из ледяных кристаллов, а также из тех и других одновременно¹. По своему строению облака делятся на три класса.

1. Водяные (капельные) облака, состоящие только из капель воды. Они могут существовать не только при положительных температурах воздуха, но и при отрицательных ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже). В этом случае капли находятся в переохлажденном состоянии.

2. Смешанные облака, состоящие из смеси переохлажденных капель воды и ледяных кристаллов. Они могут существовать, как правило, при температурах воздуха от -10 до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Ледяные (кристаллические) облака, состоящие только из ледяных кристаллов. Они преобладают, как правило, при температурах воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1.10 показана повторяемость фазового состояния облаков в зависимости от температуры.

В теплое время года водяные облака образуются главным образом в нижних слоях тропосферы, смешанные — в средних слоях, ледяные — в верхних. В холодное время года при низких температурах смешанные и ледяные облака могут возникать и вблизи земной поверхности. Чисто капельное строение облака могут сохранять

¹ Беспалов Д. П. и др. Атлас облаков.

до температур порядка $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (иногда и ниже). При более низких температурах в облаке наряду с капельками встречаются и кристаллы, т. е. облако является смешанным. Наиболее высокие облака тропосферы, наблюдающиеся при температурах порядка $-30\dots-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеют, как правило, чисто кристаллическое строение.

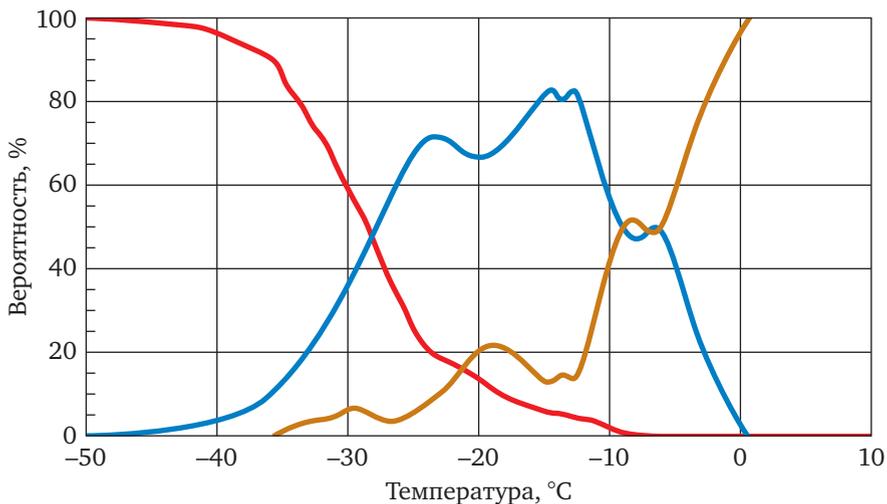


Рис. 1.10. Вероятность различного фазового состояния облаков при разной температуре¹;

— желтая — капельные облака; — синяя — смешанные облака;
— красная — кристаллические облака

Количество капелек в единице объема облачного воздуха сравнительно невелико: от сотен на кубический сантиметр в нижней тропосфере до единиц на кубический сантиметр в высоких слоях тропосферы. Содержание кристаллов в облаках еще меньше — порядка 0,1 на один кубический сантиметр. В водяных облаках на каждый кубический метр облачного воздуха приходится от 0,2 до 5 г воды. В кристаллических облаках водность значительно меньше — сотые и тысячные доли грамма на каждый кубический метр.

Формы облаков в тропосфере очень разнообразны. Однако их можно свести к относительно небольшому числу основных типов. Первая классификация облаков была предложена более полутора столетия тому назад (Л. Говардом в Англии). В конце XIX в. была принята международная классификация облаков, которая с тех пор несколько раз подвергалась существенным, однако не принципиальным изменениям². В современном варианте международной

¹ Morrison H. et al. Possible roles of ice nucleation mode and ice nuclei depletion in the extended lifetime of Arctic mixed-phase clouds // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32. ID: L18801.

² Беспалов Д. П. и др. Атлас облаков.

классификации облака делятся прежде всего на 10 основных родов по их внешнему виду.

Перечислим их:

- 1) перистые — *Cirrus* (Ci);
- 2) перисто-кучевые — *Cirrocumulus* (Cc);
- 3) перисто-слоистые — *Cirrostratus* (Cs);
- 4) высококучевые — *Alto cumulus* (Ac);
- 5) высокослоистые — *Altostratus* (As);
- 6) слоисто-дождевые — *Nimbostratus* (Ns);
- 7) слоисто-кучевые — *Stratocumulus* (Sc);
- 8) слоистые — *Stratus* (St);
- 9) кучевые — *Cumulus* (Cu);
- 10) кучево-дождевые — *Cumulonimbus* (Cb).

Верхний ярус облаков в полярных широтах простирается в среднем от 3 до 8 км, в умеренных широтах — от 5 до 13 км и в тропических широтах — от 6 до 18 км. Средний ярус в полярных широтах — от 2 до 4 км, в умеренных — от 2 до 7 км и в тропических — от 2 до 8 км. Нижний ярус во всех широтах — от земной поверхности до 2 км.

Из перечисленных 10 родов облаков три первых — перистые, перисто-кучевые и перисто-слоистые — встречаются в верхнем ярусе, высококучевые — в среднем, слоисто-кучевые и слоистые — в нижнем.

Высокослоистые облака обычно располагаются в среднем ярусе, но часто проникают и в верхний; слоисто-дождевые почти всегда располагаются в нижнем ярусе, но обычно проникают и в вышележащие ярусы.

Основания (нижние поверхности) кучевых и кучево-дождевых облаков обычно находятся в нижнем ярусе, но их вершины часто проникают в средний, а иногда и в верхний ярус.

Кратко рассмотрим их микроструктуру.

1—3. Перистые, перисто-кучевые и перисто-слоистые облака верхнего яруса — самые высокие облака тропосферы. Они встречаются при наиболее низких температурах и состоят из скелетных и призматических ледяных кристаллов. Эти облака часто дают оптические явления, называемые гало, т. е. светлые, слегка окрашенные круги вокруг дисков светил с радиусами 22° и 46° или различные комбинации светлых дуг. Эти явления создаются преломлением света в ледяных кристаллах облаков и отражением света от их граней.

4. Высококучевые облака представляют собой облачные пласты или гряды белого или серого цвета (или одновременно обоих). Характерное для них оптическое явление — венцы, т. е. окрашенные круги небольшого (в несколько градусов) радиуса вокруг дисков светил. Они связаны с дифракцией света водяными капельками облаков. При низких температурах они переохлаждены.

5. Высокослоистые облака имеют вертикальную мощность, измеряемую километрами. Данные облака являются типичными смешанными облаками: наряду с мельчайшими капельками в них содержатся и мелкие снежинки

6. Слоисто-дождевые облака имеют общее происхождение с высокослоистыми. Но они представляют собой более мощный слой, в несколько километров толщиной, начинающийся в нижнем ярусе, но простирающийся и в средний, а часто и в верхний. В верхней части слоя облака по строению схожи с высокослоистыми, а в нижней могут содержать также крупные капли и пластинчатые ледяные кристаллы.

7. Слоисто-кучевые облака представляют собой гряды или слои серых или беловатых облаков. В большинстве случаев слоисто-кучевые облака состоят из мелких и однородных капелек, при отрицательных температурах — переохлажденных, и не дают осадков. Случается, что из них выпадает слабая морось или (при низких температурах) очень слабый снег.

8. Слоистые облака — это самые близкие к земной поверхности облака: в равнинной местности их высота может быть всего несколько десятков метров над землей. Это однородный на вид серый слой капельного строения, из которого может выпадать морось. Но при достаточно низких отрицательных температурах в облаках появляются и твердые элементы; тогда из облаков могут выпадать ледяные иглы, мелкий снег, снежные зерна

9. Кучевые облака — это отдельные облака в нижнем и среднем ярусах, как правило, плотные и с резко очерченными контурами, развивающиеся вверх в виде холмов, куполов, башен. Кучевые облака состоят только из водяных капель (без кристаллов) и осадков, как правило, не дают.

10. Кучево-дождевые облака являются дальнейшей стадией развития кучевых. Они представляют собой мощные кучевообразные массы, очень сильно развитые по вертикали в виде гор и башен, часто от нижнего и до верхнего яруса. Кучево-дождевые облака состоят в верхних частях из ледяных кристаллов, а в нижних — из кристаллов и капелек различной величины, вплоть до самых крупных. Они дают осадки ливневого характера.

Несомненно, свойства совокупности кристаллов льда, формирующих облако, отличаются от свойств единичной снежинки. Облако имеет свои размеры, время существования, траекторию движения, внутренние связи и особенности взаимодействия с окружающей средой. Поэтому облака можно рассматривать как особые криогенные системы, отдельные структурные элементы которых рассеяны и находятся в постоянном движении. О современных физико-химических представлениях, касающихся ледяных форм в атмосфере, и в частности ледяных облаков, можно узнать из работы А. Богда-

на¹. Ледяные облака существуют и в атмосфере Марса². На других планетах облака существуют из других веществ — метана, углекислого газа, аммиака, гидросульфида аммония, сероводорода и других соединений³.

1.4. Формирование кристаллов льда в дисперсных отложениях

Дисперсные отложения, или горные породы, представляют собой многокомпонентные образования, содержащие частицы различного гранулометрического и минералогического состава, органические примеси (иногда они целиком имеют органический состав) и химические соединения. Горные породы являются средой обитания различных биоценозов. Кроме того, они имеют свою историю, отражающуюся в структуре, текстуре и условиях залегания. Жидкая вода в толщах дисперсных отложений распределена крайне неоднородно и всегда находится под воздействием активных поверхностей, она структурирована и представляет собой раствор. Поэтому здесь процесс льдообразования наиболее сложен по сравнению с другими средами.

Вблизи поверхности происходит изменения структуры воды. Они максимальны у границы раздела, уменьшаясь по мере удаления от нее. Толщина граничных объемов (слоев) жидкости, распространяющихся в глубь жидкой фазы, может меняться примерно от 1 до 10^3 нм. При этом толщина слоев с устойчивой информационной структурой может достигать многих ятков нанометров. При больших толщинах формируется переходный слой (или слои) с менее устойчивой, но измененной структурой. Структурирующее дальное действие усиливается с понижением температуры и увеличением гидрофильности ограничивающей поверхности⁴.

Вследствие искажения структуры воды в грунтах и ее минерализации температура начала льдообразования ниже 0 °С, причем в зависимости от состава среды она может значительно различаться. В водонасыщенных неминерализованных песках смещение точки

¹ Bogdan A. Ice clouds: atmospheric ice nucleation concept versus the physical chemistry of freezing atmospheric drops // The Journal of Physical Chemistry A. 2018. Vol. 122 (39). P. 7777—7781.

² Richardson M. I., Wilson R. J. Investigation of the nature and stability of the Martian seasonal water cycle with a general circulation model // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. № E5.

³ Зеленый Л. М., Захаров А. В., Ксанфомалити Л. В. Исследования Солнечной системы: состояние и перспективы // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. С. 1118—1140.

⁴ Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. 2-е изд., перераб. и доп. Пушкино : ОНТИ ПНЦ РАН, 2005.

замерзания воды незначительно и мало отличается от точки замерзания пресной воды. В незасоленных глинах и суглинках температура начала льдообразования понижается до $-1 \dots -1,5$ °С. Минерализация порового раствора приводит к резкому понижению температуры начала льдообразования. Кроме того, соли могут выпадать в осадок (см. выше) и взаимодействовать с минеральными частицами. В частности, возможно, например, образование гидрогалита $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ¹.

Грунтовый массив не является однородным, в нем имеются более крупные поры, содержащие менее искаженную поверхностными силами воду. В них могут формироваться первичные кристаллы льда. Наличие неоднородностей приводит к тому, что при достижении определенной отрицательной температуры формируются рассеянные, изолированные друг от друга кристаллы льда, окруженные частицами с отрицательной температурой. Поликомпонентность естественных грунтов создает условия для длительного развития ледяных образований; процесс кристаллизации происходит в несколько стадий в широком диапазоне температур. Данное положение справедливо и для условий фронтального теплообмена, т. е. существует не фронт в обычном понимании, а область промерзания, в которой возникновение ледяных кристаллов возможно в любой точке, где соблюдается необходимое условие — отрицательная температура и достаточное переохлаждение. Образование единичного кристалла льда при переходе грунта от талого состояния в мерзлое является вероятностным процессом. Представление о протяженной зоне промерзания с отдельными центрами кристаллизации является основополагающим для понимания строения мерзлых пород, в частности закономерностей ориентации кристаллов, их размеров и форм². В англоязычной литературе для обозначения такого объемного промерзания вблизи нулевой изотермы используется термин *fringe*, означающий в переводе «бахрома» или «кайма».

При высоких градиентах температуры и относительно высокой влажности отложений зарождение кристаллов льда может происходить почти одновременно в нескольких областях, а формирующийся лед имеет обычно поликристаллическое строение. В случае малых градиентов температуры и низкой влажности грунта разрастание кристалла, возникшего ранее других, и тепловая релаксация препятствуют зарождению новых кристаллов.

Вероятно, что первичная кристаллизация льда может начинаться и в диффузном слое — адсорбированной грунтовыми частицами

¹ Merve Y., Lee C. C., Boily J.-F. Ice and cryosalt formation in saline microporous clay gels // ACS Earth and Space Chemistry. 2018. Vol. 2 (4). P. 314—319.

² Голубев В. Н. Структурное ледоведение. Строение конжеляционных льдов. М.: Изд-во МГУ, 2000.

жидкой фазе. При этом форма кристаллов льда вблизи поверхности твердого тела оказывается более изометричной. Ориентировка и упорядоченность оптических осей кристаллов по отношению к направлению теплоточка могут быть произвольными, поскольку определяются ориентировкой поверхности частицы, контактирующей со льдом. Отмечается эпитаксиальное воздействие поверхности твердого тела на кристаллизацию льда¹. Размеры кристаллов в приконтактном слое около поверхности твердого тела возрастают с увеличением гидрофобности материала, с уменьшением его температуропроводности и концентрации активных центров на его поверхности.

В кристаллах льда на контакте с минеральными частицами отмечаются блочное строение и повышенное содержание газовых и солевых включений. Неровности поверхности частицы могут вести к постепенному изменению ориентации кристалла, или являться причиной блочного строения с разориентацией соседних блоков на $3-8^\circ$.

Промерзание полностью водонасыщенного грунта является вариантом кристаллизации воды, содержащей большое количество механических примесей. При этом происходят захват минеральных, газовых и солевых включений и равномерное распределение их внутри кристалла. Формируется блочная структура, когда параллельные пластинчатые блоки льда чередуются с заключенными между ними зонами примесей. Вследствие значительной дефектности роста кристаллов происходит рассогласование отдельных блоков относительно ориентации первичного кристалла.

А.Д. Фролов³ предложил рассматривать процесс формирования мерзлых пород как ряд последовательно сменяющих друг друга стадий, в результате которых возникает новая пространственная криогенная кристаллизационно-коагуляционная структура (ПККС), обусловленная образованием и определенным распределением в объеме твердой фазы H_2O и в связи с этим новых контактов и структурных связей между частицами среды.

Выделяются следующие стадии.

1. Возникновение зародышей и рост мелких разрозненных кристаллов льда представляет собой начальную, подготовительную стадию, на которой среда, например влажный грунт, еще остается дисперсной: новые криогенные контакты, граничные зоны и структурные связи начинают формироваться и не играют существенной роли. Данная стадия важна тем, что она представляет собой начальный процесс криогенеза, который определяет форму, размеры и со-

¹ Голубев В. Н. Структурное ледоведение. Строение конжеляционных льдов.

² Голубев В. Н. Структурное ледоведение. Строение конжеляционных льдов.

³ Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов.

став кристаллов льда, что в свою очередь обусловлено величиной и направлением градиента температуры, формой фронта и числом центров кристаллизации, энергетическим состоянием и составом воды, концентрацией и типом примесей. На этой стадии нет фронта промерзания, а есть лишь трехмерная область кристаллизации.

2. Формирование «ледяной сетки» (рис. 1.11) как жесткой структуры соответствует образованию устойчивой ПККС, что является основным признаком криогенной породы. Лед следует рассматривать, с одной стороны, как породообразующий минерал, а с другой — как цементирующее вещество.

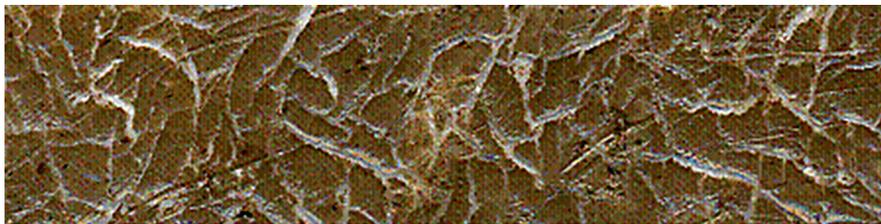


Рис. 1.11. Криогенная текстура морских засоленных отложений; минеральные ячейки не содержат льда, ледяные текстуры играют роль несущего каркаса

3. Консолидация ПККС за счет вымерзания жидкой фазы и метаморфизма льда.

4. Эволюция ПККС в условиях завершения фазовых переходов. Большинство криогенных пород в природных условиях не достигают этой стадии.

Выводы

1. Для начала льдообразования необходим некоторый минимальный объем воды. Если ее недостаточно, как, например, в атмосфере, необходимо предварительное слияние капель. Вода легко переохлаждается до низких температур. Еще до образования льда происходит формирование ассоциаций (кластеров), в которых имеются льдоподобные связи. Инородные частицы играют важную роль в инициации образования кристалла.

2. Вблизи растущей поверхности кристалла льда существует переходный слой, где формируются водные агрегаты. Нарастание кристалла льда происходит дискретно, путем присоединения агрегатов. Рост кристаллов происходит слоями, как правило, параллельными базисным плоскостям. Рост нового слоя может начинаться еще до окончания формирования предыдущего.

3. В начальный период роста связи между слоями еще окончательно не сформированы; по достижении некоторого времени связи укрепляются, и кристалл приобретает монолитное строение.

Все примеси, имеющиеся у растущей поверхности кристалла, распределяются между базисными плоскостями. При росте кристаллов из раствора температура кристаллизации снижается, происходит выпадение солей и возникает трудно воспроизводимый состав и структура смеси. Термическое разрушение кристаллов идет по ослабленным зонам вдоль базисных плоскостей.

4. При промерзании дисперсных отложений лед играет цементирующую или несущую (при значительном засолении) роль. Представление о фронте промерзания, соответствующем нулевой изотерме (или изотерме начала льдообразования), является относительным: промерзание происходит в некоторой протяженной зоне, или объеме. Вода в горных породах замерзает в спектре температур; слои незамерзшей воды, возникающие благодаря ориентирующему влиянию минеральных частиц и солям в поровом растворе, подвижны и определяют многие свойства мерзлых пород. Криогенное строение определяется первичным строением отложений и условиями промерзания.

Тема 2

КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛИТОСФЕРЕ

В теме 1 было рассмотрено образование криогенной системы в дисперсных горных породах на уровне отдельного кристалла льда. И хотя кристаллы льда входят во все криогенные системы литосферы, при рассмотрении строения мерзлых пород иметь в виду только льдообразование было бы неверно. Формирование мерзлых пород, т. е. пород, имеющих отрицательную температуру и включающих в себя лед, — процесс, наблюдающийся в разнообразных физико-географических условиях и имеющий различную продолжительность, от месяцев до миллионов лет. Мерзлые породы, будь то сезонные или многолетние образования, являются результатом естественно-исторического развития природной среды и зонального распределения тепла и влаги на Земле. Их история включает осадочный процесс, обусловленный ландшафтно-географическими условиями, и тепловые процессы в земной коре, определяющие замерзание воды и таяние льда. Поэтому при изучении образования, изменения и разрушения криогенных систем литосферы следует рассматривать не только особенности льдообразования, но и комплекс геолого-географических и теплофизических факторов¹.

Основой криогенных систем в литосфере является литогенная составляющая, выраженная в определенных генетических типах пород. Соотношение между условиями накопления, пространственного размещения и диагенетическими преобразованиями пород с определенными теплофизическими условиями, при которых возможно образование льда, определяет облик криогенных систем в литосфере. Выделяются четыре типа такого соотношения:

- 1) промерзание с выделением льда происходит после формирования породы — эпигенетический тип мерзлых пород;
- 2) осадки ежегодно откладываются на мерзлый субстрат и промерзают, наращивая мерзлую толщу — сингенетический тип;
- 3) мерзлая порода формируется за счет диагенетических преобразований в засоленных осадках с отрицательной температурой — криодиагенетический тип;

¹ Мельников В. П. и др. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования. Новосибирск : Гео, 2010.

4) четвертый тип мерзлых пород связан с консервацией льдосо-держающих пород, сформировавшихся в субаэральных условиях (по-гребенные ледники, снежники, льды водоемов, перекрытые осадка-ми, наледи).

Рассмотрим далее эти типы.

2.1. Эпигенетические мерзлые породы

Такие толщи — результат промерзания отложений после завер-шения цикла накопления¹. Условия могут быть разнообразными; на-пример, субаквальные осадки, долгое время оставаясь немерзлыми, могут перейти в субаэральное состояние и промерзнуть при похолодании только через сотни или тысячи лет. С другой стороны, они могут промерзнуть еще в субаквальном состоянии до начала диаге-неза. Несмотря на различные условия формирования и криогенное строение, эти мерзлые толщи выделяют как эпигенетические. Эле-ментарной криогенной системой при этом будет отдельная мерзлот-ная фация. Для морских отложений М. В. Кленова дает следующее определение фации: «под фацией мы понимаем участок морского дна с одинаковыми физико-химическими и биохимическими усло-виями, имеющий один и тот же источник питания, т. е. одинако-вый генезис как органических, так и минерогенных частиц, с оди-наковой флорой и фауной, переживших одну и ту же геологическую историю» (с. 187)². При этом фация — закономерно построенный геологический объект, при промерзании которого образуется толща с определенным криогенным строением. Облик такой криогенной системы будет определяться ее начальным составом и строением, условиями промерзания. Закономерная для каждого генетического типа совокупность фаций при промерзании приводит закономерно-му распределению элементарных криогенных систем, образующих вместе систему более крупного порядка — эпигенетическую крио-генную толщу данного генетического типа.

Формирование эпикриогенных толщ можно разделить на два этапа, которые различаются между собой интенсивностью проис-ходящих процессов эпикриогенеза. На первом этапе верхний го-ризонт осадочных толщ подвергается значительному воздействию сезонных колебаний температур и сильному зимнему охлаждению. Такой «горизонт активного криодиагенеза», по А. И. Попову³, имеет мощность, в зависимости от условий, от 2—7 до 10—12 м. На его мощность влияют поверхностные условия (глубина водоема, тепло-

¹ Harris S., Brouckov A., Cheng G. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms. CRC Press, 2017.

² Кленова М. В. Геология моря. М. : Учпедгиз, 1948. С. 187.

³ Попов А. И., Розенбаум Г. Э., Тумель Н. В. Криолитология. М. : Изд-во МГУ, 1985.

вое влияние растительного и снежного покрова, тепловые свойства пород) и температуры зимнего сезона.

Горизонт активного криодиагенеза ежегодно зимой подвергается резкому выхолаживанию. Именно здесь в мерзлых породах происходят изменения, отражающие взаимодействие литосферы и атмосферы. Это динамическая зона, в которой возникают значительные температурные градиенты — 1—5 °С/м. Промерзанию толщ, как правило, сопутствует миграция воды к фронту промерзания в глинистых породах, развиваются инъекционные процессы, происходит значительное уплотнение минеральных прослоев, возникают криогенные напоры в водоносных песчаных отложениях. Развиваются также процессы морозобойного растрескивания, наблюдается рост повторно-жильных льдов.

Формирование криогенного строения в пределах горизонта активного криодиагенеза в незасоленных грунтах в основном завершается при достижении грунтами температур –2...–5 °С. Здесь формируются слоистые и сетчатые текстуры. Размер ледяных включений и расстояние между ними обычно изменяются от 0,5 до 5 см. При дальнейшем понижении температур может продолжаться миграция влаги в сторону охлаждения. В засоленных грунтах монолитная криотекстура не формируется даже при –10 °С и ниже. За счет криогенной концентрации при образовании льда повышается минерализация порового раствора. Такая криогенная толща представляет собой чередование участков, сцементированных льдом с криогенными текстурами, и зон пластичных мерзлых пород, в которых лед присутствует в виде отдельных кристаллов или отсутствует вовсе. К песчаным водоносным горизонтам могут быть приурочены криопэги (минерализованные подземные воды с отрицательной температурой).

С глубиной температурные градиенты уменьшаются. Здесь выделяется горизонт «пассивного криодиагенеза»¹. По мощности он, как правило, во много раз превосходит предыдущий. Из-за слабого изменения температуры в течение года и меньших градиентов (от 1 до 0,2 °С/м) динамика промерзания и сопутствующие процессы в нем менее выражены.

Для горизонта пассивного криодиагенеза характерна крупнослоистая и крупносетчатая криогенная текстура, в которой мощность шпиров льда достигает 10—20 см, а расстояние между ними увеличивается от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Между горизонтами активного и пассивного криодиагенеза нет выраженной границы, они переходят друг в друга постепенно. Такой границей, однако, может служить основание горизонта, в котором температурные градиенты становятся менее 1 °С/м. Верхняя граница

¹ Попов А. И., Розенбаум Г. Э., Тумель Н. В. Криолитология.

горизонта пассивного криодиагенеза обычно располагается на глубине 5—6 м, нередко — выше, но редко на глубинах до 10—12 м.

Оценивая криогенное строение горизонтов активного и пассивного криогенеза, следует сравнить время их формирования. В зависимости от поверхностных и климатических условий зона активного криогенеза развивается от нескольких лет до десятков лет. Зона пассивного криогенеза может развиваться сотни и тысячи лет, достигая мощности в сотни метров. Общепринято делить эпигенетические мерзлые толщи на три типа: первый — с льдистым горизонтом в верхних 5—10 м, с постепенным убыванием содержания льда с глубиной; второй — льдистый горизонт прослеживается до глубины 30—40 м и исчезает ниже; третий — наблюдается чередование высокольдистых и малольдистых горизонтов (рис. 2.1).

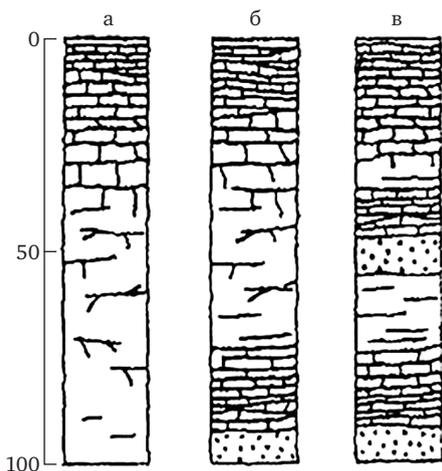


Рис. 2.1. Типы криогенного строения эпигенетически промерзших толщ тонкодисперсных бассейновых отложений¹:

а — однородного состава; *б* — содержащих в основании водоносный в прошлом слой песчаного состава; *в* — содержащий два водоносных в прошлом песчаного состава;

▒ — криогенные структуры тонкодисперсных отложений;
 ▒ — водоносные в прошлом пески

Наиболее типичное криогенное строение имеют толщи бассейновых отложений. Они могут промерзать по типу «закрытой» или «открытой» системы в зависимости от наличия или отсутствия водоносных горизонтов, обеспечивающих подток влаги при промерзании извне. Отложения грубодисперсного состава — пески, галечники — в условиях «закрытой» системы промерзают с отжатием влаги от фронта промерзания (поршневой эффект). Поэтому льдистость мерзлых толщ в целом невысокая (до 10—20 %). К такому же эф-

¹ Ершов Э. Д. Общая геокриология : учебник. М. : Изд-во МГУ, 2002.

фекту приводит промерзание толщ **грубодисперсных отложений** по типу «открытой» системы, когда имеется подток напорных или безнапорных подземных вод¹.

В типичном выражении толщи эпикриогенных тонкодисперсных отложений однородного состава, промерзавшие по типу «закрытой» системы с миграцией влаги вверх и сегрегационным льдовыделением, имеют следующее строение (см. рис. 2.1).

Наиболее льдистым является горизонт до глубины 5—10, реже 15 м от поверхности. Объемная льдистость здесь достигает 40—50 %, породы часто распучены. Криогенная текстура преимущественно тонкошлировая, часто-сетчатая и слоисто-сетчатая. С глубиной расстояние между ледяными шлирами увеличивается при одновременном увеличении их толщины. На глубине 20—30 м от поверхности общая льдистость мерзлых пород уменьшается примерно до 20—30 %, здесь развиты преимущественно крупносетчатые и блоковые криогенные текстуры. На глубинах 30—40 м распространены в основном крупно-блоковые неполнорешетчатые криотекстуры, а ниже (иногда до 100 м) встречаются лишь разрозненные ломаные шлиры, криогенная текстура преимущественно массивная. Объемная льдистость пород в рассматриваемом интервале уменьшается сверху вниз от 20 до 10 %.

Эпигенетическое промерзание рыхлых тонкодисперсных отложений по типу «открытой» системы, когда в них имеются прослойки водоносных песков и галечников, резко осложняет картину их криогенного строения. Над водоносными горизонтами формируются слои с повышенной льдистостью, отличающиеся тонкослоистой и слоисто-сетчатой криотекстурами. Нередко с избыточной влажностью связано формирование пластов и линз льда². Общепринято, что ведущим процессом, определяющим льдообразование при эпигенезе, является миграция рыхлосвязанной воды, обеспечивающая возможность роста ледяных шлиров (т. е. большинство текстурообразующих льдов можно отнести к сегрегационным). Доказательством этому является распределение льдистости в эпигенетически сформировавшихся многолетнемерзлых породах. Тем не менее в формировании криогенного строения субаквальных осадков при их эпигенетическом промерзании остается много неясного.

Такое распределение льдистости считается доказательством миграции влаги к фронту промерзания: в первом случае — при глубоко залегающих песчаных водоносных горизонтах, во втором случае водоносные горизонты залегают неглубоко, а в третьем случае наблюдается их чередование. Эта типизация эпикриогенных толщ общепринята; считается, что она отражает процессы, сопровождающие промерзание осадков после их формирования. Ведущим

¹ Ершов Э. Д. Общая геокриология.

² Ершов Э. Д. Общая геокриология.

процессом является миграция связанной воды к фронту промерзания. Особенности естественно-исторических условий образования и промерзания осадочных толщ, как правило, не рассматриваются, главным образом по причине сложности их анализа.

Для примера рассмотрим образование эпикриогенных морских толщ. Увеличение влажности в верхней части субаквальных осадков — явление повсеместное; оно связано с процессами уплотнения и диагенеза. Промерзание осадков, как правило, начинается еще в субаквальном состоянии — с момента смерзания припайного льда с донным грунтом. Таким образом, наблюдаемое в эпигенетических мерзлых толщах распределение льдистости (влажности) в большей степени фиксирует состояние осадков перед промерзанием.

Засоленность осадков, особенно при морском типе засоления, ограничивает миграцию связанной воды¹. Между тем, как показывают многочисленные исследования, в промерзающей морской толще резко увеличивается минерализация порового раствора за счет криогенной сепарации. При этом формируются серии криопэгов (незамерзших высокоминерализованных подземных вод с отрицательной температурой) на значительных глубинах (до десятков метров). Миграция связанной воды в этом случае практически подавлена. Криопэги, как правило, не приурочены к какой-либо глубине, и минерализация в них колеблется в больших диапазонах. Например, на западе полуострова Ямал у уреза воды скважиной глубиной 19 м было вскрыто пять горизонтов, насыщенных высокоминерализованными растворами и разделенных мерзлыми, сцементированными льдом отложениями. Толщина мерзлых слоев колеблется от 1 до 4 м, а мощность горизонтов с криопегами — от 0,3 до 2,5 м. Измеренные температуры грунтов колебались в диапазоне значений $-3...-6$ °С. Минерализация криопэгов составляла 50—120 г/л². Как происходит последующее удаление криопэгов после выхода осадков из под влияния моря и формирование монолитных мерзлых толщ — до сих пор не ясно.

Кроме рассмотренных факторов, на криогенное строение эпикриогенных морских толщ оказывают влияние следующие: распределение влажности осадков на момент промерзания, содержание органического материала, первичная слоистость, диагенетические процессы, жизнедеятельность микроорганизмов и др. Эти примеры свидетельствуют, что формирование таких толщ нельзя свести только к теплообменным процессам. Приходится признать, что существующая теория образования эпикриогенных пород схематична и не отражает всей совокупности природных процессов при промерзании субаквальных (по крайней мере морских) осадков.

¹ Хименков А. Н., Брушков А. В. Океанический криолитогенез. М. : Наука. 2003.

² Хименков А. Н., Шешин Ю. Б. Геокриологические условия побережья Карского моря в районе пос. Амдерма // Инженерная геология. 1992. № 2. С. 71—82.

2.2. Сингенетические мерзлые породы

Сингенетические мерзлые породы формируются в ходе накопления осадков на подстилающие мерзлые отложения, т. е. в геологическом смысле и накопление осадка, и его переход в многолетнемерзлое состояние осуществляются одновременно¹. При этом основание слоя сезонного протаивания постепенно переходит в мерзлое состояние, наращивая таким образом многолетнемерзлую толщу сверху. Поверхностный слой свежееотложенного осадка по мере его погребения новыми слоями по прошествии некоторого времени становится вечномерзлым².

Чем меньше мощность слоя сезонного протаивания при сингенезе (например, в случае аллювиального или иного осадконакопления) и чем быстрее накопление осадков, тем скорее свежееотложенный осадок перейдет в вечномерзлое состояние и тем, следовательно, меньшему числу циклов сезонного промерзания — протаивания он подвергнется³.

В общем виде процесс синкриогенеза можно представить следующим образом. В течении весенне-летнего сезона происходит накопление осадка определенной мощности. Зимой осадок и подстилающие его отложения сезонноталого слоя промерзают. При постоянной мощности сезонно-талого слоя в последующий год кровля многолетнемерзлых пород поднимется, очевидно, на величину мощности накопившегося слоя осадков (рис. 2.2). Ежегодное повторение этого процесса приводит к образованию мощных синкриогенных толщ.

Промерзание деятельного слоя происходит в сходных условиях, для пород разного генезиса, что обуславливает формирование в них близких типов криогенного строения (рис. 2.3).

Сингенетическое промерзание характерно для аллювиальных, мелководно-озерных, торфяно-болотных, прибрежных морских, соляфлюкционных и делювиальных отложений⁴. Часто встречаются малольдистые сингенетические многолетнемерзлые толщи с массивной или микросетчатой текстурой. Механизм их образования следующий. Миграция влаги к фронту промерзания оставляет основание деятельного слоя довольно обезвоженным, т. е. малольдистым, каким оно и перейдет в сезонномерзлое состояние. При накоплении осадка сверху и при одинаковой глубине деятельного слоя протаивание следующего года не достигает этого обезвоженного

¹ Harris S., Brouckov A., Cheng G. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms.

² Попов А. И., Розенбаум Г. Э., Тумель Н. В. Криолитология.

³ Попов А. И., Розенбаум Г. Э., Тумель Н. В. Криолитология.

⁴ Катасонов Е. М. Криогенные текстуры, ледяные и земляные жилы как генетические признаки многолетнемерзлых четвертичных отложений.

слоя грунта, и он перейдет в вечномерзлое состояние. Повторяясь из года в год, такое приращение кровли мерзлоты приведет к образованию сингенетической мерзлой толщи, лишенной или почти лишенной льда.

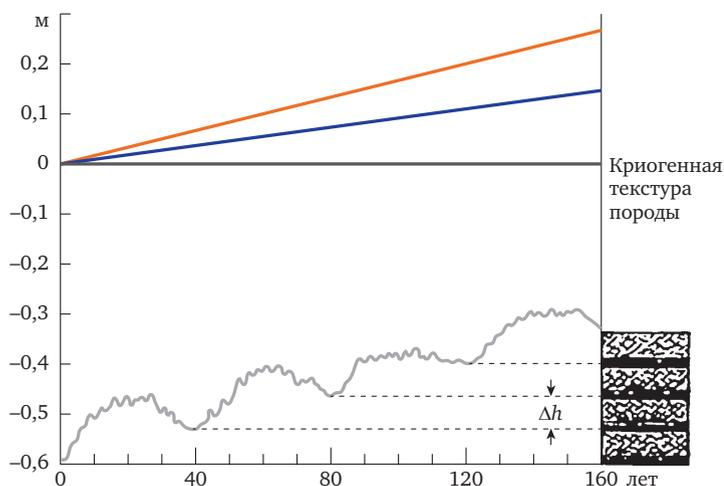


Рис. 2.2. Схема сингенетического накопления и промерзания осадков при периодических изменениях глубин сезонного оттаивания¹:

- суммарное изменение уровня земной поверхности вследствие накопления осадков и сегрегационного льдообразования;
 - изменение уровня земли за счет осадконакопления;
 - начальный уровень земной поверхности;
 - глубина сезонного оттаивания, отсчитываемая от изменяющегося уровня земной поверхности;
- Δh — мощность слоя, накапливающегося за 40 лет

Отличительным признаком криогенного строения сингенетических отложений является ритмичность². Тектурные ритмы — результат промерзания в сочетании с осадконакоплением. Ритмы отражают особенности накопления осадков и колебания климата. Обычно в основании такого горизонта (ритма) мерзлой породы залегает или выдержанный прослой сегрегационного льда, или льдистый пояс. Они образуются в результате многократного наращивания не полностью оттаявших прослоев сегрегационного льда у подошвы сезонно-талого слоя. Выше порода имеет различные льдистость и криотекстуру: сетчатую, слоисто-сетчатую, линзовидно-слоистую, линзовидную или массивную. Сформировавшись в элементарном ритме и перейдя в многолетнемерзлое состояние,

¹ Попов А. И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). М. : Изд-во МГУ, 1967, с дополнениями.

² Общее мерзлотоведение (геокриология) / под ред. В. А. Кудрявцева М. : Изд-во МГУ, 1978.

осадки в дальнейшем сохраняют в целом криогенное строение. Типичным примером сингенетического промерзания являются мощные повторно-жильные льды¹, выделяемые в так называемый ледовый комплекс, или ёдому².

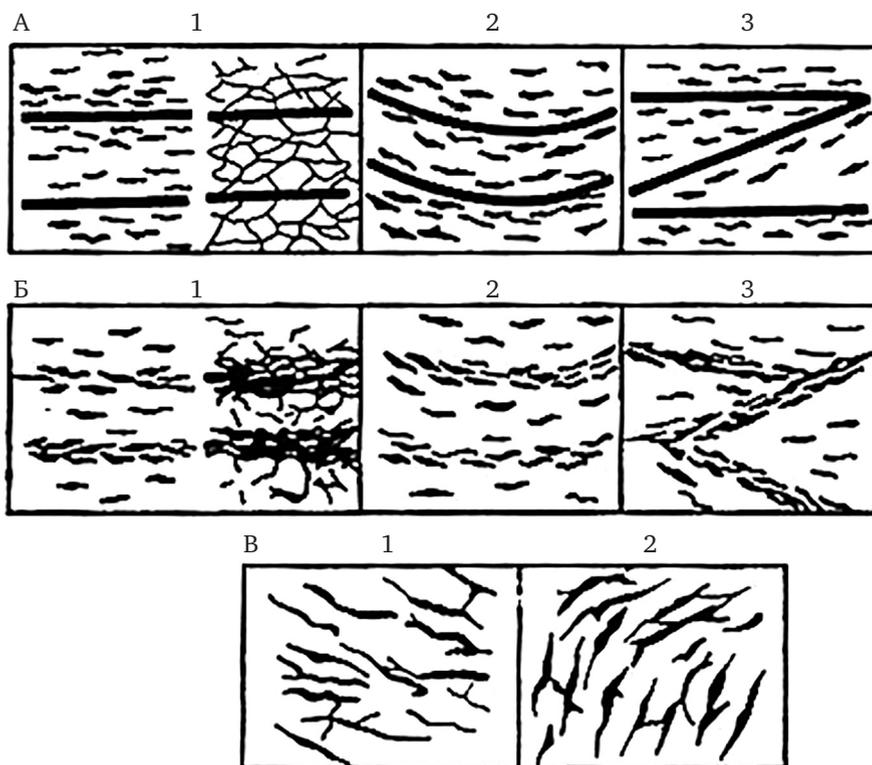


Рис. 2.3. Основные (руководящие) виды криотекстур, образующихся при сингенетическом промерзании отложений сезонноталого слоя снизу (А, Б) и водных осадков (В)³:

- А — слоистые (1 — горизонтальные, 2 — вогнутые, 3 — волнистые);
 Б — поясковые (1 — горизонтальные, 2 — вогнутые, 3 — волнистые);
 В — решетчатые и сетчатые (1 — косые, 2 — вертикальные)

Е. М. Катасоновым на примере изучения закономерностей сингенетического промерзания аллювиальных отложений был разработан метод генетического анализа многолетнемерзлых пород

¹ Shur Y. et al. Syngenetic permafrost growth: cryostratigraphic observations from the CRREL tunnel near Fairbanks, Alaska // Permafrost and Periglacial Processes. 2004. Vol. 16. P. 5—18.

² Murton J. B. et al. Palaeoenvironmental interpretation of yedoma silt (ice complex) deposition as cold-climate loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2015. Vol. 26. № 3. P. 208—288.

³ Катасонов Е. М. Криогенные текстуры, ледяные и земляные жилы как генетические признаки многолетнемерзлых четвертичных отложений // Вопросы криологии при изучении четвертичных отложений. М. : Изд-во АН СССР, 1962.

(ММП) в совокупности с их криогенным строением, определенный автором как мерзлотно-фациальный анализ¹. Сущность его состоит в том, что при изучении мерзлых осадочных толщ выделяются фации, которые характеризуются не только определенными условиями накопления осадков, но и особенностями их промерзания². Метод основывается на изучении как фациальных признаков (органо-минеральный состав, слоистость, включения), так и криогенного строения (тип текстуры, морфология ледяных включений). С его помощью можно исследовать историю развития мерзлых толщ, условия их осадконакопления и промерзания.

2.3. Криодигенетические субаквальные мерзлые осадки

В полярных морских бассейнах осадконакопление и диагенетические преобразования осадочных толщ с самого начала сопровождаются льдообразованием. Соответственно, можно говорить о формировании субаквальных криогенных систем. Кратко рассмотрим строение области субаквальной криолитозоны.

Долговременно существующий слой морской воды с отрицательными температурами — наиболее важный фактор, определяющий развитие субаквального океанического криолитогеоза как самостоятельного явления. В результате сильного зимнего охлаждения и слабого летнего прогревания морских вод развивается процесс, известный как вертикальная зимняя циркуляция³. Он присущ всем морям умеренного и полярного поясов и является довольно типичным⁴. В полярных морских бассейнах слой с отрицательными температурами формируется в течение сотен тысяч лет (а возможно, и миллионов лет). Чем меньше летний прогрев и чем сильнее зимнее охлаждение, тем на большую глубину опускается нижняя граница данного слоя. В центральной части бассейна Северного Ледовитого океана в районе 170 и 332 градусов восточной долготы (по данным станций СП-3, СП-4, СП-5) арктические воды имеют отрицательную температуру до глубин 2600 м и ниже⁵.

Средняя годовая температура верхних горизонтов донных отложений, как правило, такая же, как и придонного слоя воды, и зависит от минерализации морских вод, глубины бассейна и интен-

¹ Катасонов Е. М. Литология мерзлых четвертичных отложений (криолитология) Янской приморской низменности. М. : ПНИИИС, 2009.

² French H., Shur Y. The principles of cryostratigraphy // Earth-Sci. Revs. 2010. Vol. 101. P. 190—206.

³ Полонский А. Б. Роль океана в изменениях климата. Киев : Наукова думка, 2008.

⁴ Зубов Н. Н. Морские воды и льды. М., 1938.

⁵ Жигарев Л. А. Океанический криолитогеоз. М.: Изд-во МГУ. 1997.

сивности внутриводного перемешивания. Преимущественно она находится в диапазоне от 0 °С до –1,8 °С, за исключением отдельных участков глубиной 2—10 м или в зоне действия речного стока, где температура может быть и положительной. Для различных районов Арктики глубины морей, ниже которых температуры постоянно отрицательны, колеблются в незначительных пределах и составляют 10—15 м. Существуют они сотни, если не **миллионы** лет.

Мощность слоя осадков с отрицательной температурой составляет от нескольких десятков до нескольких сотен метров. В целом минерализация их порового раствора примерно соответствует температуре начала льдообразования, и поэтому образования льда не происходит. С момента отложения в осадках происходят процессы диагенеза. В целом диагенез осадков в водных бассейнах следует понимать как физико-химическое и физико-механическое уравнивание в субаквальной среде. При этом происходят обменные и химические реакции, минералообразование, уплотнение осадков, отжатие свободной воды, синерезис, разрывы сплошности толщи, преобразование поровых вод. Эти процессы иногда приводят к локальному распреснению поровых вод.

Поскольку среда имеет отрицательную температуру, то на участках, где температура в массиве осадков будет ниже температуры начала замерзания поровых растворов, начнется льдовыделение. В этом случае оно определяется только внутренними причинами. Рассмотренную область выделяют как зону первичного океанического криолитогенеза¹. Она характеризуется тем, что лед в толще морских осадков может образовываться и сохраняться только за счет внутреннего энергетического состояния массива осадков, поддерживаемого теплообменом с толщей отрицательно-температурных морских вод.

Геохимические процессы, а также уплотнение и дегидратация наиболее активны в верхнем 10-метровом слое осадков. К этому интервалу глубин в основном и приурочено льдообразование, связанное с диагенезом. Ниже обычно залегают осадки пластичной и полутвердой консистенции, хотя отдельные водонасыщенные горизонты встречаются и на глубинах в несколько десятков метров. В песчаных горизонтах, являющихся коллекторами грунтовых вод, в зонах распреснения возможно образование льдистых грунтовых массивов

Температурные градиенты в толще субаквальных осадков осадков незначительны, а часто и совсем отсутствуют в широком диапазоне глубин (сотни метров). В безградиентных засоленных осадочных массивах формирование льда будет происходить в виде локальных, рассеянных по толще осадков образований.

¹ Хименков А. Н. Особенности субаквального океанического криолитогенеза // Сергеевские чтения. Вып. 4. М. : ГЕОС, 2002.

Можно перечислить виды льдов, характерные для таких криогенных систем:

- 1) донные льды;
- 2) осадочные льды — ледниковые льды и морские льды, погребенные морскими осадками;
- 3) льды, образовавшиеся при распреснении засоленных морских осадков континентальными пресными водами;
- 4) льды, образовавшиеся при субаквальном промерзании пресноводных осадков, перекрытых отрицательнотемпературными морскими водами;
- 5) льды, сформировавшиеся в зонах подводного истечения газов за счет охлаждающего дроссельного эффекта.

Следует подчеркнуть, что, несмотря на отрицательную температуру и присутствие льда, сформировавшиеся в процессе первичного океанического криолитогенеза ледяные включения не цементируют осадочную толщу и не прекращают процессы диагенеза. В морских субаквальных осадках происходит активная жизнедеятельность, развиваются разнообразные биоценозы, происходит интенсивное газовыделение.

Рассмотренные процессы, определяющие льдообразование, не связаны с фактором промерзания, определяемым внешним источником охлаждения, т. е. теплообменом с атмосферой.

В литературе для различного соотношения процессов образования осадков и их промерзания используются понятия «эпигенез» и «сингенез» мерзлых пород. Эти основополагающие для геокриологии понятия положены в основу представлений об закономерностях формирования мерзлых пород. Глубоководные осадки арктических морей не могут быть отнесены к выделяемым в настоящее время типам криогенных толщ. Эта проблема возникла не в последние годы. Еще в 1988 г. В. Т. Трофимов и Ю. К. Васильчук отмечали трудности, возникающие при криогенетической индикации мерзлых толщ в случае сведения их к двум общепринятым типам. Несоответствие понятийного аппарата процессам в природных системах особенно заметно на примере субаквальной криолитозоны.

Эпигенетические мерзлые породы формируются в случае временного разрыва (пусть даже незначительного) между накоплением осадочной толщи и ее промерзанием. При этом источник охлаждения является внешним по отношению к промерзающему массиву отложений. Данный тип криогенеза в значительной мере изменяет совокупность процессов, присущих осадочной толще, ее строение, физические и механические свойства. Такие разновидности эпигенеза, как диакриогенные (по В. Н. Усову¹) и парасинкриогенные (по Е. М. Ката-

¹ Усов В. А. Формирование ваттовых отложений в условиях вечной мерзлоты // Материалы VIII Всесоюзного межведомственного совещания по геокриологии (мерзлотоведению). Якутск, 1966. Вып. 2. С. 123—132.

сонову), лишь отражают различные пространственные и временные соотношения осадконакопления и промерзания. По сути, они являются теми же эпигенетическими мерзлыми толщами.

Сингенетические мерзлые породы формируются в условиях, когда мерзлые толщи уже сформированы. Лед с самого начала цементирует массив осадков и сохраняет его в первичном виде на все время их существования. Причиной охлаждения при сингенезе также является тепловой баланс на поверхности Земли.

Субаквальные криогенные породы — это особые криогенные отложения. На наш взгляд, их следует выделить в отдельный тип криогенных толщ — криодиагенетический. Криодиагенетические мерзлые толщи представляют собой неконсолидированные, отрицательнотемпературные и содержащие лед осадки, в которых протекают диагенетические процессы и наблюдается активная жизнедеятельность, присущая данным осадкам биоценозов.

Переход криодиагенетических мерзлых пород к традиционным эпигенетическим или сингенетическим возможен только при дополнительном охлаждении. Такое охлаждение происходит при смерзании припайных льдов с морским дном и последующем промерзании осадков, уже содержащих ледяные образования. При этом льды, соответствующие криодиагенетической стадии, включаются в криогенное строение соответствующих мерзлых толщ (эпигенетических или сингенетических), что значительно затрудняет их идентификацию.

2.4. Погребенные мерзлые породы

Данный тип мерзлых пород формируется в ходе осадконакопления в условиях консервации ледяных образований, первоначально сформировавшихся на поверхности Земли. Текстура и структура погребенных льдов соответствуют аналогичным показателям первично-поверхностных льдов — глетчерных, фирновых, снежных, речных, озерных, морских. Перекрывающие осадки формируются в ходе гляциальной, флювиогляциальной, аллювиальной, озерной, морской аккумуляции. Даже в современных межледниковых условиях в приполярных районах наблюдается погребение снежников, речных и морских льдов. Из всех поверхностных льдов наиболее благоприятные возможности для погребения имеют ледниковые. Принципиальная схема погребения ледниковых льдов приведена на рис. 2.4.

Считается, что строение погребенных льдов лишь частично трансформируется при консервации сохраняя свое первичное строение¹.

¹ Катасонов Е. М. Льды в морских отложениях // Природа. 1967. № 6. С. 107—110; Некрасов И. А., Гравис Г. Ф. Погребенные ледники хребта Удокана // Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья. М. : Наука, 1967. С. 182—192; Белова Н. Г. Погребенные и внутригрунтовые пластовые льды на западном побережье Байдарацкой губы Карского моря // Лед и снег. 2015. Т. 55 (2). С. 93—102.

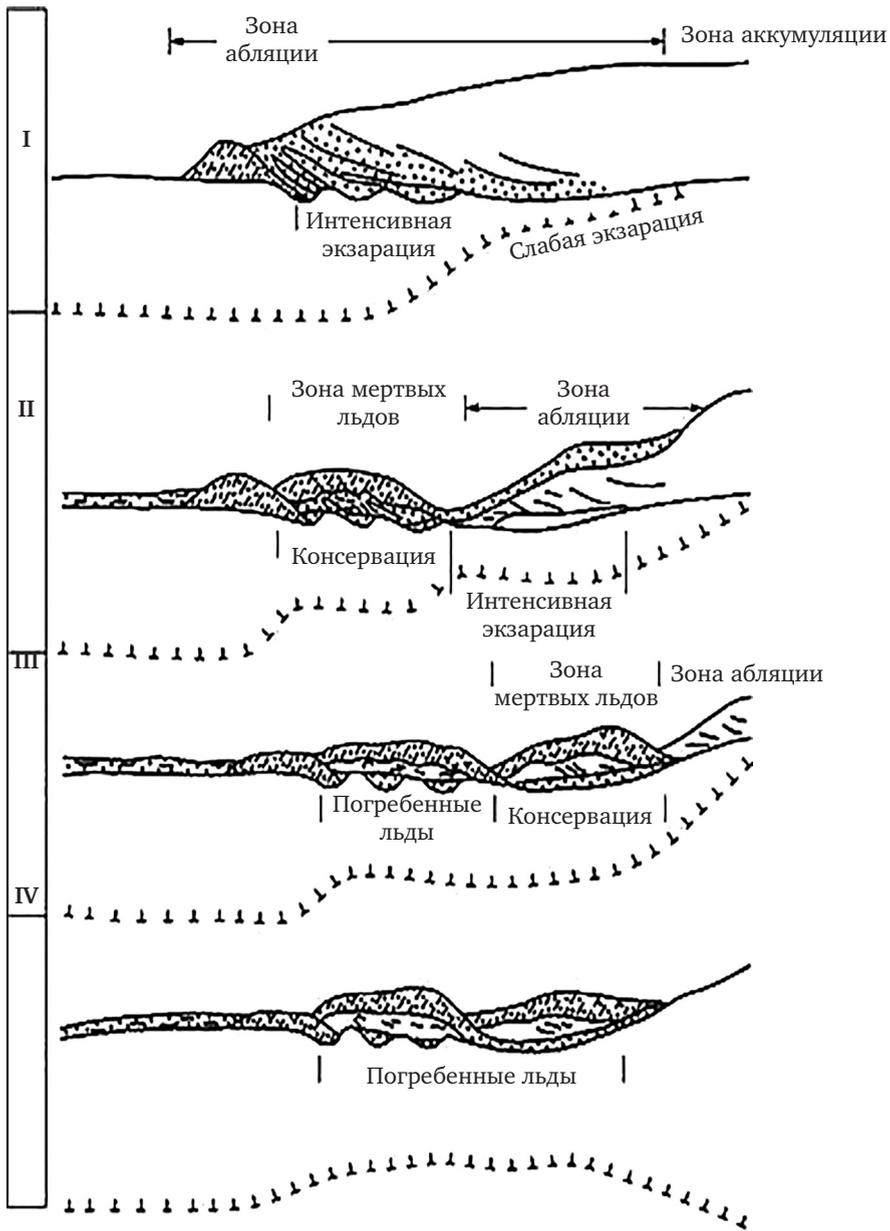


Рис. 2.4. Принципиальная схема погребения и консервации глетчерных льдов¹:

I—IV — этапы дегляциации;

▨ — конечные и абляционные морены; ▩ — мореносодержащий лед;

▧ — деформации по льду; ▤ — флювиогляциальные образования;

▥ — донная морена; ▦ — подошва многолетнемерзлой толщи

¹ Соломатин В. И. Физика и география подземного оледенения. Новосибирск : Гео, 2013.

2.5. Сезонно-мерзлые породы

Сезонные колебания в поступлении и расходе тепла, вызывает ежегодное сезонное промерзание и **протаивание приповерхностного** слоя литосферы. В литературе он выделяется как деятельный слой¹. Отдельные элементы деятельного слоя: сезонно-талый слой (СТС) и сезонно-мерзлый слой (СМС)², рассматриваются как самостоятельные объекты изучения.

В рамках тематики настоящего курса, рассмотрения вопросов криогенеза, нас **интересует особенности** формирования сезонно-мерзлого слоя. Он представляет собой сезонную криогенную систему, имеющую широкое распространение и оказывающую огромное влияние на природу Земли. Промерзание грунтов наблюдается почти на половине (48 %) суши Северного полушария³, оно характерно для всей территории России и значительной части Соединенных Штатов (рис. 2.5).

Мощность СМС зависит от комплекса физико-географических и геологических факторов и меняется от нескольких сантиметров до 3—5 м (исключительно редко — до 8—10 м). Даже в пределах одного и того же ландшафта глубина сезонного промерзания и протаивания не бывает одинаковой от года к году. Но в целом, при неизменности климатических и других физико-географических условий, она колеблется около некоторой средней величины. При этом максимальная глубина протаивания СТС за несколько лет имеет важное значение; горизонт между средней глубиной протаивания и максимальной глубиной протаивания носит название промежуточного, защитного или переходного слоя. Этот относительно малольдистый (лишь в сравнении с подстилающими многолетнемерзлыми породами) слой, например, в условиях Центральной Якутии предохраняет высокльдистые отложения «ледяного комплекса» от протаивания и развития термокарста.

Изменение глубины промерзания и протаивания зависит от степени континентальности климата, продолжительности зимнего охлаждения, средней годовой температуры воздуха, средней температуры самого холодного месяца, амплитуды температур на поверхности, суммы отрицательных температур, от плотности и мощности снежного покрова, состава пород, их влажности, растительного покрова.

Темпы сезонного промерзания различны для разных территорий. На севере она достигает 1—5 см в сутки. Промерзание заканчива-

¹ Сумгин М. Н. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. М. ; Л. : Изд-во АН СССР. 1937.

² ГОСТ 26262—2014. Грунты. Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания.

³ Уошборн А. Л. Мир холода. Геокриологические исследования : пер. с англ. М. : Прогресс. 1988.

ется уже в ноябре — декабре. Криогенное строение СМС во многом определяется градиентами температур при промерзании. Типичным диапазоном изменения температурного градиента при образовании мелких сетчатых и слоистых текстур является интервал от 0,5—1 до 10—20 °С/м¹.

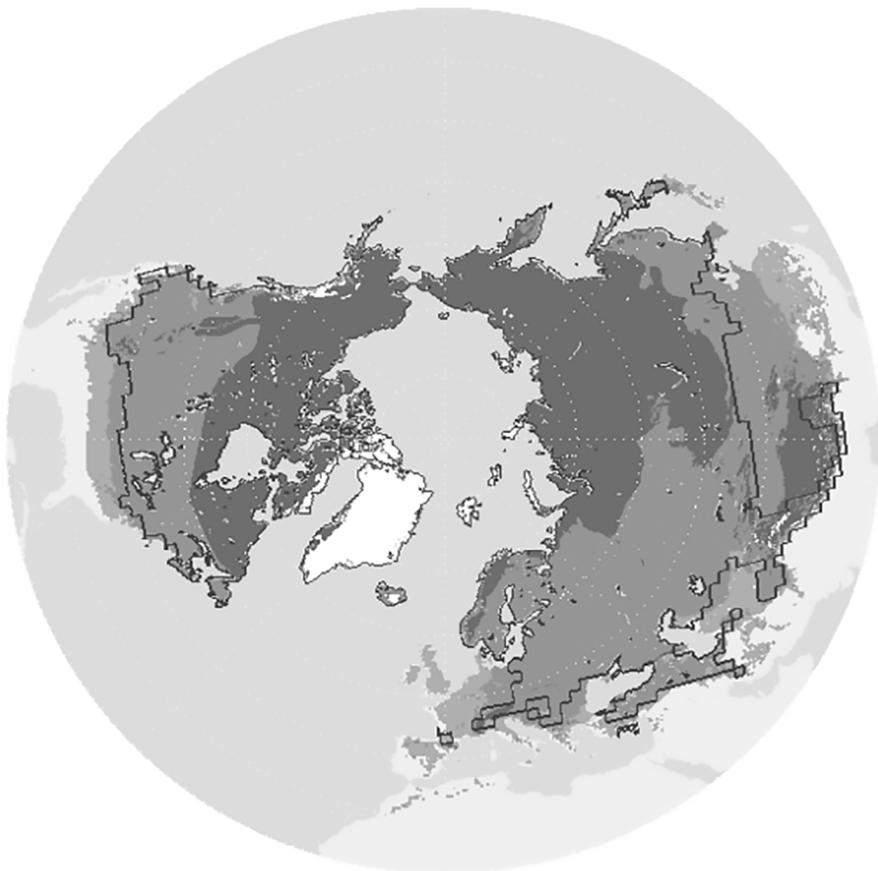


Рис. 2.5. Распределение различных типов мерзлых пород в Северном полушарии²;

■ — многолетнемерзлые породы; ■ — сезонномерзлые породы;
■ — эпизодически мерзлые породы

Следует обратить внимание на явление промерзания СТС снизу, которое заключается в том, что осенью, по мере ослабления прогревания пород сверху и при начале промерзания с поверхности, основание деятельного слоя отдает тепло не только вверх, но и вниз,

¹ Попов А. И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология).

² Zhang T. Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere // Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost (21—25 July, 2003, Zurich, Switzerland) / ed. by M. Phillips, S. M. Springman, L. U. Arenson. 2003. Vol. 2. P. 1289—1294.

в подстилающую толщу мерзлоты. В результате при достаточно низких температурах мерзлых горных пород промерзание захватывает нижнюю часть СТС до того, как сюда проникает промерзание сверху. Таким образом, происходит промерзание СТС одновременно сверху и снизу. При достаточном увлажнении тонкодисперсных грунтов при этом происходит миграция воды как к верхнему, так и к нижнему фронту промерзания. Вследствие этого средняя часть СТС, ограниченная сверху и снизу более льдонасыщенными грунтами, остается относительно обезвоженной.

Криогенное строение СМС отличается большим разнообразием. В местах повышенного обводнения (выходы грунтовых вод, надмерзлотные водоносные горизонты) формируются пластовые ледяные тела, ледяные ядра (высотой до 3 м), сезонные бугры пучения.

При меньшей влажности криогенное строение СМС определяется прежде всего литологическим составом. Пески, щебнистые, гравелистые породы обладают массивным криогенным строением, при котором лед равномерно распределен между минеральными частицами. Глины, суглинки, супеси характеризуются разновидностями слоистых и сетчатых криогенных текстур. В зависимости от градиентов температуры, состава, влажности и других факторов в тонкодисперсных грунтах СМС формируется четыре типа сезонных криогенных систем в зависимости от распределения льда¹:

1) льдистость повышена в верхней и нижней части СМС, середина слоя относительно осушена, малольдиста;

2) льдистость повышена только в верхней части СМС; вся остальная нижняя часть слоя осушена и малольдиста;

3) льдистость заметно выражена и достаточно велика в пределах всего СМС;

4) льдистость мала в пределах всего СМС.

Переходный слой между СТС и ММП большую часть времени находится в мерзлом состоянии, но при определенном сочетании климатических параметров оттаивает. По мнению Ю. Л. Шура, основная функция переходного слоя — защита нижележащих ММП от протаивания в наиболее теплые летние сезоны. Эпигенетические, сингенетические, криодигенетические, погребенные и сезонномерзлые типы пород формируются за счет глобальных теплообменных процессов между литосферой, атмосферой и гидросферой. В верхней части литосферы формируется сплошная зона интенсивных тепловых потоков залегающая параллельно дневной поверхности. В областях отрицательных теплооборотов получают развитие мерзлые породы. Криогенез накладывается на существующую литогенную основу, и формирует покров сезонно- или многолетнемерзлых пород, распространенный на всей территории криолитозоны (рис. 2.6).

¹ Попов А. И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология).

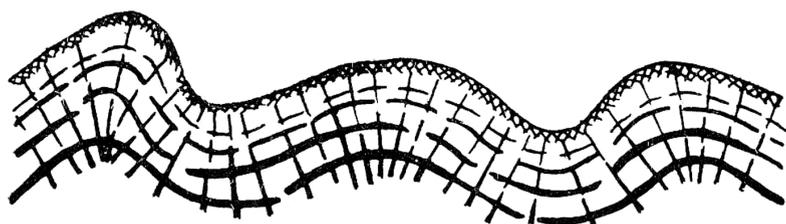


Рис. 2.6. Наложенные криогенные текстуры, формирующиеся при неровной границе промерзания пород¹:

▬ — поверхность пород; ▬ — ледяные шлиры

2.6. Засоленные мерзлые породы как особый тип криогенных систем криолитозоны

Засоленные мерзлые четвертичные породы широко распространены в криолитозоне, в частности вдоль Арктического побережья². Большую роль в формировании засоленных мерзлых пород играют морские трансгрессии. Поэтому границы их распространения, особенно границы последних трансгрессий, важны для определения границ распространения засоленных мерзлых пород морского сингенетического и эпигенетического типа. Одной из наиболее крупных из последних трансгрессий была казанцевская (бореальная). Ее продолжительность определяется в 70—80 тыс. лет, а время окончания — 70 тыс. лет назад. Затопление простиралось до 65—66° с. ш. (рис. 2.7). Только на севере Западной Сибири засоленные ММП занимают площадь около одного миллиона квадратных километров. Распространенные с поверхности, они охватывает криогенную толщу на всю ее мощность до 300 м и более, имеют различное происхождение, с преобладанием морских и прибрежно-морских условий образования.

Преимущественный путь образования засоленных многолетне-мерзлых пород Арктического побережья связан с син- и эпигенетическим промерзанием морских, прибрежно-морских и других слаболитифицированных отложений, насыщенных первичными или метаморфизованными морскими водами. Поровый раствор мерзлых пород морского происхождения часто оказывается близким к составу морских вод, и такие засоленные мерзлые породы занимают огромные пространства на Арктическом побережье Евразии и Америки. Этот тип засоленных мерзлых пород можно назвать, по предложению Г. И. Дубикова, морским.

¹ Ершов Э. Д. Общая геокриология.

² Брушков А. В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М. : Изд-во МГУ, 1998; Kokelj S. V., Burn, C. R. Ground ice and soluble cations in near-surface permafrost, Inuvik, Northwest Territories, Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2003. Vol. 14. P. 275—289.

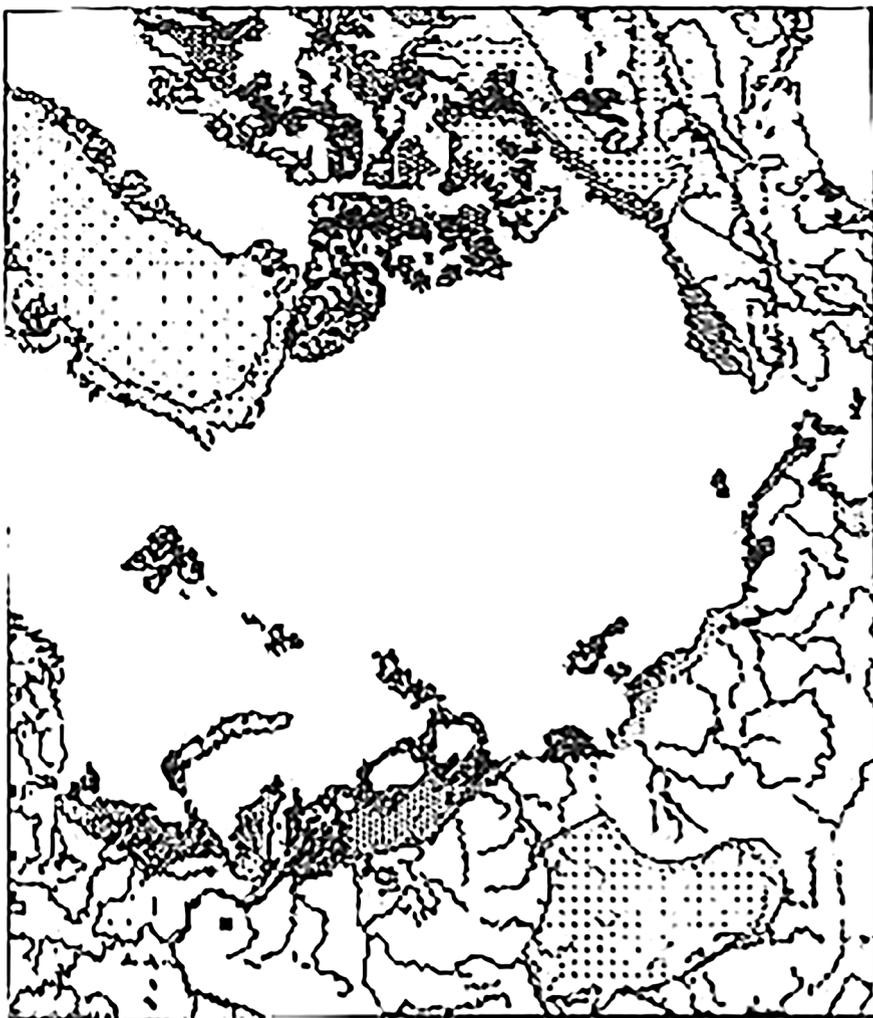


Рис. 2.7. Схема распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов Северного полушария по типам засоления:

- — морской синхронный; ▨ — морской эпихронный;
- ▩ — смешанный; ▤ — континентальный; ● — современные ледники;
- — незасоленные грунты; - - - — границы различных типов засоления

Засоленные мерзлые дисперсные породы представляют собой пример одной из наиболее сложных криогенных систем криолитозоны как по составу компонентов, так и по своим свойствам. Они занимают по многим своим свойствам положение между мерзлыми и немерзлыми породами, имеют также особые инженерно-геологические свойства, отличаются низкой несущей способностью и неустойчивостью к техногенным воздействиям. Рассмотрим некоторые свойства данных грунтов, позволяющие выделять их в особую груп-

пу (наблюдения были проведены для грунтов различных регионов Арктики).

Определяющее влияние на механические свойства грунтов оказывает незамерзшая вода. Засоленные грунты отличаются повышенным ее содержанием. Между содержанием незамерзшей воды в грунтах, их засоленностью и температурой имеется определенная связь.

Установлено что даже при небольшом засолении $D_{sal} = 0,15\%$ в диапазоне температур $\theta = -2,8 \dots -6,5$ °C содержание жидкой фазы в грунте (суглинок) на 2,5—3,8 % больше, чем при отсутствии солей. Если $D_{sal} = 1,0\%$, то эта разница достигает 22,3 %. При $\theta = -2,8$ °C и $D_{sal} = 0,5\%$ содержание жидкой фазы на 8,2 % больше, чем в таком же незасоленном суглинке. Если температуру суглинистого грунта повысить от $-6,5$ до $-2,8$ °C при $D_{sal} = 0,15\%$, то это приведет к увеличению содержания незамерзшей воды на 4,5 %, при $D_{sal} = 0,5\%$ — на 5,9 %, при $D_{sal} = 1,0\%$ — на 14,5 %. Такое же изменение температуры в незасоленных грунтах приведет к увеличению содержания незамерзшей воды на 3,9 %¹.

Механические характеристики мерзлого грунта в значительной мере зависят от его засоленности. Величина эквивалентного сцепления суглинка C_{eq} резко уменьшается при засоленности 0,2—0,3 %. При температурах $-3 \dots -4$ °C величина эквивалентного сцепления при указанной засоленности и при влажности выше предела текучести уменьшается в 2 раза, а при $\theta = -1 \dots -2$ °C величина эквивалентного сцепления уменьшается в 3—4 раза. Расчетное давление R на пылеватые и мелкие пески при засоленности $0,03\% < D_{sal} < 0,1\%$ в диапазоне температур -1 °C $> \theta > -8$ °C уменьшается примерно в 2 раза. При засоленности $D_{sal} > 0,5\%$ и температурах грунта $\theta > -8$ °C мелкий песок практически находится в охлажденном состоянии и свойства его близки к свойствам талого песка². Засоленность влияет на изменение сопротивлений срезу R_{af} по поверхности смерзания мерзлых грунтов с фундаментом. Величины сопротивления срезу грунтов в интервале температур от -1 до -5 °C при засоленности 0,5 % снижаются в 2—2,5 раза по сравнению с незасоленными грунтами. При увеличении засоленности от 0,2 до 0,5 % и температуре -3 °C длительная прочность срезу R_{af} уменьшается от 212 до 110 кПа (суглинок). При той же температуре и увеличении засоленности от 0,1 до 0,2 % близкие значения имеет мерзлый песок, R_{af} уменьшается от 198 до 111 кПа. Все это позволяет объединить засоленные мерзлые грунты в особый тип криогенных систем криолитозоны — засоленные криогенные грунты (ЗКГ).

По условиям промерзания, т. е. по соотношению времени засоления и времени промерзания отложений, можно выделить следующие

¹ Велли Ю. Я. Устойчивость зданий и сооружений в Арктике. Л. : Стройиздат, 1973.

² Велли Ю. Я. Исследования засоленных вечномерзлых грунтов Арктического побережья // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М. : Наука, 1990.

щие типы засоления. Если промерзание отложений происходит одновременно с их образованием, такой тип засоления можно назвать *синкриогенным*. Если это происходит на стадии диагенетических преобразований, выделяется *диакриогенный* тип засоления. При промерзании отложений после их образования или после их оттаивания образуется *эпикриогенный* тип засоления мерзлых пород. При сочетании в разрезе различных типов засоления по соотношению промерзания с образованием породы выделяется *поликриогенный* тип засоленных мерзлых пород. Сочетание выделенных выше типов засоления мерзлых пород представлено на рис. 2.8.

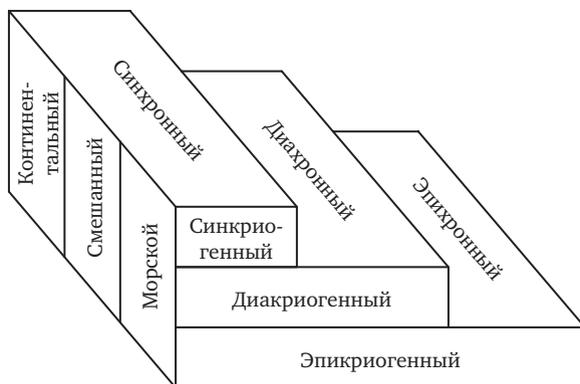


Рис. 2.8. Классификация мерзлых засоленных пород по типам засоления¹

Изменение засоленности мерзлых грунтов по глубине и простиранию Арктического побережья связано с их составом и строением и определяется как условиями формирования засоления, так и последующими процессами в мерзлых толщах.

Выделяются различные типы разрезов засоленных мерзлых пород. Для для верхних 10—20 м горизонтов песчаных прибрежно-морских осадков характерно равномерное распределение засоленности и ее увеличение с глубиной, при этом часто встречаются засоленные охлажденные породы (породы с отрицательной температурой без льда) и криопэги (отрицательно температурные водоносные горизонты). Для глинистых засоленных мерзлых пород характерны два типа разрезов, одни с относительно однородным распределением солей, в других наблюдается увеличением засоленности по глубине до 10—15 м. Неравномерное распределение засоленности по глубине может быть седиментационным и обусловлено различием условий осадконакопления, например, опреснением среды осадконакопления, а может определяться криогенным фактором (льдообразование приводит к отжатию и концентрации солей).

¹ Брушков А. В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства.

Засоление мерзлых пород, хотя и определяется условиями формирования и промерзания грунтов, не является в полной мере постоянной характеристикой мерзлой толщи. Под воздействием температурных градиентов происходит миграции солей уже в мерзлых породах. При этом изменяется главным образом величина засоленности при сохранении в целом качественного химического состава солей. Распределение засоленности по простиранию подчиняется определенным закономерностям. Увеличение засоленности наблюдается по мере удаления от русел рек и вверх по течению. Так, в направлении от устья вверх по течению, степень засоления аллювия снижается, а тип засоления изменяется с хлоридного на хлоридно-сульфатный и гидрокарбонатный. Существует определенное соотношение засоленности и льдистости в засоленных мерзлых породах. В многолетнемерзлых морских толщах засоленность, как правило, увеличивается с повышением суммарного влагосодержания, что обусловлено седиментацией в соленых морских и прибрежных водах, а по разрезу, наоборот, засоленность, как правило, снижается с увеличением льдистости в различных литогенетических типах грунтов, что, по-видимому, связано как с условиями формирования льдистых горизонтов и вытеснением солей, так и последующим распреснением подземных текстурообразующих льдов.

2.7. Локальные криогенные системы

Наряду с рассмотренными типами мерзлых пород в криолитозоне встречаются мерзлотные образования, формирование которых связано с локальными термодинамическими или флюидодинамическими процессами в промерзающих, мерзлых или оттаивающих породах всех генетических типов.

2.7.1. Многолетние и сезонные бугры пучения

Формирование сезонных и многолетних бугров пучения обусловлено совместным действием локального промерзания пород и горизонтальным перераспределением воды в зону промерзания под воздействием криогенного напора (рис. 2.9 — 2.12). В результате в промерзающей породе возникает локальное повышение давления со следующим выпучиванием грунта¹. К типичным парагенезам сезонных и многолетних бугров пучения относятся:

- ледяное ядро, сформированное при миграции связанной воды или серии инъекций свободной воды;
- деформированные слои вмещающих мерзлых пород и соответствующие им ледяные образования со следами пластических и разрывных деформаций;

¹ Harris S., Brouckov A., Cheng G. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms.

- повторно-жильные льды, проникающие в породы, слагающие бугор;
- зоны деформаций вблизи жилы, трещины растяжения в кровле бугра, заполненные льдом.

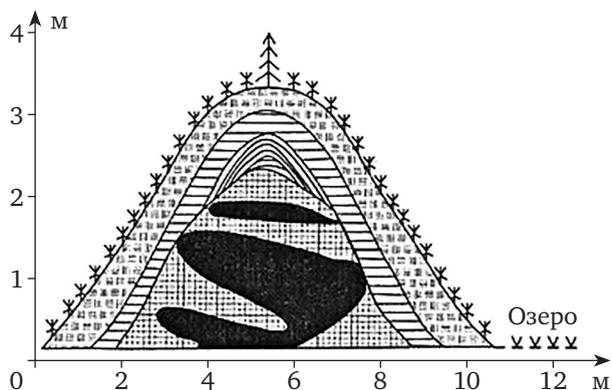


Рис. 2.9. Миграционный бугор пучения на пойме озера Куба-Тюёстээх в Центральной Якутии¹:

- ▨ — торф слабо разложившийся, льдистый;
- ▧ — торф хорошо разложившийся, льдистый;
- ▩ — изгиб торфяных слоев в апикальной части бугра;
- ▣ — лед, включающий до 5 % торфа; ■ — чистый лед;
- ☒ — кустарничковая растительность



Рис. 2.10. Инъекционно-сегрегационные бугры пучения на Амуре, в днище пади у с. Кузнецово²:

- ☒ — дернина в слое торфа; ☒ — подошва слоя сезонного оттаивания;
- ▨ — суглинок; ▧ — супесчано-суглинистый слой; ▣ — торф;
- ▣ — пустоты по напластованию в суглинках с кристаллами льда;
- ▣ — пустоты неправильной формы; во льду пустоты — каналы правильной формы

¹ Васильчук Ю. К. и др. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М. : Изд-во МГУ, 2008.

² Васильчук Ю. К. и др. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов.

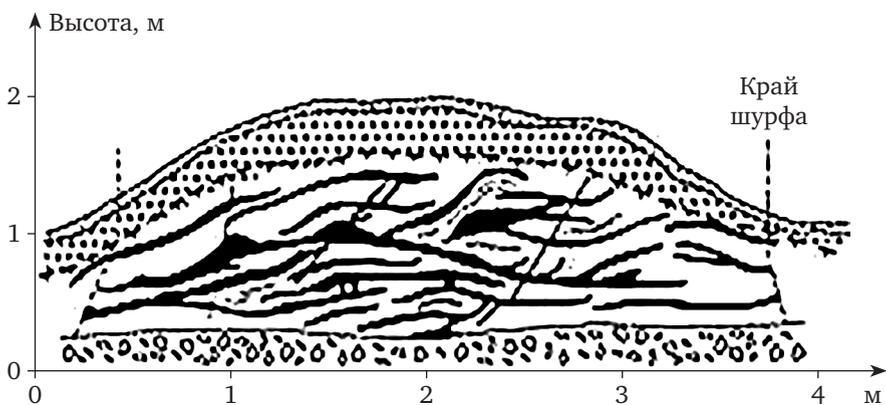
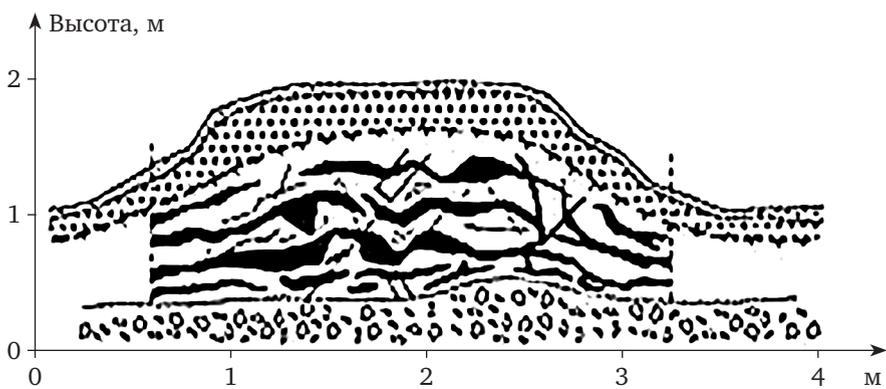
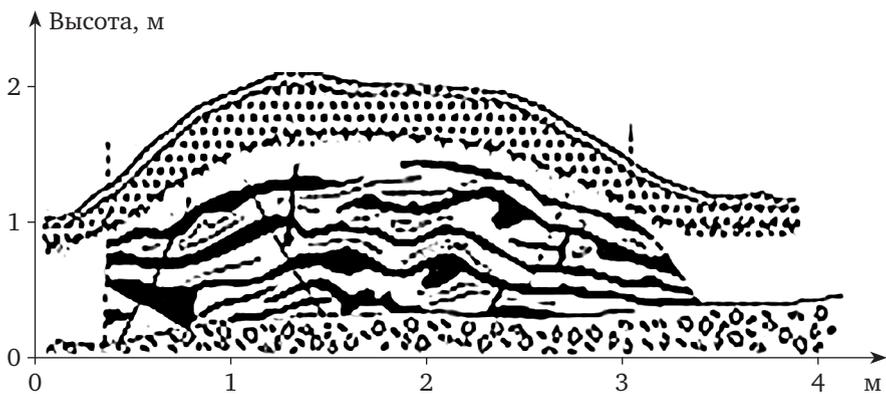


Рис. 2.11. Строение бугров пучения на болоте к югу от мыса Капп Линне (архипелаг Шпицберген)¹:

▨ — пляжные гравийные отложения; ▩ — торф; ▧ — линзы льда;

НЕТ ОБЪЯСНЕНИЯ ПУНКТА 4!!!;

▤ — верхняя граница многолетнемерзлых пород

¹ Васильчук Ю. К. и др. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов.

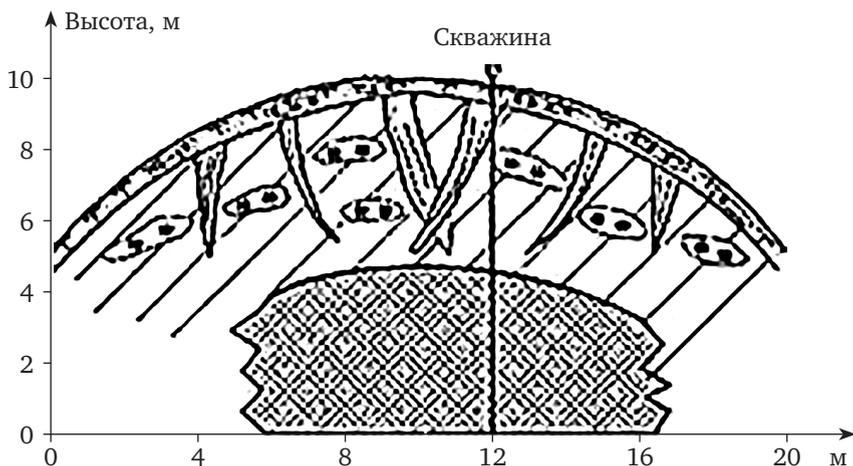


Рис. 2.12. Разрез предположительно сегрегационного бугра пучения в верховьях реки Сабь-Яха, центральный Ямал¹:

-  — песок мелкозернистый с линзами аллохтонного торфа;
-  — суглинки и глины;  — оторфованный суглинок;
-  — линзы и прослой торфа;  — пластовый лед;
-  — повторно-жильный лед;
-  — граница многолетнемерзлых пород;  — скважина

2.7.2. Гидролакколиты (булгуняхи, пинго)

Гидролакколиты приурочены чаще всего к озерным котловинам, со спущенными или **оторфованными** озерами². Типичный разрез гидролакколита имеет следующее строение (рис. 2.13): снаружи торфяной пласт до 1 м мощностью, на глубине 25—40 см он уже скован вечной мерзлотой, под ним залегает минеральный грунт, как правило, состоящий из слоистых озерных отложений (обычно серая супесь). Мощность этого пласта сильно колеблется (от одного до нескольких метров).

Подстиляется минеральный грунт льдом, образующим своей поверхностью куполовидный свод, форма которого определяет форму булгуняха. Мощность льда измеряется несколькими метрами (рис. 2.14). В закрытых системах возникают инъекционные бугры пучения (гидролакколиты, булгуняхи, пинго) с напорными подземными водами в основании бугра. Скорость роста изменяется от нескольких миллиметров в год до 0,5 м/год. Апикальные части ледяных лакколитов бывают обогащены крупными воздушными включениями за счет выделения воздуха при льдообразовании, в результате чего здесь образуются обширные воздушные полости. Раз-

¹ Васильчук Ю. К. и др. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М. : Изд-во МГУ, 2008.

² Harris S., Brouckov A., Cheng G. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms.

меры гидролакколитов изменяются в больших пределах: диаметр основания — от 20 до 250 м, а высота — от 2 до 70 м. Кровля гидролакколитов 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). Значительно реже гидролакколиты наблюдаются вне озерных котловин, среди низинных болот с массой мелких озерков на плоских водоразделах. Растущие гидролакколиты подстилаются тальми водоносными горизонтами или водяными линзами мощностью до 2 м, обладающими гидравлическим напором до 2,5 атмосфер (см. рис. 2.14).

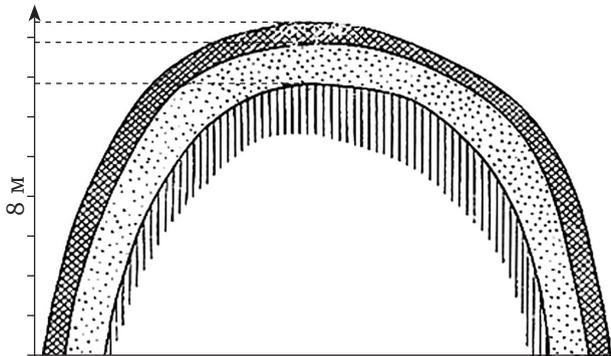


Рис. 2.13. Строение гидролакколита в тундрах Западной Сибири¹;

■ — супесь; ■ — торф; ▨ — лед; □ — вода

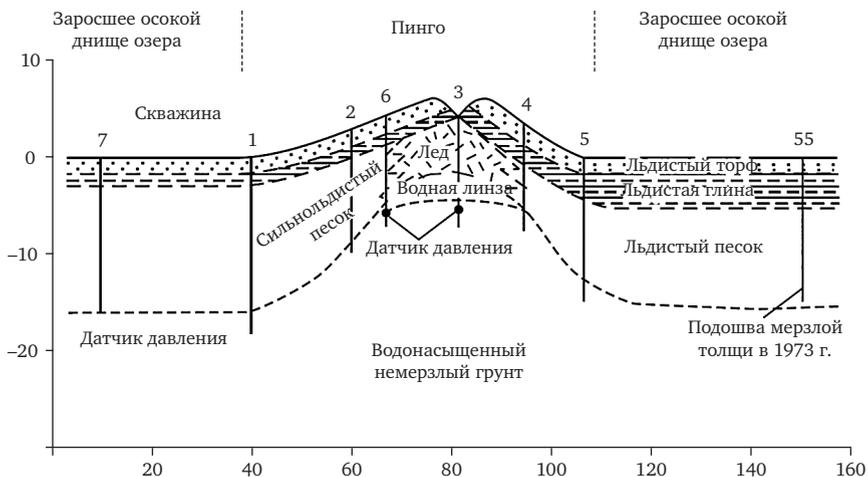


Рис. 2.14. Схема строения растущего пинго на севере Аляски²

¹ Андреев В. И. Гидролакколиты (булгуньяхи) в Западно-Сибирских тундрах // Известия Государственного географического общества. 1936. Т. 68. Вып. 2.

² Mackay J. R. Pingos of the tuktoyaktuk peninsula area, Northwest territories // Geogr. Phis. Quart. 1979.

2.7.3. Повторно-жильные (полигонально-жильные) льды

В зимний период времени в толще мерзлых пород в результате температурных напряжений возникают трещины. Трещины формируются на поверхности и проникают в глубь грунтового массива. Вода, проникающая в теплое время года в трещину, замерзает в ней и образует вертикальную жилу льда, которая позднее либо полностью вытаивает (если трещина не проникает ниже летнего оттаивания), либо сохраняется нижней частью в многолетнемерзлой породе. С наступлением зимы температурные напряжения приводят к растрескиванию на прежнем месте, в том числе из-за того, что сопротивление льда на разрыв ниже по сравнению с ненарушенным массивом породы. Многократное повторение процесса морозобойного трещинообразования приводит к образованию особых форм полигонального рельефа (рис. 2.15).



Рис. 2.15. Полигонально-жильные структуры на севере Якутии (фото М. Фукуда)

Исследованию полигональных форм рельефа и истории их развития посвящены работы В. А. Обручева, А. И. Гусева, П. Ф. Швецова, А. Л. Уошборна, П. А. Шумского, С. П. Качурина, А. И. Попова, Б. И. Втюрина, А. А. Величко, Н. Н. Романовского и других авторов. Из работ последних лет можно отметить работы С. Харриса, А. В. Брушкова, Г. Ченга и Х. Френча¹.

¹ Harris S., Brouchkov A., Cheng G. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms; French H. Permafrost environment. John Wiley & Sons, 2018.

Температурные напряжения, необходимые для образований системы трещин, пропорциональны скорости изменения температуры и градиента температуры по глубине, расстоянию от свободной вертикальной поверхности (обрыва, другой трещины), модулю упругости и коэффициенту температурного расширения (сжатия) грунтов. Амплитуда колебаний температуры на поверхности пород оказывает большее влияние на размеры трещинных полигонов в плане, а среднегодовая температура пород — на глубину проникновения трещин в мерзлую породу. Чем больше амплитуда колебаний температуры, тем меньше расстояние между трещинами.

Для районов с континентальным климатом характерны размеры сторон полигонов от 0,5—2 до 10—12 м; для менее континентальных условий — 20—40 м, а иногда 50—80 м. При этом в однородных породах образуются гексагональные и ортогональные системы трещин, в неоднородных — ортогональные. Трещины глубоко проникают в мерзлые породы, их глубина может достигать 3—4 м и более. Ширина трещин на поверхности обычно не превышает 5—10 см.

Отдельная ледяная жила в общем виде представляет из себя криогенную систему, включающую саму жилу, состоящую из множества элементарных деформированных жилок, режеляционной каймы по краям вертикальных стенок, линзы прозрачного льда, перекрывающего жилу. Непосредственно к стенкам жилы примыкает зона деформированных смещающих отложений со следами разрывных (рис. 2.16) и пластических (рис. 2.17, см. также рис. 2.15) деформаций.

Перечисленный набор парагенезов в зависимости от состава вмещающих отложений, их температуры, льдистости может меняться. Некоторые элементы могут быть слабо выражены или совсем отсутствовать. Ведущим процессом формирования парагенезов полигонально-жилых льдов (ПЖЛ) является ежегодное морозобойное растрескивание, поступление воды в трещину и ее замерзание. Нарастающее внутреннее давление приводит к перекристаллизации льда и динамометаморфизму, в некоторых случаях связанного с выжиманием конжеляционного льда, заполнявшего морозобойные трещины. При этом формируются полосы режеляционного льда (см. рис. 2.15). В других случаях выдавливается примыкающая к жиле мерзлая порода, которая при этом сминается в складки (см. рис. 2.17), а иногда разбивается трещинами на ряд блоков, испытывающих взаимное перемещение (см. рис. 2.16). В некоторых случаях к верхней поверхности ледяной жилы и сезонно-талого слоя мигрирует вода и формирует слой сегрегационного льда (см. рис. 2.16, линза прозрачного льда). В летний период на поверхности жилы может образоваться переувлажненный слой, промерзание которого образует слой сегрегационного льда.

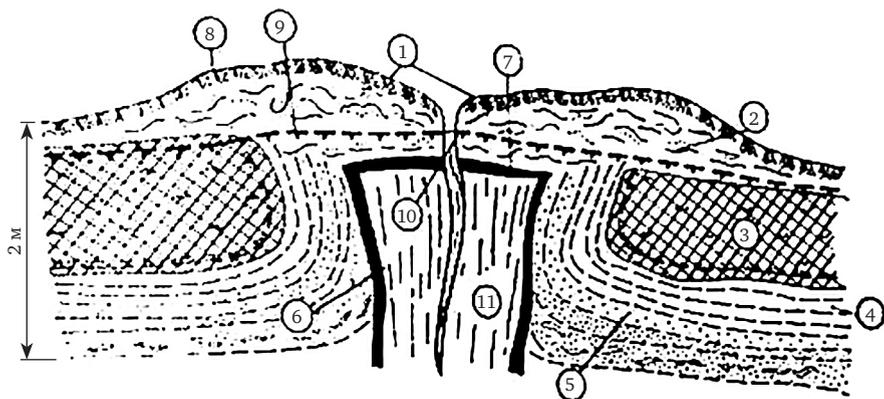


Рис. 2.16. Деформации выжимания около боковых контактов растущих ледяных жил (река Яна)¹;

1 — валики выжимания; 2 — материал, выжатый снизу и испытавший деформации в условиях деятельного слоя; 3 — заиленный торф; 4 — суглинок; 5 — переслаивание песка и алевролита; 6 — режеляционная кайма; 7 — линза прозрачного льда, лишенная признаков вертикальной полосчатости; 8 — дернина; 9 — кровля вечной мерзлоты; 10 — молодой росток ледяной жилы; 11 — ледяная жила²



Рис. 2.17. Пластовые льды мощностью более 20 м (бухта Мира на острове Новая Сибирь; фото М. Анисимова)

¹ Попов А. И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология).

Обобщение этих материалов показало, что в региональном плане выделяются три основных типа криогенного растрескивания¹: *южный* (высокотемпературный), если трещины находятся в пределах слоя сезонного оттаивания или промерзания и не проникают в мерзлую толщу; *переходный* (умеренно холодный), когда трещина образуется в промерзшей части слоя сезонного оттаивания, а затем по мере зимнего охлаждения массива проникает в верхние слои мерзлой толщи; *северный* (низкотемпературный), трещина возникает и проникает сразу в мерзлую толщу после того, когда слой сезонного оттаивания полностью промерз, а верхние слои мерзлой толщи охлаждены.

Зональность и региональные особенности распространения и морфологии полигональных-жильных образований для Забайкалья и Якутии установлены Е. А. Втюриной (1962), для Западной Сибири описаны В. В. Баулиным, Е. Б. Белопуховой, Г. И. Дубиковым, Л. М. Шмелевым (1967), для Средней Сибири — С. М. Фотиевым, Н. С. Даниловой, Н. С. Шевелевой (1974) и другими.

Так, для Западной Сибири было показано, что повторно-жильные льды развиваются в разных по составу отложениях: в торфяниках — при -2°C , в аллювиальных супесях и суглинках — ниже -6°C , образуя валиковый микрорельеф. Для Аляски Т. В. Певе (1966) было установлено, что повторно-жильные льды интенсивно растут при температуре -5°C и ниже. В Сибири южная граница распространения ледяных жил совпадает с границей развития валикового микрорельефа и среднегодовых температур — $-5\dots-6^{\circ}\text{C}$.

Морозобойное трещинообразование обычно приводит к возникновению полигонально-валиковых форм рельефа. При этом полигоны ограничены органо-минеральным валиком высотой до 0,5—1 м, который развивается постепенно по мере роста жил и нивелируется при затухании этого роста. Между валиками смежных полигонов находится понижение, под которым формируется ледяная жила. В возникновении плоскобугристых и округло-бугристых форм, кроме растрескивания, принимают участие процессы торфообразования, пучения, термокарста и эрозии. Вытаивание систем ледяных жил приводит к образованию бугристого рельефа и округлых форм-останцов, носящих название байджарахов.

2.7.4. Поверхностные мозаичные образования

На Крайнем Севере, на севере Евразии и Канады, в тундрах Шпицбергена, Аляски, Скандинавии и в альпийских горных областях встречаются мелкие структурные формы (бугры, «пятна-медальоны», грязевые потоки) и каменные многоугольники («венки», кольца, полосы, «реки», сети и т. д.), происхождение которых ча-

¹ Романовский Н. Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск : Наука, 1977.

стично связано и с трещинообразованием. Они отличаются сортировкой и определенным распределением материала. Их количество бывает столь велико, что они дают название рельефу: пятнистая тундра, медальонный рельеф и др.

Каменные многоугольники представляют собой круги или многоугольники диаметром от 1 до 2,5 м с вязкой глинистой почвой, содержащей большее или меньшее количество щебня и обломков, окаймленные по периферии валиком из преобладающего каменного материала, в котором обломки поставлены более или менее отвесно; валик имеет 30—50 см ширины, площадка внутри его плоско-выпуклая, но в центре немного ниже валика. На склонах эти круги превращаются в эллипсы, многоугольники вытягиваются в полосы. На поверхности отдельных многоугольников бывают видны многоугольники 2-го и даже 3-го порядка, окаймленные более мелкими камнями. При мелкодисперсном составе поверхностных пород образуются пятна и структурные формы. При этом поверхность земли разбивается трещинами шириной от 1 см и глубиной до 20—30 см на шестиугольные ячейки с поперечником до 1 м с выпуклым центром. Растительность на таких формах отсутствует или развита ограничено. В Исландии и других местах встречаются также своеобразные «морозные бугорки».

Эти формы образуются в результате комплекса процессов. Прежде всего они связаны с мелкополигональным растрескиванием и образованием при неравномерном промерзании сверху и сбоков закрытых (замкнутых) систем талого грунта в слое сезонного оттаивания. В таких системах резко возрастает гидростатическое давление, что и обеспечивает переход тиксотропного влажного грунта внутри блоков в пластично-текучее состояние. Нередко при этом происходят разрыв поверхностной мерзлой корки пород и изливание на поверхность разжиженной грунтовой массы. Наряду с этим может происходить и ориентированное выпучивание каменного материала. Кроме того, показано, что образование мелкополигональных форм может происходить в результате конвекции текучего материала различной плотности из-за различного содержания каменных обломков и изменения плотности самой воды вблизи 0 °С. Более легкий материал при этом двигается в теплое время года в центре из глубины к поверхности, а на последней — от центра к периферии, где идет обратно вглубь.

2.7.5. Пластовые льды

Впервые термин «пластовые залежи» использовал П. А. Шумский¹ для обозначения одной из форм залегания инъекционных льдов. Таким образом, с самого начала данный термин оказался связанным

¹ Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. М. : Изд-во АН СССР, 1955.

с конкретным механизмом образования. В дальнейшем это понятие становится более широким и уже не несет в себе генетической нагрузки. Этим термином стали называть все монолитные тела подземных льдов нежильного генезиса. Отмечены ледяные тела мощностью в десятки протяженностью в сотни метров (см. рис. 2.17). Как показало время, произвольное расширение понятия «пластовые залежи» объединило в нем образования различного происхождения и морфологии, что во многом предопределило многочисленные дискуссии об их происхождении, продолжающиеся до сих пор. В англоязычной литературе преобладает термин «массивный лед» (*massive ice*)¹.

При этом за основные генетические признаки принимались морфология ледяных тел и их строение. В результате многолетней дискуссии выделились три основные генетические группы процессов, формирующих пластовые залежи:

- 1) погребение ледяных тел, сформировавшихся в субаэральных условиях;
- 2) миграция связанной воды к фронту промерзания и формирование сегрегационных льдов;
- 3) выделение объемов свободной воды в грунтовом массиве, их промерзание и формирование инъекционных ледяных тел.

В каждой публикации, посвященной данной теме, эта генетическая классификация присутствует обязательно. Существует большое количество описаний пластовых льдов для разных природных условий. Рассмотрение всех их заняло бы неоправданно большой объем.

Существующие генетические группы отражают по сути фазовый состав грунтовой воды, участвующей в формировании пластовой залежи. Группа инъекционных процессов связана с жидкой фазой. Консервирование и погребение связаны с нахождением воды в твердой фазе. Сегрегационные механизмы определяются наличием рыхлосвязанной воды и возможностью ее миграции. Поскольку в субаквальных осадках наблюдается полное водонасыщение, существование воды в виде пара мы не рассматриваем. В процессе формирования криогенных систем, содержащих крупные ледяные тела, следует учитывать те огромные давления и напряжения, которые возникают в грунтовой толще. Это связано и с объемными изменениями при льдообразовании в ходе промерзания, и с потерей устойчивости пород, возникающей при оттаивании захораниваемых ледяных массивов.

Значительные локальные внутригрунтовые напряжения будут возникать всегда, при любом генезисе массивов льда. Это приводит к деформациям и перемещениям уже сформировавшихся ледяных тел. В литературе имеются многочисленные описания разнообразных следов динамических процессов, от незначительных изгибов

¹ Harris S., Brouckov A., Cheng G. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms.

ледяных шпиров до внедрения крупных ледяных тел, проникающих в мерзлый массив и разрушающих его сплошность. Несомненно, данные процессы могут сопровождаться инъекциями воды и водонасыщенного грунта, но автоматически объединять эти группы явлений будет неправильным. С учетом различия категорий воды и процессов льдообразования в строении пластовой залежи возможно нахождение до девяти сочетаний типов льдов различного генезиса¹. Развернутая, многоуровневая классификация пластовых льдов, учитывающая категории воды и процессы, участвующие в их формировании, предложена Ю. К. Васильчуком².

2.7.6. Газонасыщенные мерзлые породы

Наличие газа в криолитозоне установлено давно, но его роль в криогенных процессах считалась незначительной. Содержание газа в ММП не привлекало большого внимания геокриологов. Данная проблема, еще недавно казавшаяся незначительной и имеющей только академический интерес, становится важной как в теоретическом, так и в практическом отношении. С началом интенсивных поисков нефти и газа в Арктике и связанным с ними бурением скважин в многолетнемерзлых породах были отмечены газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента и шлама, дегазации промывочной жидкости. Резкое изменение температуры на Земле ученые связывают с растущей концентрацией в атмосфере парниковых газов, прежде всего углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4). Исследования, проведенные в последние десятилетия, показали, что северным территориям отводится особая роль в современном цикле CH_4 , здесь сосредоточено более 30 % всего органического углерода планеты, при этом подавляющая его часть законсервирована в мерзлоте.

В научной литературе существуют различные точки зрения на причины формирования газовой составляющей в ММП. В работах С. Е. Агалакова (1997), А. Р. Курчикова (1992, 2001) показано, что мерзлая толща является зоной локального накопления в диапировых структурах газа, поступающего по разломам. По мнению Б. М. Валяева, Р. М. Бембеля и других, поднимающийся из глубин газ сам является активным фактором, формирующим мерзлоту над газовыми месторождениями севера Западной Сибири за счет охлаждения при адиабатическом расширении. В. С. Якушев считает, что мощное влияние на накопление газа в форме газогидратов этом регионе оказало неравномерное эпигенетическое промерзание вы-

¹ Хименков А. Н., Брушков А. В. Введение в структурную криологию. М. : Наука. 2006.

² Васильчук Ю. К. Гомогенные и гетерогенные пластовые ледяные залежи в многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 1. С. 40—51.

ходящих из субаквального положения морских осадков. Ю. Б. Баду¹ предложена гипотеза стадийного формирования газовых скоплений в многолетнемерзлых породах морского генезиса.

Отличительной чертой газосодержащих геосистем криолитозоны является повышенное содержание газовой составляющей, происхождение которой связано или с накоплением органического вещества, являющегося основой для продуцирования биогенного газа, или с поступлением газа из посторонних источников (криогенная концентрация, движение катагенного газа по тектоническим деформациям).

Вне зависимости от генезиса газа и причин, вызывающих его перераспределение, происходит формирование саморазвивающейся газодинамической геосистемы, состоящей из нескольких связанных между собою зон: первичного формирования газа, области транзита и области накопления. Каждая зона соответствует определенной стадии перераспределения газа в ММП. Данная геосистема имеет четкие границы, определенную морфологию, свойства и структурные связи, определяемые индивидуальными особенностями строения ММП и неоднородностями температурного поля. Изучение газонасыщенных мерзлых пород находится в начальной стадии.

Наблюдающееся в последние десятилетия потепление климата может сказаться и на увеличении поступления парниковых газов за счет освобождения их из толщи многолетнемерзлых пород. Вклад выделившихся при этом парниковых газов, в первую очередь метана и углекислого газа, на изменение климата еще никто не учитывал, а он может быть значительным. По мере освоения Арктики будет возрастать техногенное тепловое воздействие на многолетнемерзлые газосодержащие породы, при этом возрастает опасность воздействия выбросов газов на инженерные сооружения. Тем не менее эта группа процессов не только не учитывается при разработке проектных решений и в прогнозах взаимодействия инженерного сооружения с многолетнемерзлыми грунтами, но даже не включена в группу опасных геологических процессов.

2.7.7. Воронки газового выброса

Непосредственно с газонасыщенными многолетнемерзлыми породами связаны воронки газового выброса (ВГВ). Часто в отечественной литературе для обозначения данных образований используют аббревиатуру GEC (*gas-emission crater*, кратеры газовой эмиссии). Первая, получившая название Ямальский кратер, была обнаружена в 2014 г. в районе Бованенковского газоконденсатного месторождения на Ямале (рис. 2.18).

¹ Баду Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи полуострова Ямал. М. : Научный мир, 2018.



Рис. 2.18. Ямальский кратер (ГЕС-1). Фото В. В. Оленченко

В настоящее время выявлено около 10 таких образований. Они формируются в результате одноразовых взрывных процессов в многолетнемерзлых породах и представляют из себя углубления цилиндрической формы диаметром до 15 м и глубиной до 60 м. Карта распределения большинства обнаруженных воронок представлена на рис. 2.19.

Несмотря на большой интерес к этому явлению со стороны СМИ и научного сообщества, проблема происхождения ВГВ еще далека от своего разрешения. По мнению наиболее авторитетных специалистов, занимавшихся проблемой происхождения ВГВ (В. И. Богоявленский, М. О. Лейбман, А. И. Кизяков, М. И. Эпов, И. Н. Ельцов, В. В. Оленченко, С. Н. Булдович, В. Хилимонюк, А. Н. Хименков, Ю. В. Станиловская и другие). Формирования 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. При этом на происхождение 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.

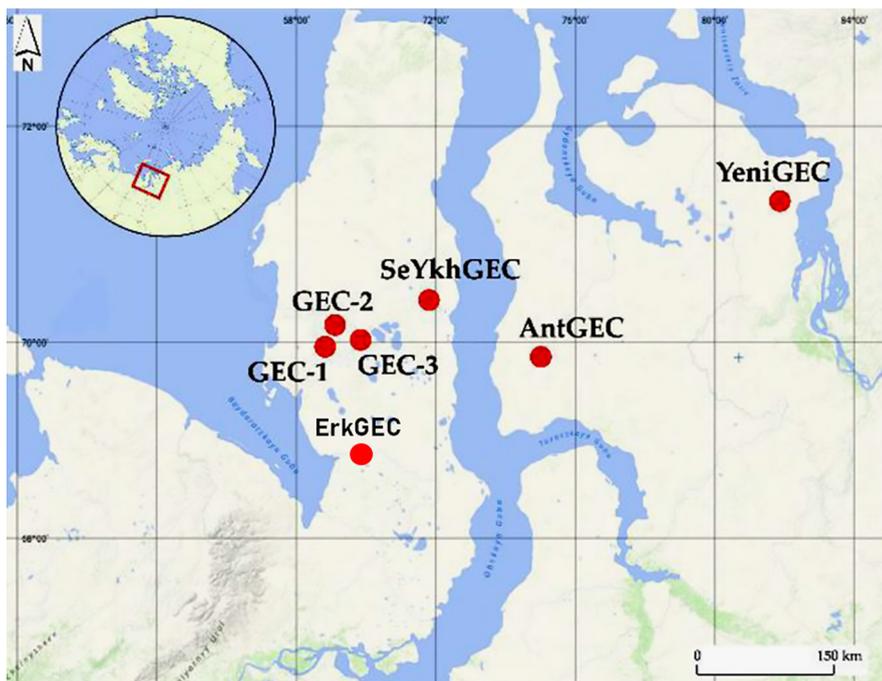


Рис. 2.19. Схема расположения ВГВ на севере Западной Сибири¹

Согласно глубоко разработанной, в приложении к геомеханическим условиям подземных горных выработок, энергетически-силовой теории внезапных газодинамических выбросов источником силы и энергии для этих выбросов является газ. В обобщенном виде газодинамический выброс включает в себя несколько стадий развития².

- 1) различную по продолжительности подготовительную стадию;
- 2) саморазвивающийся лавиноподобный процесс разрушения части горнопородного массива, с последующим выбросом обломочных продуктов разрушения в потоке расширяющегося газа и их инерциальное движение под действием запасенной ими кинетической энергии;

- 3) постепенно затухающее газовыделение из полости выброса.

Деление на стадии, характеризует резкие последовательные, накладывающиеся друг на друга изменения в деформировании породы при динамическом явлении.

¹ Leibman M. O. et al. Main results of 4-year gas-emission crater study // 5th European Conference on Permafrost (EUCOP 2018, Chamonix-Mont Blanc, France, 23th June — 1st July 2018). 2018 (с добавлениями авторов).

² 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.

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

Выброс газа относится к физическим взрывам и является конечным итогом длительной истории формирования, миграции и накопления газового флюида в локальных зонах. Поэтому формирование воронок газового выброса относится к области формирования газодинамических геосистем криолитозоны. Данные флюидодинамические геосистемы в настоящее время представляют наибольший интерес. Это связано с возникшими проблемами выбросов при бурении на северных месторождениях, освоением шельфа Арктических морей, проблемой поступления парниковых газов в атмосферу.

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

1. Все воронки приурочены к так называемым теплым ландшафтам. GEC-1 расположена на стыке хасырея (высохшая озерная котловина) и нижней части склона, поросшего кустарником; GEC-2 сформировалась в долине ручья; GEC-3 и YeniGEC сформированы на берегу водоема; SeYkhGEC образовалась непосредственно вблизи русла реки; ErkGEC образовалась в пойме реки, вблизи старичного озера в полосе кустарника; AntGEC сформирована на месте хорошо прогреваемого песчаного раздува, на бровке террасовой поверхности разрушаемой тероэрозийными процессами; воронка Осокина расположена на днище ложбины покрытой кустарником.

2. Все обнаруженные воронки имеют округлую форму, размер большинства воронок 10—20 м в поперечнике и глубиной 20—70 м.

3. Для всех воронок (стенки или выброшенный материал), отмечается 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 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).

6. В воронках (GEC-1, SeYkhGE)¹, в которых удалось сделать анализ газового состава, обнаружен метан. Это совпадает с составом газа в многолетнемерзлых породах Бованенковского месторождения, отобранных в параметрических скважинах. Здесь метан составляет 98,4—99,9 % .

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

Кратко рассмотрим основные гипотезы.

Гипотеза В. И. Богоявленского. Многолетнемерзлые породы являются хорошим 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 озера с таликами, бугры пучения)². По данным автора гипотезы, GEC-1 и GEC-2 приурочены к зоне аномально высокого теплового потока. Данное утверждение требует дальнейшего серьезного обоснования. Результаты исследований наиболее изученного Ямальского кратера показали присутствие мерзлоты под кратером³. Следовательно, фильтрация газа должна осуществляться сквозь многолетнемерзлые породы, что необходимо обосновать. В целом для данной гипотезы следует отметить слабую проработку геокриологической составляющей (структурно-текстурные особенности строения многолетнемерзлых пород и льдов, последовательную смену мерзлотных процессов).

Гипотеза М. О. Лейбман. Положительный экстремум лета 2012 г. привел к повышению температуры в слое гидратосодержащих мерзлых пород, к высвобождению газа при диссоциации газогидратов (в основном метана) и образованию воронок газового выброса⁴. Для обоснования 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 многолетнемерзлых породах. Измерения температуры грунтов в районе Марре-Сале показывают, что таких резких колебаний не наблюдается⁵. Гипо-

¹ Стрелецкая И. Д. и др. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. Т. 1. № 2.

² Богоявленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1 (29). С. 48—54.

³ Оленченко В. В. и др. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 4. С. 94—105.

⁴ Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. 2016. № 2. С. 15—24.

⁵ Дубровин В. А., Кришук 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.

теза М. О. Лейбман базируется на представлениях о влиянии кратковременного прогрева верхней части ММП за счет летних температур воздуха. При этом отсутствует анализ температурных кривых в глубоких скважинах. Не берется во внимание стадийность протекания процессов. Не используются данные по строению воронок. Не учитываются данные геофизики о строении толщи многолетне-мерзлых пород. В то же время данная гипотеза универсально подходит для рассмотрения заключительной стадии всех других гипотез. Если представить, что на фоне нарастающих давлений в кровле мерзлых пород происходит накопление деформаций и ее прочность со временем уменьшается, то сезонное повышение температуры на глубине около 10 м приведет к резкому падению прочностных свойств мерзлой кровли, что может спровоцировать взрыв и образование воронки.

Гипотеза И. Д. Стрелецкой. По материалам исследования Ямальского кратера 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 воздухом¹. Необходимо оценить причины появления пустот типа грота, обосновать и оценить механизмы формирования и возможности длительного существования.

Гипотеза С. Булдовича с соавторами. Формирование Ямальского кратера связано с взрывным разрушением подозерного талика. Толщина мерзлых грунтов над таликом на момент его разрушения составляла от 7 до 9 м. Талик представлял собой водно-грунтовую газонасыщенную смесь с растворенным газом (в основном углекислым) бактериального происхождения. Верхнюю часть талика занимал слой газа².

Криогенное извержение, вызванное термическими трещинами (ледяными клиньями) в замерзшей кровле, включало несколько стадий.

На первом этапе (который длился несколько минут) дегазация происходила в основном из верхней части талика: газ выделялся через трещины и расширялся адиабатно. На втором этапе (гидравлическом), который длился несколько часов, вода изливалась и дегазировалась, что приводило к взрывной восходящей миграции газовой смеси. Последняя стадия (от 5 до 25 ч) извержения незамерзшего грунта протекала при выделении газа из поровой воды в незамерзшей породе или из диссоциирующих гидратов углекис-

¹ Стрелецкая И. Д. и др. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал.

² Buldovich S. N. et al. Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal peninsula (Russia) // Scientific reports. 2018. Vol. 8.

лого газа. Гипотеза авторов базируется на анализе образцов, отобранных с глубин 10—17 м, и соответствует только верхней части кратера. Первоначальная глубина Ямальского кратера составляла около 60 м. Распространение выводов, сделанных для верхней части кратера, на большие глубины требует дополнительного обоснования.

Гипотеза М. И. Эпова с соавторами¹. Причиной появления Ямальского кратера стало разрушение газогидратов на глубине 60—80 м. Источником повышенного теплового потока может быть крупная нефтегазоносная структура, тепловой поток от которой и разогрел газогидраты в верхней части разреза. Кроме того, на исследуемой площади были выявлены геоморфологические и геофизические признаки тектонических нарушений, в узле пересечения которых и расположен кратер. Разложение газогидратов в толще мерзлых пород под действием теплового потока вполне возможно. Остается невыясненным, каким образом с глубины 60 м мерзлая порода могла быть выброшена на поверхность. По расчетам В. П. Мерзлякова², на данной глубине для выброса грунтового массива необходимо давление около 10 МПа. При разложении газогидратов при отрицательных температурах создаваемое давление³ не превышает 2,6 МПа. Для других воронок повышенный тепловой поток не доказан. Поэтому данная гипотеза требует дальнейшего подтверждения.

Гипотеза А. Н. Хименкова, Ю. В. Станиловской. Основной причиной формирования обнаруженных к настоящему времени воронок газового выброса являются гидратосодержащие многолетнемерзлые породы, а причиной нагрева, выводящего их из равновесного состояния, — озера, широко распространенные в Западной Сибири. Подготовка взрыва происходит в несколько этапов⁴.

Последовательность смены стадий развития Ямальского кратера приведена на рис. 2.20.

I. Исходной точкой, вызвавшей все последующие события, является локальный прогрев толщи ММП. Под поверхностным водоемом формируются талик и зона растепления мерзлых пород с более высокими отрицательными температурами, чем в окружающих ММП.

¹ Эпов М. И. и др. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. 2014. Вып. 5 (59). С. 14—23.

² Хименков А. Н. и др. Развитие взрывных процессов в криолитозоне в связи с формированием Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2017. № 4. С. 13—37.

³ Истомин В. А. и др. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазоХимия. 2018. № 2. С. 33—42.

⁴ Хименков А. Н., Станиловская Ю. В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 1—25.

Под действие локального нагрева под поверхностным водоемом в мерзлых породах происходит повышение температуры в пределах отрицательных значений. В области локального прогрева ММП под озерами температуры многолетнемерзлых пород находятся в диапазоне $-1...-3$ °С.

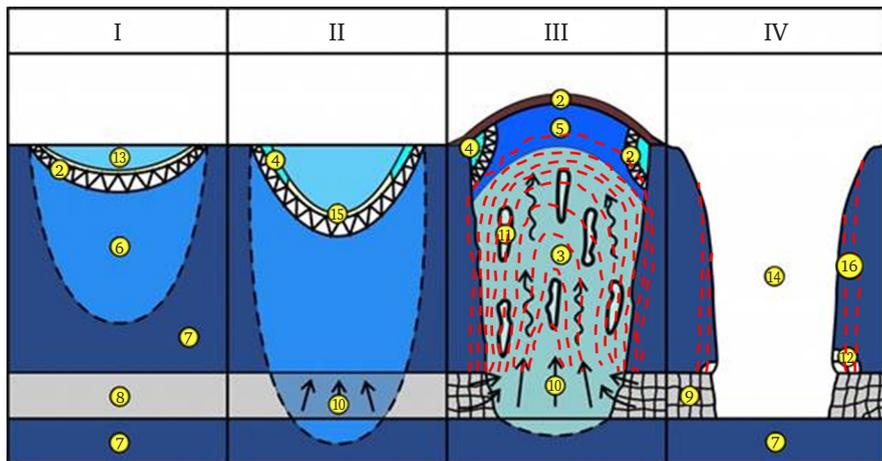


Рис. 2.20. Стадии развития Ямальского кратера (I, II, III, IV):

1 — покровный горизонт; 2 — слой льда между тальми и мерзлыми породами; 3 — мерзлый газонасыщенный ледогрунт со следами пластических деформаций; 4 — инфильтрационно-сегрегационный лед; 5 — газонепроницаемая кровля ММП; 6 — зона повышения температуры в ММП под озером; 7 — ММП вне отепляющего 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 мерзлой породе и льде (оформление Д. Волкова)

II. После того как температуры в слое газогидратов, залегающих на глубине 60—80 м, превысят значения, обеспечивающие их устойчивое состояние, начинается процесс диссоциации с выделением метана, с начальным давлением 2,2—2,6 МПа.

III. Газ, находящийся под давлением, начинает фильтроваться в наименее прочные высокотемпературные мерзлые породы. Газ под давлением проникает в мерзлую породу, что значительно ослабляет ее прочность и вызывает пластические деформации льда. Появившиеся трещины и дислокации ускоряют фильтрацию газа. Отвод газа (за счет фильтрации) стимулирует процесс диссоциации газогидратов и выравнивает давления 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 ММП. По всей высоте штока давление в пузырьках газа будет соответствовать значения, наблюдающимся в зоне диссоциации. Высокое давление в массиве ММП с одновременным давлением снизу приведет к движению газонасыщенного ледогрунтового штока. На контакте движущегося массива и неподвижной вмещающей льдонасыщенной породы формируется кольцевая структура шириной 1—2 м, состоящая из субвертикально ориентированных переслаивающихся слоев льда и грунта толщиной 0,5—10 мм. Движение газонасыщенной ледогрунтовой массы вверх приводит к пластическим деформациям верхнего слоя талых пород (талика), его выпучиванию и промерзанию. В результате формируется низкотемпературный газонепроницаемый прочный 6—8-метровый слой многолетнемерзлой породы, являющийся экраном для движущегося снизу газового потока. При его деформации под воздействием давления снизу развивается бугор пучения.

IV. После того как пластические деформации мерзлой кровли достигнут предельных значений, происходит ее разрыв и выброс ледогрунтового материала, насыщенного газом, находящимся под повышенным давлением.

Ямальский кратер является примером полного законченного жизненного цикла саморазвития криогенной газодинамической геосистемы. Различные начальные условия, а также разнообразие и интенсивность протекающих в период подготовки взрыва процессов обуславливают различные сценарии развития воронок газового выброса.

Рассмотренная феноменологическая модель формирования Ямальского кратера является лишь частным случаем, отражающим условия развития воронок газового выброса. Газ, содержащийся в многолетнемерзлых породах, может отличаться по генезису: подмерзлотные глубинные катагенетические газы, биохимические газы, образующиеся в результате жизнедеятельности в талых и мерзлых породах, газы, образующие при диссоциации газогидратов, и др.

Различаются причины, обуславливающие развитие аномально высоких давлений газа, такие как климатический разогрев многолетнемерзлых пород, промерзание замкнутых таликов, локальный прогрев многолетнемерзлых пород под поверхностными водоемами, 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 каждом отдельном случае следует рассматривать индивидуальный сценарий развития газодинамической геосистемы, приводящей (или не приводящей) к формированию воронки газового выброса. Для примера

рассмотрим несколько сценариев, связанных с разложением газовых гидратов. Один и тот же процесс в различных природных условиях приведет к различным результатам.

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

2. При достаточной глубине и ширине озера газ, выделившийся при диссоциации, может не накапливаться в ММП, а выделяться из подозерного талика. Это наблюдается на многих озерах Ямала. Выделение газа наблюдается от нескольких месяцев до нескольких лет, но без взрыва, поскольку есть возможность свободного выхода газа.

3. 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;

4. Рост давления при диссоциации газовых гидратов может возрастать быстро. После того как давление в полости превысит прочность кровли, происходит выброс, особенно если газогидратный слой залегает на небольшой глубине (20—30 м). При этом возможны различные варианты: от небольшого взрыва без образования бугра пучения до образования большого многолетнего бугра, предшествующего пневматическому выбросу мерзлой кровли. В конечной фазе миграции сквозь многолетнемерзлые породы газ или высачивается в атмосферу, преимущественно через таликовые зоны и поверхностные водоемы, или накапливается под приповерхностными низкотемпературными газонепроницаемыми мерзлыми 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 усиливается.

5. В случаях, когда в промерзающих таликах содержится достаточно большое количества газа, воронки газового выброса могут образоваться по типу формирования гидролакколитов.

Подводя итог рассмотренных гипотез формирования воронок газового выброса, следует отметить, что на сегодняшний день ни одна из гипотез не подкреплена достаточным количеством данных. Прежде всего отсутствуют данные о всей структуре образований, связанных с физическими взрывами в многолетнемерзлых породах. Недостаточно данных о источнике поступления газа. Сведения о строении слагающих воронки мерзлых пород и льдов отрывочны, имеются лишь единичные данные о структуре льда.

2.7.8. Флюидодинамические криогенные геосистемы

В массивах многолетнемерзлых пород наблюдаются локальные ледогрунтовые образования со следами динамических процессов. Они распространены в породах всех возрастов и всех генетических типов. Данные криогенные образования приурочены к зонам локального повышения температуры в пределах отрицательных значений в мерзлых породах, или формированию криогенных напоров в водонасыщенных породах при их промерзании, или формированию газонасыщенных зон с аномально высоким давлением.

Локальные деформированные, слоистые ледогрунтовые тела, разрывающие вмещающие отложения различного генезиса, являются внутригрунтовыми образованиями. Терминологическая неопределенность, существующая в настоящее время в геокриологии, не позволяет провести какую-либо систематизацию данных образований.

Ш. Ш. Гасановым было высказано предположение о том, что протавивание верхних горизонтов многолетнемерзлых пород сопровождается прогревом подстилающих. При этом происходят частичное таяние льда цемента и перестройка температурного поля. Это приводит потеплевшие мерзлые породы в неустойчивое состояние, связанное с уменьшением прочности и возникновением сдвиговых напряжений. На определенном этапе напряжения могут превзойти длительное сопротивление льдогрунтовой массы на сдвиг, что повлечет ее вязкопластическое течение¹. Данное предположение было высказано исследователем для склонов, но оно верно также и для других условий. Локальные зоны перераспределения ледогрунтовых высокотемпературных масс в массиве ММП могут формироваться, например, в области повышения температуры многолетнемерзлых пород под термокарстовыми озерами, особенно если в зону нагрева попадают гидратосодержащие горизонты (эти примеры будут рассмотрены ниже).

В настоящее время каких-либо общих подходов в осмыслении и построении моделей движения потоков вещества различного фазового состава в толще мерзлых пород не разработано. Определенно можно лишь утверждать, что морфологические, структурные и текстурные особенности данных образований не могут быть сведены к трем основным типам льдов: сегрегационным, инъекционным и погребенным. Признание возможности возникновения потоков вещества в мерзлых породах приводит к необходимости использовать положения флюидогеодинамики. В геологии это направление давно и успешно реализуется сначала для исследования миграции газа, воды, нефти, гидротермальных растворов, движения магмы, а позднее и для анализа пластических деформаций твердых пород. Большое значение в становлении флюидогеодинамики как науки имели работы П. Н. Чирвинского, Б. П. Высоцкого, А. Е. Хотько-

¹ Гасанов Ш. Ш. Криолитологический анализ. М. : Наука, 1981.

ва, Г. Л. Поспелова, А. Е. Бескова, Ю. А. Косыгина, Е. В. Артюшкова, Б. А. Соколова, А. И. Кудряшова и других авторов.

А. И. Кудряшов¹ сформулировал основные положения флюидогеодинамики. *Флюидогеодинамика* (ФГД) — раздел динамической геологии, изучающий процессы механической миграции флюидов в недрах Земли с целью установления закономерностей и геологической роли этой миграции. Ее объектом являются природные флюиды, а предметом — законы их механической миграции и геологические результаты этой миграции. Все реальные тела в условиях длительного тангенциального напряжения ведут себя как жидкости. В геологических процессах в качестве флюида могут выступать не только газы, водные растворы, нефть, илы, магма, но и «твердые» геоматериалы.

Основные понятия ФГД — флюид, миграционное напряжение и флюидодинамическая система. *Флюид* — геологическое тело, характеризующееся состоянием текучести, вызванной внешней силой. *Миграционное напряжение* — это перепад потенциальной механической энергии между двумя точками, определяющий возможность, направление и интенсивность перемещения флюида. *Флюидодинамическая система* (ФДС) — геологическое тело, представленное флюидом, механически взаимодействующее с вмещающим субстратом земных недр, все части которого гидравлически связаны между собой и находятся в упорядоченном движении под действием миграционного напряжения, созданного какой-либо одной причиной. Полная ФДС состоит из областей питания, транзита и разгрузки. Количество областей в ФДС может быть различным, пространственно они могут совпадать. Выделяется четыре типа ФДС: газодинамические, гидродинамические, вулканодинамические, литодинамические².

Рассмотренные выше положения ФГД в полной мере могут быть использованы в геокриологии. Возможность возникновения флюидов в промерзающих, мерзлых и оттаивающих породах базируется на основных свойствах льда. Кратко перечислим их. При замерзании воды и формировании льда происходит увеличение объема, а при таянии — соответственно, уменьшение. Имеется большая чувствительность прочностных и деформативных свойств льда к изменениям температуры, особенно при значениях, близких к точке плавления. Реальная температура льда в естественных условиях всего на несколько градусов ниже температуры его плавления. Это позволяет при небольших нагрузках переводить лед и льдонасыщенные породы в текучее состояние. При повышении температуры мерзлых пород и льдов

¹ Кудряшов А. И. Флюидогеодинамика и эпигенез калийных залежей (на примере Верхнекамского месторождения) : автореф. дис. ... доктора геолого-минералогических наук. Пермь, 1994.

² Кудряшов А. И. Опыт классификации флюидодинамических систем // Труды XI геол. конф. Коми АССР. Сыктывкар : Коми НЦ УрО АН СССР, 1991. С. 214—217.

до значений, близких к 0°C , в них возникает множество дефектов, что делает возможным напорную фильтрацию газа и жидкости.

Применительно к условиям криолитозоны можно выделить три типа ФДС: криогазодинамические, где в качестве флюидов выступает газ, криогидродинамические, здесь системообразующими элементами являются пресные и минерализованные воды, и криолитодинамические, в которых флюидами являются мерзлые породы и льды (преимущественно высокотемпературные). Вне зависимости от причины формирования локального избыточного давления, приводящего к миграции того или иного флюида в многолетнемерзлых породах, все они являются криогенными, поскольку обусловлены особенностями строения и свойств ледяных включений. Нахождение льда в естественных условиях вблизи точки плавления, высокая чувствительность его к колебаниям температуры и давлений, выражающаяся в изменении прочностных свойств, пористости, структуры, делают мерзлые породы чувствительными даже к небольшим локальным внешним воздействиям.

Для каждого типа криогенных ФДС можно выделить свои ведущие процессы:

- для криолитодинамических систем — деформации и пластично вязкое течение льдов и мерзлых грунтов (рис. 2.21);
- для криогидродинамических систем — гидроразрыв и фильтрация (для минерализованных вод) (рис. 2.22, 2.23);

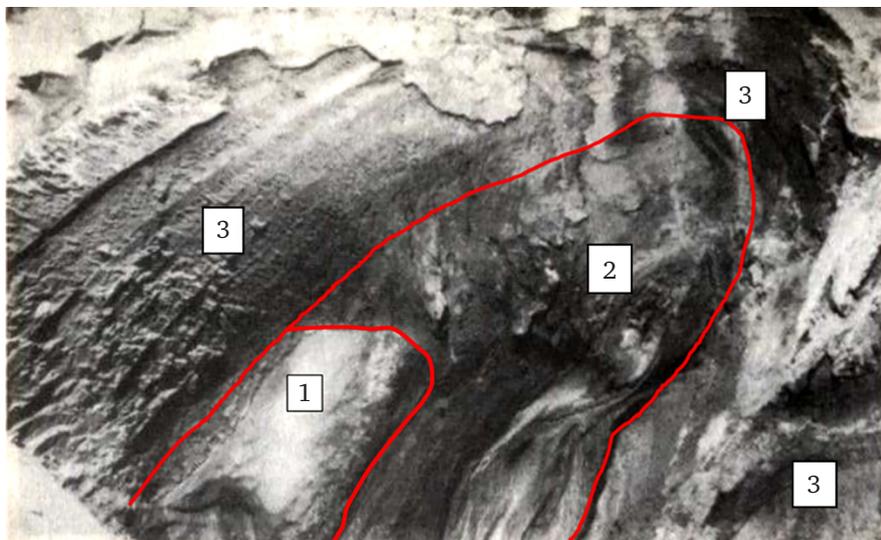


Рис. 2.21. Внедрение ледогрунтового монолитного тела (1) и дислоцированной ледогрунтовой массы (2) в слоистые прибрежно-морские пески и алевриты (3), изогнутые в антиклинальную складку (п-ов Ямал)¹

¹ Данилов И. Д. Методика криолитологических исследований. М. : Недра, 1983.



Рис. 2.22. Ледогрунтовый шток инъекционного генезиса, прорывающий пластовую залежь и деформирующий глину с сетчатыми криотекстурами (фото Ю. Б. Баду)

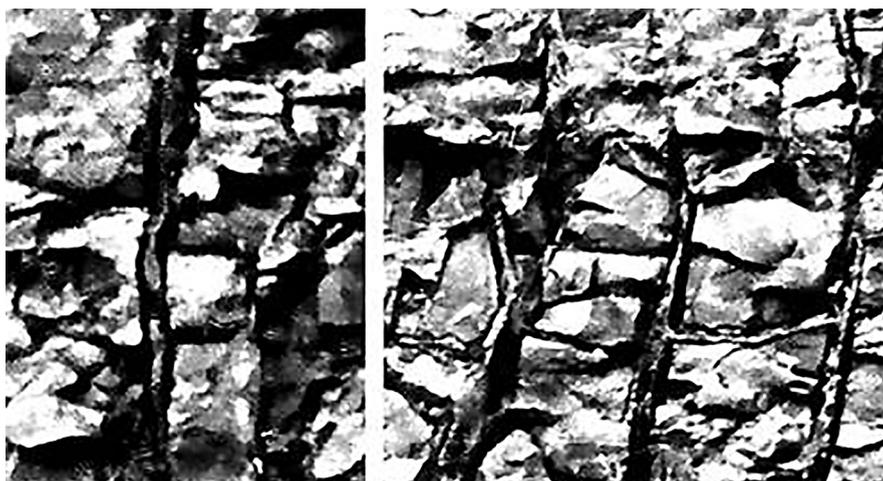


Рис. 2.23. Фрагменты вертикальных инъекционных шлиров, изображенных на рис. 2.22. К их осевым швам приурочены вытянутые грунтовые включения

— для криогазодинамических систем — напорная фильтрация газов сквозь многолетнемерзлые породы (рис. 2.24).

Флюидогеодинамические геосистемы в криолитозоне имеют ряд общих свойств:

— они локальны, каждая из них «вложена» в массив вмещающих многолетнемерзлых пород;

— их криогенное строение отличаются от строения вмещающих пород;

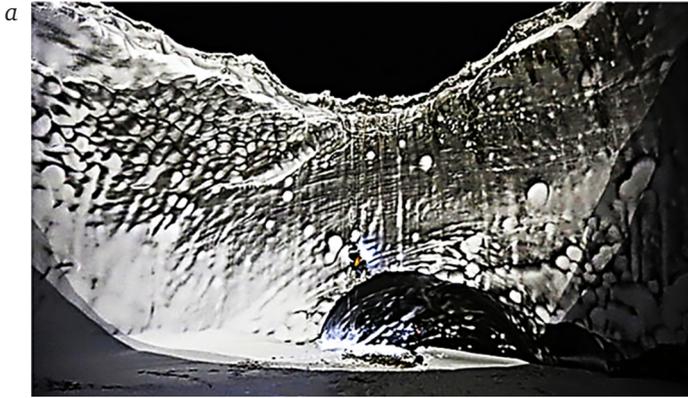


Рис. 2.24. Газовые флюиды в стенках грота в нижней части Ямальского кратера: а — общий вид кратера и грота (округлые белые пятна — углубления на месте газовых включений, заполненные снегом); б — зона контакта газовых флюидов с ячеистой структурой на стенке кратера; в — газовые флюиды в ледяных стенках нижней части кратера (белые округлые пятна — газонасыщенные скопления). Фото В. Пушкарева (ноябрь 2014 г.)

— особенностью их строения являются следы динамических процессов (пластические деформации, следы течения, разрывы, надвиги и др.);

— у них четкий и резкий контакт с вмещающими породами;

— они имеют общую структуру, в которую входят область первичного существования флюида, формирование области повышенного давления, область транзита, область накопления и разгрузки. Границы областей могут пространственно совпадать, некоторые области могут отсутствовать, это зависит от истории развития системы;

— у каждой криофлюидодинамической геосистемы есть соответствующая история развития, т. е. смена преобладающих процессов и соответствующих им криогенных образований. Изучение строения этих структур и их пространственного расположения позволяет восстановить последовательность событий в формировании рассматриваемых криогенных геосистем¹.

Выводы

1. Решить проблему генезиса криогенной системы, используя материалы изучения ее строения или изучения входящих в нее подсистем более низкого иерархического уровня, невозможно. Необходимы данные анализа криогенной системы более высокого уровня, в которую рассматриваемая система входит как структурная единица, притом что формирование мерзлых толщ происходит с самого низкого уровня — кристалла льда. Предпосылки для создания криогенных систем появляются при взаимодействии геосистем самого высокого уровня, начиная с космического взаимодействия Земли и Солнца и постепенно опускаясь до энергетического состояния геосфер и формирования генетических типов отложений. Появление кристалла льда, с одной стороны, является завершающим процессом при охлаждении и промерзании, а с другой — служит основой для развития систем более высокого уровня, а в конечном итоге и всей криосферы. К сожалению, в настоящее время преобладает другой подход. Считается, что только на основании изучения кристалла льда, шпиря или отдельного ледяного тела (жильный лед, пластовая залежь) можно выяснить происхождение как самого ледяного элемента, так и мерзлой грунтовой толщи в целом.

2. Очевидным критерием для выделения криогенных систем в литосфере являются границы фаций или генетических типов. При всей сложности их выделения анализ вещественного состава, структурные текстурные исследования позволяют находить их довольно уверенно. Фации отражают развитие элементарных участков

¹ Хименков А. Н., Станиловская Ю. В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера.

природной среды и особенности ее перехода в мерзлое состояние. Мерзлотно-фациальный анализ, предложенный Е. М. Катасоновым, к сожалению, так и не получил пока развития. Это в значительной степени препятствует развитию исследований криогенных систем в литосфере (геокриологии, криолитологии).

3. Криогенные системы литосферы обладают удивительными особенностями. Некоторые их параметры, связанные со строением (криогенное строение, льдистость), не меняются с момента формирования и могут существовать десятки и сотни тысяч лет. Другие параметры, зависящие от температуры (механические свойства, а также, в определенной мере, содержание солей), динамичны и могут значительно изменяться за несколько лет или даже в течении года (в слое годовых колебаний температуры). Причины неустойчивости криогенных систем многочисленны — это изменение климата, смена растительных сообществ или экспозиции склонов, гидрологические или гидрогеологические процессы, воздействие хозяйственной деятельности. Эта двойственность — одновременно и устойчивость, и динамичность — требует значительной осторожности при попытках выявить количественные и даже качественные связи между поверхностными условиями и строением криогенных систем.

Тема 3

КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ НА ГРАНИЦАХ ГЕОСФЕР

Мы лепим статуи из снега и плачем,
когда видим, как они тают.

Вальтер Скотт

В отличие от литосферы устойчивые, долговременно существующие криогенные системы в атмосфере и гидросфере не образуются. В атмосфере образовавшиеся кристаллы льда в виде снежинок оседают на землю или на воду. В водной среде сформировавшиеся кристаллы льда всплывают и так же не образуют устойчивых криогенных систем. При этом на границах атмосферы, литосферы и гидросферы развиваются протяженные и мощные криогенные системы, оказывающие значительное влияние на природу Земли. Своеобразны криогенные образования, приуроченные к границе гидросферы и литосферы. Именно поэтому формирование криогенных систем, приуроченных к границам различных геосфер, следует рассмотреть отдельно.

3.1. Граница «литосфера — атмосфера»

3.1.1. Снежный покров

Почти нет территории в Европе, Азии или Северной Америке, которая однажды не покрывалась бы снегом. Изучение снежного покрова имеет долгую историю. В трудах А. И. Воейкова, Б. П. Вейнберга, А. Б. Добровольского, В. Паульке, П. А. Шумского, Б. А. Савельева, В. М. Котлякова¹ и многих других исследователей подробно рассмотрены вопросы формирования, распространения, преобразования и разрушения снега. Применительно к данному курсу нас снег интересует прежде всего как устойчивая криогенная система, развивающаяся от момента выпадения первых снежинок к первичному снежному покрову, затем путем преобразований к стабильному состоянию и в последующем или к разрушению

¹ Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / гл. ред. В. М. Котляков. М. : Институт географии РАН, НПП «Картография», 1997.

в следствие сезонного образования, или глубокой трансформации при многолетнем состоянии.

Снежный покров — сезонная горная порода, состоящая из выпадающих и нарастающих ледяных кристаллов, паров воды, прослоек и включений льда, жидкой воды, различных органических и минеральных примесей¹. Материалом для формирования снежного покрова служат атмосферные ледяные кристаллы и сростки кристаллов первично идиоморфного строения с изотропными свойствами сублимационного и конжеляционного генезиса, начиная от снежинок (рис. 3.1) и кончая ледяным дождем.



Рис. 3.1. Снежинка под микроскопом²

Петрографы рассматривают снежный покров как особую разновидность осадочной ледяной породы атмосферного происхождения, отличающуюся большой пористостью. Он отличается чрезвычайной изменчивостью свойств, строения, высоты во времени и в пространстве и повсеместно распространен в полярных и субполярных районах Земли. Устойчивый снежный покров обычно образуется спустя некоторое время после установления отрицательной среднесуточной температуры воздуха. Снегонакопление происходит в основном в первую половину зимы.

На равнинной территории России наибольшая за зиму высота снежного покрова изменяется от 0,2 до 0,8 м. В континентальных рай-

¹ Котляков В. М. Снежный покров Земли и ледники. Л. : Гидрометеиздат, 1968.

² Фото Electron and Confocal Microscopy Laboratory-Agricultural Research Service, US Dept of Agriculture. URL: <https://pixels.com/featured/snow-crystal-electron-and-confocal-microscopy-laboratory-agricultural-research-service-us-dept-of-agriculture.html> (дата обращения: 17.11.2020).

онах Сибири (Центральная Якутия, Забайкалье) она составляет¹ всего 0,3—0,4 м. На побережье арктических морей высота снежного покрова с запада на восток вначале уменьшается с 0,5—0,6 (побережье Белого моря) до 0,3 м (Таймыр), затем вновь возрастает². На Дальнем Востоке снежный покров местами отличается особенно большой мощностью (рис. 3.2). Больше всего снега в мире в течение года (31 102 мм) выпадало в местечке Парадайс в штате Вашингтон, США. Рекордный по количеству выпавшего снега (4800 мм) снегопад зафиксирован 13—19 февраля 1959 г. на горе Шаста, штат Калифорния. Самый обильный однодневный снегопад был в Силвер-Лейке, штат Колорадо, 14—15 апреля 1921 г., когда за сутки выпало 1930 мм снега³.



Рис. 3.2. Снежные отложения высотой более двух метров в Нисеко, остров Хоккайдо

На территории России наибольшая длительность залегания устойчивого снежного покрова — на побережье арктических морей

¹ Копанев Д. И. Снежный покров на территории СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1978.

² Китаев Л. М., Кислов А. В. Региональные различия снегонакопления — современные и будущие изменения (на примере Северной Европы и севера Западной Сибири) // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 2. С. 98—104; Бульгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива данных «Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР».

³ URL: <http://www.prirodazemli.ru/pogoda/sneg-i-grad/samye-bolshie-snegopady.html> (дата обращения: 17.11.2020).

(240—260 дней в году), наименьшая — в южных районах Средней Азии (20 дней и менее). В континентальных районах Сибири она составляет 200—220 дней, а в средней полосе европейской части СССР — 100—140 дней в году. Изменение длительности залегания устойчивого снежного покрова в целом подчиняется широтной зональности¹.

Отложенные снежинки образуют слой снежного покрова определенной текстуры (стратиграфии) и плотности. Плотность свежееотложенного снега изменяется в довольно широких пределах — от 10 до 300 кг/м³. Она зависит от температуры воздуха и от других метеорологических условий во время выпадения — скорости ветра, влажности воздуха, капель дождя и пр. Например, если плотность снега, отложенного в безветренную погоду, не превышает 40—70 кг/м³, то при сильном ветре она может достигать 280—300 кг/м³.

Различают две наиболее ярко выраженные разновидности свежего снега²:

1) фации безветренного отложения (пушистый, игольчатый, порошковидный снег, снежная пыль), имеющие идиоморфно-кристаллическую и скелетно-кристаллическую первичную структуру снежинок, малую плотность, большую пористость, правильную и нечеткую слоистость;

2) ветровые фации (твердый метелевый снег) с обломочной агломеративной структурой снежинок, большой плотностью, меньшей пористостью тонкой и более четковыраженной слоистостью.

Влияние снежного покрова на почвы и климат рассматривал еще в XIX в. А. И. Воейков³.

3.1.2. Метаморфизм снега

С момента отложения снег практически сразу начинает подвергаться преобразованиям. Происходит «старение» снега с переходом от свежеевыпавшего к молодому и старому снегу различной степени зернистости. Современный взгляд на метаморфизм снега можно найти в работе Р. А. Чернова⁴.

Изменения снежного покрова под воздействием внешних условий, включающие поверхностные изменения формы и размеров кристаллов, их внутренние деформации и взаимное смещение кри-

¹ Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива данных «Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР».

² Шумский П. А. Основы структурного ледоведения.

³ Воейков А. И. Снежный покров, его влияние на почву, климат и погоду и способы исследования. Изд. 2-е, испр. и знач. доп. СПб., 1889 (Записки Императорского русского географического общества по общей географии. Т. XVIII. № 2).

⁴ Чернов Р. А. Метаморфизм и термические свойства свежеевыпавшего снега (по исследованиям в Подмосковье) // Лед и снег. 2016. Т. 56 (2). С. 199—206.

сталлов или их частей нарушением связей между ними, называют *метаморфизмом*. Впервые это определение применительно к оценке преобразований снежного покрова встречается в работе Х. Бадера¹. Метаморфизм снега представляет собой непрерывный процесс, он охватывает ряд стадий от выпадения снежинок до стаивания или перехода в лед (перекристаллизация — фирнизация — льдообразование).

Выделяются два вида метаморфизма: деструктивный и конструктивный. Деструктивный метаморфизм начинается с распада свежеснежных крупных звездообразных и дендритовых кристаллов снега на отдельные части. Наиболее мелкие частицы испаряются, а пар сублимируется на более крупных, которые при этом увеличиваются в размерах, приобретая округлую изометричную форму. Этот процесс сопровождается зарастанием узких щелей между кристаллами, способствуя увеличению контактов и сцеплению между ними.

Конструктивный метаморфизм характеризуется интенсивным ростом некоторых кристаллов, ориентированных в благоприятных для этого процесса положениях, за счет поглощения ими других. При этом число зерен в единице объема снега и удельная поверхность непрерывно уменьшаются. Поскольку контакты и связи между зернами (сросшимися кристаллами) увеличивается медленнее, чем происходит рост отдельных кристаллов, часто наблюдается ослабление в течение времени внутреннего сцепления².

Свежеотложенные снежинки попадают в условия, не соответствующие их устойчивому состоянию в тропосфере, где они возникли. Переход в более устойчивое состояние происходит под действием ряда внутренних факторов, главными из которых считают энергию напряженного состояния и энергию поверхностного натяжения кристаллов (эффект Гиббса — Кюри — Вульфа), а также разницу в давлении паров над зернами льда с различной кривизной (эффект Томсона). Кроме внутренних факторов, на изменение структуры отложенного снега оказывают влияние внешние факторы: оседание под действием собственного веса, ветер, солнечная радиация, жидкие осадки.

На равнинных территориях снег до завершения таяния успевает пройти только стадию перекристаллизации. Сущность процессов перекристаллизации заключается в самопроизвольном росте размеров и сложности (набор различных форм) кристаллов, изменении взаимного расположения и связи между ними, уменьшении общего числа кристаллических зерен. В процессе перекристаллизации пер-

¹ Bader H. Beitrage zur geologie der scheid // Geotecchn. Ser. Hydrol. 3. Zurich, 1939.

² Савельев Б. А. Физика, химия, и строение природных льдов и мерзлых горных пород.

воначально изотропный снег утрачивает свою первичную структуру. В ней образуются более или менее крупные ледяные зерна перекристаллизованного (зернистого) снега.

Различают следующие разновидности зернистого снега:

— мелкозернистый — беловато-серого цвета, пластичен, диаметр ледяных зерен до 1 мм;

— среднезернистый — сероватого цвета, рассыпчатый, состоит из бесформенных ледяных зерен диаметром 1—3 мм;

— крупнозернистый — серый или голубовато-серый, сыпучий, ледяные зерна имеют угловатую форму диаметром от 3 до 5 мм; глубинная изморозь (нередко употребляются понятия «глубинный иней» или «снег-пльвун»), состоящая из сростков крупных вертикально-ориентированных прозрачных ледяных кристаллов в виде пластинок или волокон, рыхлосвязанных и поэтому сыпучих.

Плотность снежного покрова в процессе его метаморфизма увеличивается. Одной из главных причин является уплотнение снежинок под влиянием собственного веса снежного покрова. Оно интенсивно в начальный период лежания снега, но в конце его практически прекращается. Такие факторы, как ветер, зимние оттепели, жидкие осадки, также способствуют увеличению плотности. Если влияние этих факторов невелико, то плотность снежного покрова перед таянием составляет 250—300 кг/м³. Нижние слои снежного покрова сильнее перекристаллизуются, чем верхние, так как они образуются раньше и находятся при более высоких температурах. Поэтому плотность снежного покрова в целом увеличивается в направлении к поверхности почвы. Однако вследствие образования в снежном покрове уплотненных горизонтов (снежные и ледяные корки и насты) эта закономерность не всегда соблюдается.

Уплотнение и перекристаллизация в снеге тесно связаны друг с другом. Большая пористость вначале создает условия, в равной мере благоприятные для обоих процессов. Однако в дальнейшем перекристаллизация и уплотнение становятся противодействующими друг другу процессами. Антагонизм между уплотнением и сублимационной перекристаллизацией настолько резок, что в условиях, способствующих одному из этих процессов, течение другого процесса может полностью подавляться. В результате из-за различий условий в начальную стадию диагенеза могут возникать противоположные типы развития данного слоя снега или снежного покрова в целом — развитие в сторону уплотнения при преобладании оседания и развитие в сторону разрыхления при преобладании сублимационной перекристаллизации.

Развитие первого типа ведет к быстрому увеличению объемного веса при отсутствии роста зерен, а второго — к быстрому росту размера кристаллов при сохранении начального объемного веса.

Второй тип развития в большинстве случаев заканчивается процессами сублимационного диафтореза¹, который в благоприятных условиях вызывает появление в некоторых слоях так называемого снега-пльвуна — очень хрупкого крупнозернистого снега, обладающего большой вязкостью и слабым сцеплением и переполненного кристаллами глубинной изморози².

3.1.3. Разновидности снега

Мокрый снег, падающий на лицо в теплую погоду.

*Ненецкая поговорка,
означающая верх блаженства*

Перечислим некоторые виды встречающихся в природе типы снежных толщ³.

А. Свежий снег (рыхлый снег) имеет следующие разновидности:

а) сухой свежевыпавший снег, который подразделяется:

1) на порошковидный снег, выпадает или переносится ветром при низких температурах в виде снежных кристаллов или мелких хлопьев;

2) мучнистый снег, выпадает в виде крупы;

3) снег-изморозь, образуется при туманах и оседает на поверхности старого снега рыхлым слоем кристаллической структуры;

4) спрессованный ветром снег, образуется под давлением ветра и обладает значительной плотностью;

б) мокрый свежевыпавший снег (рис. 3.3), который подразделяется:

1) на снег, непосредственно образовавшийся в процессе выпадения крупных хлопьев при высокой температуре;

2) снег в виде вторичного образования из сухого, свежего снега под действием повышения температуры воздуха (солнце, фен, дождь);

Б. Старый снег (фирнообразный снег) и снег-пльвун:

а) фирнообразный снег — старый снег зернистого строения. Отдельные зерна в большей или меньшей степени связаны друг с другом (смерзание);

б) наст; корка крупнозернистого фирна при смене оттаивания и смерзания поверхностного слоя снежного покрова достигает значительной толщины и прочности и выдерживает вес человека;

в) фирновое зеркало;

¹ Быков Н. И., Попов Е. С. Наблюдения за динамикой снежного покрова в ООПТ Алтае-Саянского экорегиона : методическое руководство. Красноярск, 2011.

² Шумский П. А. Основы структурного ледоведения.

³ Вейнберг Б. П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда. М. ; Л. : Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1940.



Рис. 3.3. Пример мокрого свежеснегавшего снега на острове Хоккайдо, Япония

г) мокрый фирнообразный снег, фирновый снег, разрыхленный процессами таяния, размягченный и напитанный водой;

е) снег-пльвун; образуется на значительных глубинах в процессе испарения и перекристаллизации и представляет собой опасную поверхность скольжения для сухого старого снега.

3.1.4. Рельеф снежной поверхности

Снежный покров, являясь аналогом осадочной породы, в значительной мере зависит от поверхности, на которой отлагается; большим разнообразием отличаются и условия, сопровождающие формирование снега, — это в первую очередь ветровые характеристики, температура и влажность воздуха. Слоистость снежного покрова в основном отражает рельеф (рис. 3.4), а не эндогенные процессы, как в большинстве случаев для осадочных горных пород. В результате сочетания перечисленных факторов формируются тела различного строения и формы. Выделяются несколько типов морфологии поверхностей снежного покрова: покров свежееотложенного снега, аккумулятивные формы и дефляционные формы¹.

Покров свежееотложенного снега образуется при интенсивном снегопаде в виде пятен, полос или полей свежего снега.

Аккумулятивные формы подразделяются на свободные аккумулятивные и вынужденные аккумулятивные формы. Свободные ак-

¹ Гляциологический словарь. Л. : Гидрометеоздат, 1984.

кумулятивные формы возникают на выровненных значительных пространствах в виде снежной ряби, гряд, пологовыпуклых бугров, валов, мощных и крутых сугробов. Вынужденные аккумулятивные формы образуются при наличии неровностей на поверхности, при этом формируются движущиеся сугробы, барханы, шлейфы.



Рис. 3.4. Слоистость снежного покрова хорошо проявляется весной, когда при таянии минеральные включения концентрируются (остров Хоккайдо)

Дефляционные формы создаются при отсутствии поступления значительных масс нового снега в процессе преобразования аккумулятивных форм под воздействием сильных ветров во время низовых метелей, когда разрушаются наиболее слабые участки снежного покрова. При этом развиваются новые формы рельефа: заструги, ветровые борозды и поля заструг. Чередование ветров разной силы и направления приводит к формированию ячеисто-бугристого микрорельефа, сложенного снегом разного возраста и структуры.

Лавины являются «движущейся формой» снежного покрова; они представляют собой огромную опасность в горных районах. Так, например, Альпы известны как одно из самых печальных мест, связанных с лавинами. Там произошла, в частности, лавинная катастрофа, в которой пострадали воины легендарной армии Ганнибала: погибли каждый пятый пехотинец, каждый второй всадник и почти все склоны¹. В декабре 1916 г. австрийская армия в Альпах после сильных снегопадов потеряла в лавинах около шести тысяч человек, а потери итальянцев были почти вдвое больше².

¹ Полибий. Всеобщая история / пер. с греч. Ф. Г. Мищенко. Т. 1. Кн. I—V. СПб.: Наука, 2005.

² Каррыев Б. С. Катастрофы в природе: Земля меняет кожу. Лавины, обвалы, оползни, провалы. Издательские решения, 2016.

3.1.5. Проблемы систематизации

Если выделять снежный покров как осадочную породу, следует последовательно придерживаться этого принципа, т. е. нельзя рассматривать его как простую совокупность образований (ледяных кристаллов) с набором характеристик. Разновидности снега образуют естественно-исторические тела, сформированные в определенных условиях, имеющие особые границы и формы, претерпевающие присущие им преобразования, а также имеющие уникальные строение и свойства. Подход к анализу снежного покрова должен быть таким же, как и для генетических типов осадочных отложений с поправкой на большую изменчивость снежного покрова, сезонность его существования и специфическую морфологию (тонкий слой, растянутый по огромной поверхности).

Снежный покров нельзя также рассматривать как однородный слой; он представляет из себя сообщество динамичных криогенных систем, связанных с неоднородностями ландшафтов. Каждое такое сообщество имеет свои условия формирования, динамику и особенности метаморфизма, а также последовательность ветровой, механической и тепловой переработки. Соответственно, индивидуальны и их физико-механические характеристики.

В соответствии с направленностью курса следовало бы выделить и соответствующую иерархию криогенных систем снежного покрова. К сожалению, пока сделать это не представляется возможным, поскольку не разработана типизация снежных образований для крупных регионов. Наметим только общую схему, по которой могла бы быть построена систематизация снежного покрова Земли:

- 1) снежинка или ледяной кристалл; зерно, состоящее из отдельных снежинок или кристаллов;
- 2) слой, соответствующий определенному периоду отложению снега;
- 3) форма рельефа снежного покрова, соответствующая однородным динамическим свойствам периода формирования;
- 4) территориальный тип снежного покрова, соответствующий территориям с однородными поверхностными и микроклиматическими условиями;
- 5) региональный тип, соответствующий тектоническому строению территории, региональным климатическим особенностям и соответственно определенным соотношениям между типами снежных образований;
- 6) зональный тип, отражающий климатическую зональность и выражающийся в соответствующем наборе региональных типов.

3.1.6. Разрушение снежного покрова

Для рассмотрения особенностей разрушения снежного покрова в очередной раз воспользуемся классической работой Б. П. Вейнбер-

га¹. Кроме непосредственного действия теплого воздуха, в процессе разрушения снежного покрова большую роль играет на первых порах солнечная радиация, являющаяся главной причиной образования наста, а затем его разрушения и обычного превращения в щетину более или менее острых ледяных шипов. С течением времени начинает преобладать действие теплого воздуха, особенно ветра, превращающего снежный покров в кашеобразную смесь остатков снежинок и воды.

Из особых явлений при таянии снежного покрова упомянем о *снежницах*, как называют большие массы снега, несомые в весенних водных потоках.

В течение первой половины весеннего таяния снега снизу по высоте располагаются ледяные корки незначительной толщины, далее идет сильно уплотненная и сыроватая масса снега, которая в верхних слоях своего покрова переходит в рыхлую и достаточно пористую снежную массу.

Во второй половине периода весеннего таяния снега над таким слоем начинают течь потоки талой воды, которые при наличии препятствий, например от *снежных заломов*, представляющих собой обвалившиеся части талого слоя, достигают заметной высоты, образуя большой подпор. При достаточно большой мощности этих потоков они приподнимают снежный покров, отламывают от него большие куски — снежницы, а иногда прорывают снежные заломы, препятствующие их движению, и несут части этих заломов и снежницы дальше, пока не упрутся снова в какое-нибудь препятствие и снова не образуют местного наводнения.

3.1.7. Снежники

В случаях, когда создаются условия сохранения снежного покрова в течении теплого времени года, формируются особые криогенные системы — снежники. *Снежниками* называют неподвижные скопления снега, фирна и льда, сохраняющиеся в течение теплого времени года или части его после схода сезонного снежного покрова.

Основными факторами образования снежников служат метелевый перенос снега, способствующий его концентрации в понижениях и затененных, защищенных от ветра местах склона, а также лавины. Формирование снежников связано с условиями рельефа, направлением снеговетровых потоков воздуха, с наличием лотков, по которым сходят лавины. Снежники в горах делят на летние и перелетки; те и другие разделяют по генезису на навейные и лавинные. Иногда встречаются погребенные снежники, прикрытые чехлом склоновых отложений. Толщина сезонных снежников составляет 2—5 м (до 7 м), перелетков — 5—10 м (до 20 м); они состоят большей частью из фирнизированного снега, мелко- и сред-

¹ Вейнберг Б. П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда.

незернистого в первую половину лета, средне- и крупнозернистого во вторую; плотность снега составляет 400—700 кг/м³.

Снежники можно встретить почти повсюду, где формируется устойчивый снежный покров. На равнине они приурочены к оврагам, балкам, береговым уступам, к подножью гряд и холмов, в горных районах — к днищам долин, каров, цирков, трогов, к уступам и к подножью склонов. Снежники, в отличие от снежного покрова, — более устойчивые криогенные системы, они постоянно возобновляются на одних и тех же местах и способствуют формированию особых «нивальных» форм рельефа.

Типизация снежников базируется прежде всего на длительности существования в теплый период времени года. Выделяются следующие типы снежников¹:

- 1) весенний:
 - 1а — ранневесенний (первая половина весны);
 - 1б — поздневесенний (вторая половина весны).
- 2) летний:
 - 2а — раннелетний (первая половина лета);
 - 2б — позднелетний (вторая половина лета).
- 3) снежник-перелеток:
 - 3а — перелетывающий (не менее одного теплого сезона);
 - 3б — многолетний (неопределенно долгое время).

В классификации отражены не только временные аспекты существования снежника, но и его структурно-текстурные особенности, потому что время пребывания в области высоких соответствует наибольшим изменениям в строении такой криогенной системы.

3.1.8. Ледники

Из накапливающегося снега образуются ледники (рис. 3.5) — массы льда, способного перемещаться так же, как река. Перекристаллизация снежинок, давление и их оттаивание с повторным замерзанием постепенно превращают снег в лед — для такого превращения нужны считанные месяцы. Ледники оставили свои следы на большей части поверхности суши и покрывали в недавнем прошлом Северную Америку и Евразию. Причины, по которым возникали огромные по размерам оледенения континентов, до сих пор не вполне ясны.

В ледниках сосредоточено 98 % пресного льда, они покрывают около 11 % поверхности суши. Объем льда всех ледников Земли достигает 26 660 км³; если его распределить равномерно по суше, то она оказалась бы покрыта слоем в 182 м толщиной².

¹ Гляциологический словарь. Л. : Гидрометеиздат, 1984.

² Калесник С. В. Очерки гляциологии. М. : Географиз, 1963; Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / гл. ред. В. М. Котляков. М. : Институт географии РАН, НПП «Картография», 1997.



Рис. 3.5. Ледник на горе Реньер вблизи Сиэтла, США

Трудно переоценить роль этих криогенных систем в истории Земли. Например, сама история развития нашей планеты, особенно в четвертичный период, рассматривается с позиции пульсации ледниковых масс и разделяется на ледниковые и межледниковые эпохи. В прошлом ледники перепахали равнины на несколько метров в глубину, не останавливаясь даже перед гранитными массивами. Они образовали впадины и котловины, превратившиеся в озера и фьорды, и оставили после себя обширные моренные образования. Рассмотрим в общих чертах особенности формирования и строения ледников.

1. Ледник образуется в результате аккумуляции и преобразования твердых атмосферных осадков при их положительном многолетнем балансе. В его строении принимают участие гидрогенные льды, но их роль невелика и они не определяют закономерности развития данных природных образований.

2. Ледник—это континентальное образование, в некоторых случаях ледник распространяется в море, но зарождается всегда на суше.

3. Особенность ледника — его вязкопластическое течение под действием силы тяжести. Ледники, по сути, представляют собой ледниковые потоки (рис. 3.6).

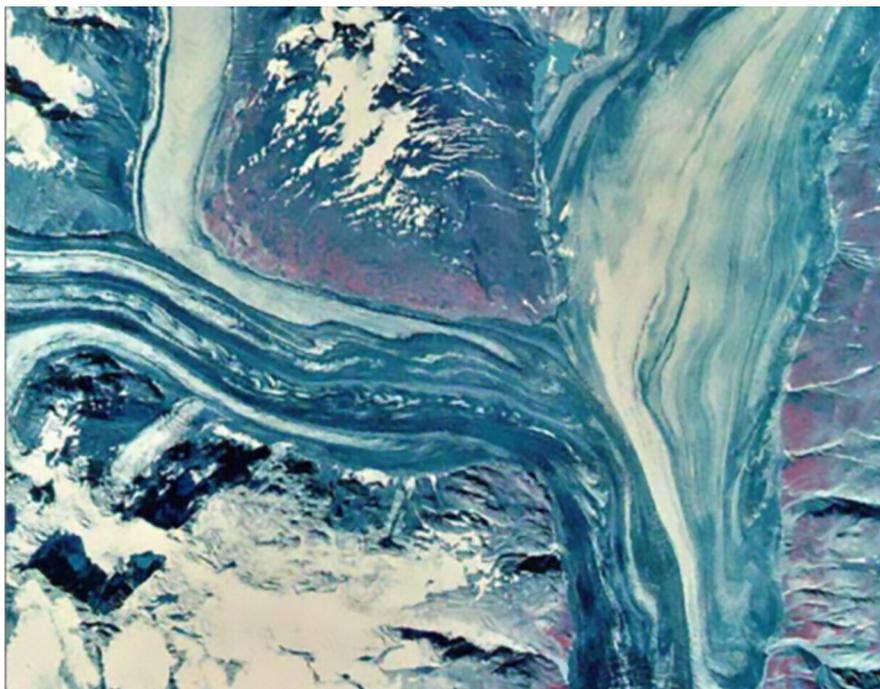


Рис. 3.6. Аэрофотосъемка ледников Маржори и Большого Тихоокеанского (Ледниковый залив, Аляска); снимок Геологической службы США

4. На ледниках выделяются области питания (аккумуляции), где происходит увеличение массы, и расхода (абляции), где происходит уменьшение массы льда.

Ледник для роста должен получать достаточное количество холодного дождя и снега, имеющих своим происхождением океан. И так как над ледником всегда стоит антициклон, то влажный воздух, охлаждаясь, отдает свою влагу. Для Евразийского континента благоприятен для выпадения осадков западный край, откуда идут атлантические циклоны. Поэтому большие ледники прошлого здесь росли к западу, а их восточные края сокращались под действием испарения и солнечной радиации.

Рубежом между ледниками и неледниками является переход от неподвижности к движению. Пока скопление снега неподвижно — это снежник; когда оно приходит в движение, т. е. приобретает новое качество в своем развитии, тогда перед нами ледник; когда ледник в результате деградации прекратит движение — это уже мертвый лед, т. е. бывший ледник¹.

Размеры ледников колеблются в большом диапазоне: от мощной шапки льда площадью в миллионы квадратных километров, закры-

¹ Калесник С. В. Очерки гляциологии.

вающей собой целый материк или громадный остров (Антарктида, Гренландия), до мелких каровых ледников Приполярного Урала, имеющих в длину не более 100—200 м, площадью от десятых и менее частей квадратного километра. Время их существования колеблется от нескольких сотен лет (в случае, если выполнены вышеперечисленные условия) до сотен тысяч и миллионов лет. Движение льда в ледниках осуществляется двумя основными способами:

- 1) путем вязкопластического течения;
- 2) путем глыбового скольжения по ложу и внутреледниковым разрывам и сколам.

Скорость движения льда в ледниках различных размеров и типов колеблется в очень широких пределах. Скорость движения в малых ледниках редко превышает несколько метров в год, в горно-долинных ледниках она колеблется от первых десятков до сотен метров в год. В выводных и шельфовых ледниках Антарктиды скорость движения льда достигает 300—1200 м в год, в концевых частях выводных ледников Гренландии — 10 км в год. При подвижках пульсирующих ледников лед может двигаться со скоростью сотен метров в сутки, проходя за несколько месяцев 8—10 км¹.

С общеклиматической точки зрения для возникновения ледников нужны твердые осадки в течение зимы или круглого года и низкие температуры, особенно летом, чтобы ежегодно мог оставаться слой нарастающего снега.

Ледники зарождаются, достигают своего наибольшего развития, а затем, когда обстановка изменяется, умирают. Американский гляциолог В. Г. Хоббс еще в 1910 г. выдвинул идею эволюции ледников и ввел понятие цикла оледенения (*cycle of glaciation*), подразумевая под этим известную последовательность климатических изменений; цикл оледенения подразделяет на две фазы: прогрессивную (*advancing hemicycle*) и регрессивную (*receding hemicycle*).

Прогрессивная фаза оледенения характеризуется тем, что на определенной территории всё большая площадь последовательно захватывается ледниками. Если местность представляет собой плато, на ней начинается образование ледникового щита, и его развитие сводится к увеличению размеров. Если же местность горная, то зародышевые ледники, возникшие на самых высоких уровнях рельефа, неуклонно превращаются в более крупные ледниковые тела. Ледники вершин и склонов переливаются в долины, образуя долинных ледники; последние, увеличиваясь в размерах, объединяются в верховьях. Концы их, выползая из гор на предгорную равнину, тоже сливаются в огромные ледники горных подножий. В дальнейшем массы льда покрывают горную страну все больше: погребаются подо льдом не только долины и перевалы между ними, но и верши-

¹ Долгушин Л. Д., Осипова Г. В. Ледники. Природа мира. М. : Мысль, 1989.

ны. Только самые высокие из них торчат в одиночку или группами над огромным снежным полем, поверхность которого в сглаженной форме отражает неровности закрытого льдом рельефа. Затем снег хоронит и эти вершины; мощность льда становится больше, чем неровности рельефа, и возникает ледниковый щит с характерной для него равновесной плосковыпуклой поверхностью¹.

Совокупность ледников, объединенных территорией, сходными особенностями взаимодействия с окружающей средой, внутренними взаимосвязями и общими пространственными законами их изменения, образует иерархически организованные ледниковые системы.

Все ледники делятся на покровные, горно-покровные и горные. Каждая из этих основных групп в свою очередь подразделяется на группы второго и третьего порядков. Среди ледниковых покровов различают ледниковые щиты, ледниковые купола, шельфовые ледники, ледяные потоки, выводные ледники. К горно-покровным ледникам относится сетчатое оледенение, где присутствуют в различных комбинациях формы оледенения покровного и горного типов, ледники плато, котловинные ледники и предгорные ледники. Горные ледники делятся на три основные группы: ледники долин, ледники склонов, ледники вершин. Ледники долин подразделяются на простые долинные, сложные долинные и дендритовые ледники. К ледникам склонов относят присклоновые, склоновые, висячие и каровые ледники. Промежуточное положение между каровыми и долинными ледниками занимают карово-долинные. Среди ледников вершин выделяют ледники конических вершин и ледники плоских вершин. К ледникам вершин относят также ледники вулканических конусов, кратерные и кальдерные ледники, ледники барранкосов (рис. 3.7).

Важно выделение теплых (с ложем при положительной температуре) и холодных (на ложе которых вечная мерзлота) ледников², значительно различающихся по свойствам и воздействию на геологическую среду.

В развитии ледниковых систем можно выделить несколько стадий:

- 1) развиваются отдельные ледниковые тела, усложняется их строение, при этом сохраняется их индивидуальность;
- 2) ледники сливаются в системы, при этом стираются индивидуальные черты и жизнь отдельных компонентов зависит от жизни остальных;
- 3) при слиянии таких систем образуются ледниковые щиты.

¹ Калесник С. В. Очерки гляциологии.

² Мачерет Ю. Я. и др. Распределение холодного и теплого льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) по данным наземного радиозондирования // Лед и снег. 2019. Т. 59 (2). С. 149—166.

Развитие ледниковых систем в зависимости от климатических условий может остановиться на любой стадии.

Регрессивная фаза оледенения характеризуется отмиранием ледниковых покровов. В зависимости от конкретной географической обстановки это происходит по-разному. В одних случаях ледниковый щит, сохраняя долгое время способность к движению, просто сокращается в размерах по направлению от краев к центру, в силу того что абляция на краях оказывается сильнее, чем приток льда из области питания. В других случаях ледниковые покровы умирают, становясь тоньше одновременно и в центре, и по краям.

При отступании ледник до определенного времени сохраняет свой тип, пока не подойдет к стадии распада. Тогда, став неустойчивым, он быстро расчлняется на несколько ледников, каждый из которых отступает на горный склон, приобретая вновь состояние устойчивости. Когда оно сменяется новым состоянием неустойчивости, это приводит к полному уничтожению образовавшихся нескольких ледников. В эпоху сокращения оледенения состояния ледников меняются скачкообразно: от одной устойчивой формы они скачком переходят через промежуточную неустойчивую форму к низшей устойчивой форме. Этим и объясняются преобладание устойчивых форм и редкая встречаемость неустойчивых форм, потому что через последнюю ледники проходят очень быстро¹.

В период деградации ледник вместе с климатом может испытывать обратимые колебания и в определенных пределах, увеличиваясь и уменьшаясь, существовать достаточно длительное время. Однако существует предел уменьшения размеров; по достижении критической величины ледник разрушается необратимо.

Закономерности развития ледниковых систем базируются на их структурных изменениях. Движение в леднике происходит под действием силы тяжести от мест с большим давлением в места с меньшим; это перераспределение в свою очередь обусловлено неравномерным накоплением снега. Внутренние силы, препятствующие смещению, слагаются из сил сцепления и трения внутри кристаллической решетки ледяных кристаллов, межкристаллических связей и связей с жидкими прослойками и включениями. Они зависят от изменения температуры, фазового состава, пористости миграции вещества и внутренних источников выделения или поглощения энергии. В зависимости от термодинамических условий, и в первую очередь от напряжений и температуры, в теле ледника происходят деформации.

Деформации начинаются при весьма малых напряжениях сдвига (предел такого напряжения до сих пор точно не установлен) и проявляются в вязких смещениях по базисным плоскостям в ре-

¹ Калесник С. В. Очерки гляциологии.

шетке кристалла без нарушения его ориентировки. Дальнейшее повышение напряжения сдвига приводит к медленному течению поликристаллического льда и сопровождается упорядоченностью ориентировки главных кристаллографических осей, ростом кристаллических зерен и миграционной рекристаллизацией¹. Следующий этап увеличения напряжений сопровождается ростом поверхности раздела, вызванным распадом наиболее напряженных зерен, первичной рекристаллизации и ускорением течения.

Возрастание напряжений проходит поэтапно; наступают следующие стадии деформации, разрушения и превращений с нарастающим скоростью движения: скручивание кристаллов и кристаллических зерен, уменьшение размеров кристаллов, распад и дезориентация их, образование разрывов и сколов, смещение кристаллов относительно друг друга и, наконец, при достаточно большой нормальной нагрузке и относительно высокой температуре происходит частичное таяние. Увеличение напряжений и продолжительность их действия сопровождаются различными деформациями льда — от вязкого течения до хрупкого разрушения². Таким образом, можно засвидетельствовать, что развитие гигантских криогенных систем, включая материковое оледенение Антарктиды, определяется, по существу, поведением кристалла льда. На примере возникновения, развития и разрушения ледников, очевидно, проявляется внутреннее единство организации криогенных систем.

3.2. Граница «гидросфера — атмосфера»

В первой теме курса были рассмотрено формирование кристаллов льда в воде; они, однако, не могут существовать длительное время в толще воды и всплывают на поверхность. Присутствие отдельных кристаллов в воде не играет заметной роли в природных процессах; положение, однако, меняется, когда на границе гидросферы и атмосферы формируется сплошной ледяной покров³. В этом случае резко меняется теплообмен между двумя геосферами на больших территориях, что оказывает значительное влияние на природу Земли. Ледяные покровы являются сезонными криогенными системами, имеющими сложное строение и претерпевающими несколько закономерно сменяющихся этапов развития; они не сводятся к соединению отдельных составляющих (кристаллов льда).

¹ Шумский П. А. Механизм деформирования и перекристаллизации льда // Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. Сб. 2. М. : Изд-во АН СССР, 1961.

² Савельев Б. А. Физика, химия, и строение природных льдов и мерзлых горных пород.

³ Тышко К. П., Черепанов Н. В., Федотов В. И. Кристаллическое строение морского ледяного покрова. СПб. : Гидрометеиздат, 2000.

3.2.1. Процессы, развивающиеся на границе

В среднем около 0,003 % ($4 \cdot 10^{13}$ т) воды Мирового океана и поверхностных водоемов находится в твердом состоянии. Основной составляющей льдов гидросферы является морской ледяной покров¹, площадь которого в течение года изменяется от $28 \cdot 10^6$ км² в сентябре-октябре до $18 \cdot 10^6$ км² в марте, причем если в Северном полушарии площадь ледяного покрова в этом интервале времени возрастает от $9 \cdot 10^6$ до $16,5 \cdot 10^6$ км², то в Южном полушарии она уменьшается от $18 \cdot 10^6$ до $2,5 \cdot 10^6$ км². На южных окраинах арктических морей ежегодно может нарастать и таять до 2 м льда, тогда как в центральной части Северного Ледовитого океана за лето оттаивает² в среднем лишь около 0,5 м. В прибрежной зоне Антарктиды формирование ледяного покрова начинается в марте и продвигается на север со скоростью около 4,2 км/сут. В период максимума распространения, в сентябре-октябре, средняя толщина покрова составляет 1,5 м, а суммарный объем антарктических морских льдов достигает $3 \cdot 10^4$ км³.

Охлаждение поверхностного слоя воды до точки фазового перехода, переохлаждение его и зарождение льда могут происходить при адвекции холодных воздушных масс, а также в результате интенсивного испарения и радиационного охлаждения спокойной поверхности воды во время ночного понижения температуры³.

Н. Н. Зубовым еще в 1938 г. дано детальное описание формирования первичного слоя льда на поверхности моря⁴, которым мы воспользуемся.

Образование льда начинается после того, как поверхностный слой воды охладится до температуры замерзания, и весьма ускоряется, если при этом выпадает хотя бы небольшой снег. Отсутствие волнения также ускоряет льдообразование⁵.

При спокойном состоянии моря и отсутствии ветра на поверхности моря образуются мелкие кристаллы в виде ледяных игл, распространяющихся во все стороны и переплетающихся друг с другом. Эти первичные образования постепенно разрастаются, сростаются и образуют на поверхности моря пятна налета, по виду напоминающего застывающее сало (рис. 3.8), а потому и называемого *ледяным салом* (*grease*).

¹ Деев М. Г. Ледяной покров Арктики и его устойчивость // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2011. № 3. С. 52—58.

² Купецкий В. Н. Ледяной покров // Советская Арктика. М.: Наука, 1970; Деев М. Г. Ледяной покров Арктики и его устойчивость.

³ Matishov G. G. et al. Complex Studies of the Azov, Black, and Caspian Seas Performed on the Deneb Survey Vessel in 2007 // Oceanology. 2009. Vol. 2. P. 290—295.

⁴ Зубов Н. Н. Морские воды и льды. М., 1938.

⁵ Тышко К. П., Черепанов Н. В., Федотов В. И. Кристаллическое строение морского ледяного покрова.



Рис. 3.8. Ледяное сало на Мойке в г. Санкт-Петербурге¹

Сало, обычно темно-свинцового цвета, мало отличающегося от цвета воды в облачную погоду, по своему внешнему виду напоминает мелко истертый лед, смешанный со снегом. Всего нескольких часов при нескольких градусах мороза достаточно, чтобы ледяное сало распространилось на всю охватываемую глазом площадь. Еще через несколько часов поверхность моря покрывается молодым льдом.

¹ Фото: «Питер Решает»/Иван Мясников. URL: https://piter.tv/event/V_Peterburge_voda_v_Mojke_pokrilas_strannimi_razvodami_0 (дата обращения: 17.11.2020).

Следствием образования сала является уничтожение на поверхности спокойного или взволнованного моря ветровой ряби. При ветре и сильном волнении сало сбивается в куски белесоватого цвета, называемые шугой.

Шуга — скопления рыхлого губчатого льда в водной толще или на поверхности водоема, которые образуются главным образом из кристалликов глубинного (внутриводного и донного) льда.

При дальнейшем охлаждении и совершенно спокойном состоянии моря вся его поверхность покрывается тонкой блестящей коркой, иногда называемой *склянкой* или ледяной коркой. Склянка характерна для хорошо закрытых бухт и небольших пространств чистой воды между отдельными льдами, особенно при условии, что тонкий поверхностный слой сильно распреснен.

Типичный вид молодого льда — *нилас* (рис. 3.9), или тонкий эластичный лед толщиной до 10 см, легко прогибающийся на волне и зыби, который разделяют на темный нилас толщиной до 5 см и светлый нилас толщиной от 5 до 10 см. Словарь Даля образно определяет нилас как тонкий осенний лед, который носит и крошит по зимью в море и в устьях рек.

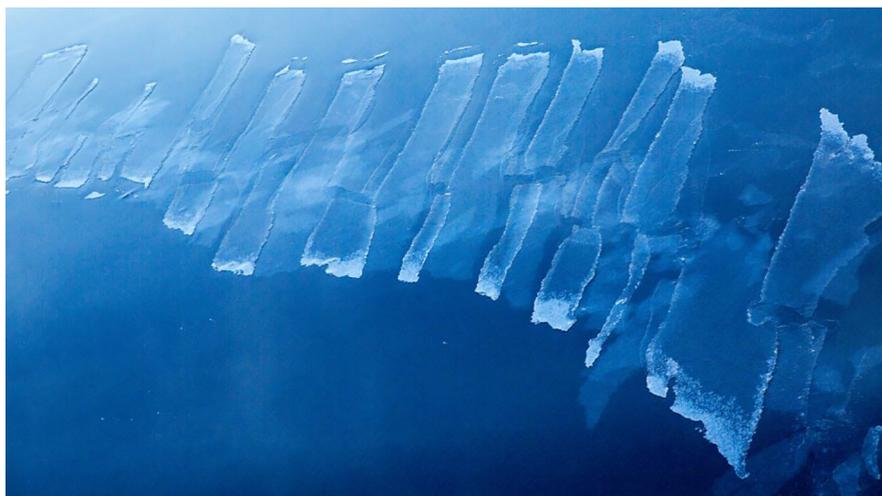


Рис. 3.9. Молодой тонкий лед — нилас толщиной до 10 см¹

При легком волнении льдообразование исходит иногда как бы из многих центров, и тогда образуются диски диаметром от 30 см до 3 м, толщиной до 10—15 см, с приподнятыми краями вследствие удара льдин одна о другую. Это так называемый *блинчатый лед*, являющийся наиболее распространенной начальной фор-

¹ Фото Р. Юд (R. Youd). URL: <http://www.antarctica.gov.au/about-antarctica/environment/sea-ice/development-of-sea-ice> (дата обращения: 17.11.2020).

мой льда в море. Характерным для блинчатого льда является то, что его диски имеют по краю небольшой валик, как следствие трения одного диска о другой, что придает последним вид плоских сковородок. Крупные диски представляют собой спаянность более мелких начальных дисков. Таким образом, путем спаивания диски блинчатого льда могут достигать диаметра до 2 м. Дальнейшее охлаждение влечет за собой утолщение и смерзание друг с другом, диски блинчатого льда образуют в конце концов более или менее обширные поля сплошного молодого льда, причем валики на их краях высотой 1—2 см, которые выглядят еще белее, чем сами диски, придают поверхности замерзающего моря вид, как будто бы оно покрыто белой сеткой¹ (Тышко и др, 2000).

Различают также *серый лед* — молодой лед толщиной 10—15 см (обычно при сжатиях серый лед наслаивается), *серо-белый лед* — молодой лед толщиной 15—30 см (в отличие от серого льда при сжатиях серо-белый лед обычно торосится). *Торосом* (*ice hummock*) называют форму ледового рельефа, или нагромождение льдин, образующееся в результате сжатия ледяных полей, а также их давления на берега и на мелководные участки дна (рис. 3.10). Высота тороса достигает 10—20 м.

Выпадение снега на поверхность моря всегда ускоряет льдообразование. Поверхностный слой при этом опресняется, охлаждается, и, кроме того, в воду добавляются ядра кристаллизации. При выпадении снега на поверхность моря, температура которой ниже нуля, снег не тает, а образует мягкую тестообразную массу, называемую *снежурой*. Снежура даже при высоких температурах воздуха вызывает в ближайших охлажденных слоях воды образование ледяных игл. При волнении и ветре снежура, подобно шуге, сбивается в полосы, состоящие из снежных комков, пропитанных морской водой. При дальнейшем замерзании моря полосы снежуры резко отличаются по своему виду и белому цвету от расположенного вокруг них льда, образовавшегося из морской воды.

В отдельных случаях льдообразование начинается не на поверхности моря, а на глубине — возникает глубинный лед, а иногда, в мелководных районах и даже на дне моря — донный лед. Когда лед, образовавшийся на глубине, достигает определенных размеров, он всплывает на поверхность моря в виде шуги и включается в молодой лед.

Льдообразование в большинстве случаев начинается от берега и от отдельных льдин и кромки и постепенно распространяется в море. Поэтому обычно можно проследить все стадии образования льда одновременно.

¹ Тышко К. П., Черепанов Н. В., Федотов В. И. Кристаллическое строение морского ледяного покрова.



Рис. 3.10. Торосы¹

Верхняя поверхность молодого льда в большинстве случаев гладкая или слегка волнистая. Нижняя в период льдообразования, наоборот, очень неровна и в некоторых случаях похожа на щетку из ледяных кристаллов. Непосредственно под нижней поверхностью молодого льда при его толщине 2—3 см располагается слой морской воды толщиной 10 см и более, насыщенный ледяными кристаллами, которые постепенно прирастают ко льду снизу и таким образом увеличивают его толщину.

На разных этапах формирования лед по-разному взаимодействует с водной поверхностью. Сало совершенно уничтожает ветровую рябь на поверхности моря. Шуга, снежура и блинчатый лед уничтожают второстепенные ветровые волны, а очень крупные волны при распространении вглубь таких льдов постепенно приобретают вид мертвой зыби. Замечательно, что эластичность и пластичность молодого морского льда (ниласа) настолько велики, что при толщине до 10 см он изгибается по форме зыби, но не трескается.

Морской лед, развивающийся из молодого льда и просуществовавший не более одной зимы, называется *однолетним*². Толщина его — от 30 см до 2 м и более. Может быть подразделен на тонкий

¹ URL: [https://www.memotest.ru/test?testId=13945&cardId=112371&_escaped_fragment_](https://www.memotest.ru/test?testId=13945&cardId=112371&_escaped_fragment_=) (дата обращения: 17.11.2020).

² Тышко К. П., Черепанов Н. В., Федотов В. И. Кристаллическое строение морского ледяного покрова.

однолетний лед (30—70 см), однолетний лед средней толщины (70—120 см) и толстый однолетний лед (более 120 см).

После того как поверхность моря покрывается сплошным ледяным покровом, дальнейшее нарастание льда снизу идет уже исключительно за счет теплопроводности через лед и покрывающий его снежный покров и лучше поддается расчету. Этот слой льда является своего рода переходным слоем. Он сам развивается благодаря взаимодействию многих поверхностных факторов — температуры, ветрового перемешивания, волнения. Влияние переходного слоя на нижние горизонты льда сказывается в виде развития зоны льда геометрического отбора, описанной Шумским¹. Продолжающееся нарастание снизу приводит к образованию ледяного покрова, достигающего в полярных районах толщины 2—3 м.

Ледяные образования, которые имеют в п оперечнике не менее 2 км, называются *ледяными полями*. Под действием ветра, течений и термического расширения льда образуются полосы сжатия и нагромождения ледяных обломков — торосы (см. рис. 3.10). При сжатии и торошении могут возникать многослойные льды мощностью до 10 м. Последней, завершающей формой ледяных покровов являются многолетние *паковые льды* (*pack* — «множество», «масса»). Их формирование обусловлено рядом процессов, таких как естественное намерзание снизу, увеличение толщины льда благодаря торошению, смерзание отдельных льдин и полей, таяние снизу и сверху в летний период. Толщина паковых льдов колеблется в пределах² 3—20 м.

На мелководье возникают *стамухи* — торосистые образования, сидящие на грунте или на мели и образующиеся из остатков торосистого берегового припая, из несяков и торосистых льдин, севших на грунт. У берегов образуется *припай* — неподвижный лед, скрепленный с берегом ледяной стеной или ледяным барьером, испытывающий небольшие вертикальные колебания и горизонтальные смещения. Он образуется путем естественного примерзания к берегу формирующегося ледяного покрова в прибрежной зоне или путем примерзания части дрейфующего льда к берегу³.

Рассмотренные материалы показывают разнообразие процессов, развивающихся на границе гидросферы и криосферы. Нужно отметить, что важным и определяющим саму возможность развития ледового покрова является теплообмен между водой и атмосферой. Именно благодаря ему создаются переохлаждение, необходимое для начала льдообразования, а также условия для дальнейшего разви-

¹ Шумский П. А. Основы структурного ледоведения.

² Савельев Б. А. Строение состав и свойства ледяного покрова морских и пресных водоемов. М. : Изд-во МГУ, 1963.

³ Тышко К. П., Черепанов Н. В., Федотов В. И. Кристаллическое строение морского ледяного покрова.

тия толщи льда. В общем виде развитие сезонного слоя льда от возникновения до разрушения можно представить в виде закономерно сменяющих друг друга пяти стадий².

1. Первая стадия (объемного роста) относится к периоду образования первичного слоя льда. На первом этапе льдообразования, при малой толщине ледяного покрова градиенты температуры могут достигать $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$. Переохлаждение воды (ΔT) у фронта кристаллизации оказывается заметным ($\Delta T > 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) и охватывает слой воды толщиной до 5 мм. При таких условиях от поверхностных кристаллов в слой переохлажденной воды разрастаются дендритные выросты в направлениях, параллельных базисным плоскостям.

Характерной особенностью строения поверхностных слоев является быстрое изменение размеров кристаллов по толщине ледяного покрова. Разрастание одних и выклинивание других первичных кристаллов, возникновение новых кристаллов вследствие критического рассогласования кластеров, встраивающихся в дендриты, взаимопроникновение и деформация дендритов ведут, с одной стороны, к усложнению формы кристаллов, с другой — к проявлению в структуре льда столбчатости, удлиненности кристаллов в направлении роста. Этот поверхностный, 1—2-сантиметровый слой ледяного покрова можно охарактеризовать как горизонт «объемной» кристаллизации, или горизонт дендритного роста. Разрастание лучей-дендритов в пределах слоя происходит со скоростью до $10^{-2}\text{ см}/\text{с}$ при средней скорости роста кристаллов 10^{-4} — $10^{-3}\text{ см}/\text{с}$. Разрастание и взаимопроникновение лучевых отростков ведут к формированию ажурной ледяной решетки, которая после замерзания межскелетной воды превращается в ледяную корку, сложенную хаотично ориентированными удлиненными кристаллами, аллотриоморфными и гипидиоморфными. Обычно формирование этого горизонта завершается через несколько часов после возникновения поверхностного слоя льда.

2. Во второй период происходит замедление роста ледяного покрова, наступает вторая стадия развития ледового покрова (ортотропного роста)¹. При толщине ледяного покрова 3—10 см и термических условиях, характерных для начала зимнего периода ($-5\dots-15\text{ }^{\circ}\text{C}$), градиент температуры во льду снижается до $1\text{—}5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$, переохлаждение воды перед фронтом кристаллизации — до $0,02\text{—}0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, а дендритный механизм роста кристаллов сменяется на сплошной. Быстрый рост кристаллов, ориентированных базисными плоскостями субвертикально к поверхности льда (параллельно теплотокну), при таком переохлаждении ведет к выдвиганию их вперед и боковому разрастанию выдвинувшейся части. Эта часть ледяного покрова сложена обычно длиннопризма-

¹ Шумский П. А. Основы структурного ледоведения.

тическими кристаллами более или менее идиоморфных очертаний. Кристаллы, ориентированные базисными плоскостями параллельно параллельно поверхности льда, выклиниваются. Средняя скорость роста кристаллов в этой части ледяного покрова составляет около 10^{-4} см/с, толщина горизонта может достигать 10—15 см, а время его формирования занимает около суток.

При дальнейшем увеличении толщины льда и отложении снежного покрова градиент температуры снижается до 0,1—0,5 °С/см, переохлаждение воды у фронта кристаллизации — до 0,001—0,01 °С, а скорость роста — до 10^{-5} см/с. На этом этапе развития ведущим фактором формирования структуры ледяного покрова становится анизотропия теплопроводности льда. Лучший отвод тепла от поверхности роста происходит через кристаллы, ориентированные базисными плоскостями перпендикулярно теплоток (параллельно поверхности льда). Это дает им преимущество в росте, и они выдвигаются вперед, вытесняя кристаллы с другой ориентировкой. Эта часть ледяного покрова формируется льдом, сложенным длиннопризматическими кристаллами, одни из которых постепенно разрастаются, а другие выклиниваются. Характерными особенностями этого горизонта ледяного покрова являются низкое содержание примесей, прозрачность, идиоморфные очертания кристаллов и преобладание кристаллов с вертикальной ориентацией главных оптических осей. Формирование горизонта продолжается до тех пор, пока градиент температуры в ледяном покрове остается менее 0,5 °С/см, а на внешней поверхности ледяного покрова существуют условия, обеспечивающие отвод тепла кристаллизации.

Свежеобразовавшийся лед первое время испытывает непрерывные структурные изменения (первичный диагенез). Они обусловлены релаксацией структурного несовершенства зерен, неравновесных по концентрации дефектов различных типов к новому термодинамическому состоянию. Процесс рекристаллизации идет в широком диапазоне температуры, однако с наибольшей интенсивностью «первичный диагенез» льда развивается в зоне, прилегающей к границе раздела фаз, при температуре, близкой к точке фазового перехода. Выделение энергии «первичного диагенеза», которая по сути является составной частью общей энергии фазового перехода и может достигать 40 Дж/м³, ведет к изменению профиля температуры в пределах этой узкой зоны ледяного покрова и к уменьшению переохлаждения воды на фронте кристаллизации. В зависимости от температуры и давления процесс релаксации может длиться часы, дни, месяцы. В течение этого времени изменяются механические, электрические, химические и другие свойства льда¹.

¹ Шавлов А. В. Лед при структурных превращениях. Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996.

3. Третий период — самый короткий в истории развития ледовой толщи. Он характеризуется отсутствием прироста льда и соответствует установлению теплового баланса.

4. На четвертой стадии начинается таяние сверху, а в морском льду в это время происходит нарастание льда снизу, за счет намерзания стекающий вниз талой более пресной воды.

5. На пятой стадии происходит полное разрушение льда, т. е. таяние сверху и снизу и нарушение межкристаллических связей внутри ледяного массива. Кроме того, в результате поглощения лучистой энергии льдом и действия тепловых потоков в ледяном покрове начинаются процессы объемного таяния.

Термическое разрушение льда так же, как и его формирование, является многоступенчатым процессом. По данным Н. Н. Зубова¹, таяние морского льда в Арктике делится на несколько стадий.

1. Первой стадией считается возникновение внутренних деформаций после того, как температуры, достигнув своего минимума при формировании льда, начинают повышаться. Эти внутренние деформации сопровождаются нисходящим движением рассола и увеличением пористости льда.

2. С появлением солнца над горизонтом на поверхности снега развивается ледяная корка, под которой начинается накопление солнечной радиации.

3. При дальнейшем увеличении высоты солнца над горизонтом и создании суточного хода температуры воздуха начинаются уплотнение снежного покрова, оплавление резких выступающих частей льдин и развитие термических трещин.

4. Весной с усилением инсоляции и с выпадением дождей прежде всего начинает таять снег на льду, и ледяной покров покрывается иногда слоем воды — снежицы. Одновременно идет опреснение льда за счет вымывания рассола.

5. После развития проталин, трещин и пор начинается уход снежной воды под лед с образованием подледного льда. Ледяной покров всплывает и осушается, причем он становится пористым и сильно ослабевает,

6. Начинается разлом льда протаявших полей льда на более мелкие части, идет увеличение трещин, под действием течения, волнения или ветра лед превращается из сплошного в крупно- и мелкобитый плавучий лед. Происходят округление и измельчение образовавшихся обломков льда.

Процесс от появления снежицы до вскрытия продолжается от нескольких суток до месяца и более — в зависимости от климатических условий места и от погоды.

7. Последней стадией разрушения является распадение льдов на отдельные (ледяные иглы и округлые льдышки).

¹ Зубов Н. Н. Морские воды и льды. М., 1938.

Следует отметить, что разрушение льда, достигшего температуры таяния, начинается во всей его толще¹. Поскольку в ледяном покрове всякого водоема, даже с весьма мало минерализованной водой, кристаллы отделены друг от друга тончайшими прослойками растворов солей, выделившимися при замерзании, благодаря более низкой температуре плавления этих прослоек таяние начинается именно с них. При этом около прослоек образуются полости с пониженным давлением (вследствие разности объемов льда и талой воды). Вакуум полостей очень невелик, однако он все же достаточен для того, чтобы способствовать проникновению в толщу льда воздуха, постепенно вытягиваемого из атмосферы, что значительно увеличивает общее содержание полостей во льде. Лед мутнеет и становится рыхлым. Такие полости таяния — прожилки — нередко соединяются между собой тонкими полостями и образуют цепочки. Диаметр их обычно колеблется от 0,1 мм или менее до примерно 1 мм. Увеличиваясь, они переходят в каналы диаметром от 1 до 5 мм и более, а при дальнейшем их увеличении кристаллы льда теряют связь и распадаются.

Чем спокойнее и правильнее происходит процесс кристаллизации при образовании ледяного покрова, тем отчетливее его разрушение — распадание на иглы (отдельные кристаллы), которые затем тают каждая сама по себе. Такое распадание наблюдается в реках и пресных озерах повсеместно, а иногда сопровождается характерным шелестящим звуком — льды как будто тихонько поют.

3.2.2. Структурно-генетическая классификация льда

В структурно-генетической классификации льды природных водоемов по условиям ледообразования и солёности воды подразделяются на четыре основные группы (классификация Н. В. Черепанова)²:

- 1) группа А — льды, образующиеся в пресной или сильно распресненной (солёность менее 2,0 ‰) воде (рис. 3.11);
- 2) группа Б — льды, образующиеся в распресненной (солёность от 2,0 до 24,7 ‰) воде;
- 3) группа В — льды, образующиеся в морской воде (солёность более 24,7 ‰) (рис. 3.12);
- 4) группа Г — льды, претерпевшие термодинамические преобразования в процессе своего существования и развития.

Льды группы А.

Тип льда А1. Ледообразование происходит при устойчивой температурной стратификации в приледном слое воды. Кристаллизация осуществляется при небольшом переохлаждении поверхностного слоя воды, что стимулирует развитие крупных скелетных кристаллов. Текстура монолитная.

¹ Вейнберг Б. П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда.

² Черепанов Н. В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 77—99.

Тип льда А2. Образуется в пресных и сильно распресненных водоемах при сохранении в приледном слое воды небольшого температурного градиента 0,2—0,5 °С/м и наличии первичного слоя льда неориентированной мелкозернистой структуры.

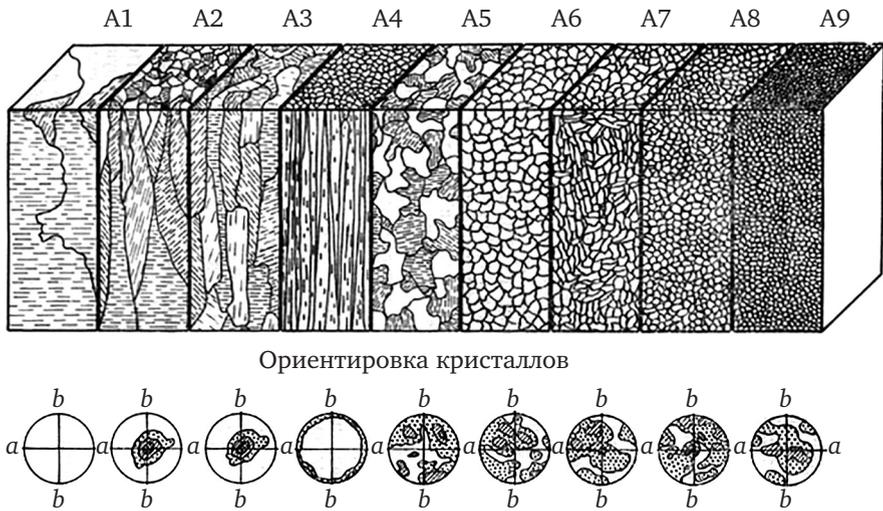


Рис. 3.11. Основные типы пресноводных льдов (группа А) по классификации Н. В. Черепанова¹

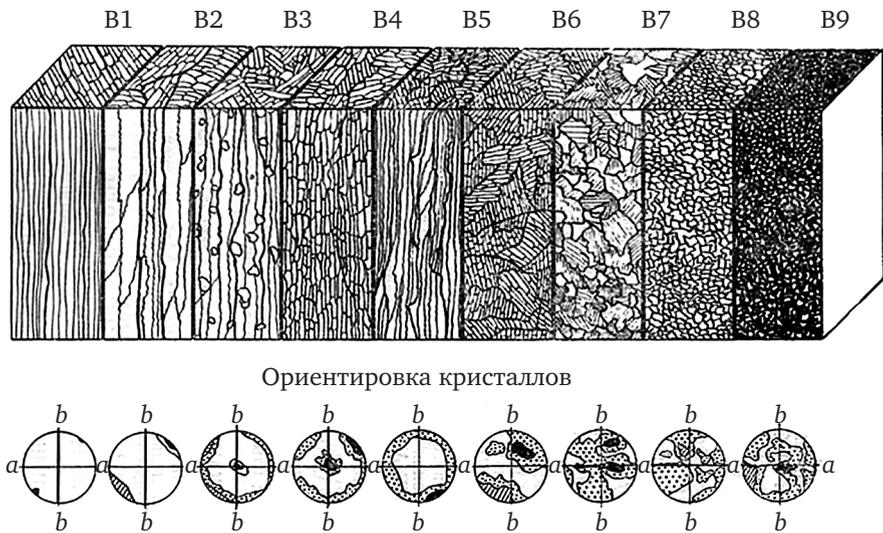


Рис. 3.12. Основные типы морских льдов (группа В) по классификации Н. В. Черепанова²

¹ Черепанов Н. В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331.

² Там же.

Тип льда А3. Образование этого типа льда происходит при ритмическом нарушении термических условий в приледном слое воды. Характер роста кристаллов определяется периодическим изменением температурного градиента при условии, что приледный слой воды охлажден до температуры замерзания. В расположении включений часто проявляется слоистость. Кристаллы развиты вертикально, форма их преимущественно столбчатая, иногда близкая к изометрической.

Тип льда А4. Этот тип льда образуется при гомотермическом состоянии приледного слоя воды и наличии на ее поверхности большого количества центров кристаллизации (элементы внутриводного льда, снежные зерна и т. д.). Образуется на всех пресноводных водоемах, которые к моменту ледообразования теряют свой теплозапас. Лед полупрозрачен, имеет волокнистую текстуру. Включения в основном в виде небольших трубчатых пор диаметром 0,2—2,0 мм. Распространены также мелкие пузырьки сферической или овальной формы, расположенные преимущественно в виде вертикальных цепочек по границам кристаллов.

Тип льда А5. Образование происходит в условиях непрерывного нарушения температурной стратификации приледного слоя воды и нерегулярном заносе к фронту кристаллизации кристаллов внутриводного льда. Текстура льда, как правило, имеет четко выраженную слоистость, где прозрачные и полупрозрачные слои сменяют друг друга. Структура крупнокристаллическая, кристаллы изометрические или с небольшим вертикальным развитием.

Тип льда А6. Образуется в водоемах при устойчивом охлаждении приледного слоя воды до температуры замерзания или при ее переохлаждении, способствующем протокристаллизации — возникновению у фронта кристаллизации вторичных микроскопических кристалликов, нарушающих ориентированный рост кристаллов. Кристаллы овальной изометрической формы, чаще всего хаотическая. По физическим свойствам лед изотропен.

Тип льда А7. Лед формируется на глубоководных участках рек из кристаллов внутриводного льда, развивающегося в толще воды. Необходимым условием образования этого льда является наличие открытых участков воды (польшей). Кристаллы имеют сложную, часто пластинчатую, форму, характеризуются развитием в базисной плоскости. Лед имеет слоистую текстуру и белесый цвет. Характерна их концентрация в виде «гнезд».

Тип льда А8. Образование этого типа льда происходит при смерзании плотных скоплений снежуры и шуги в период осеннего ледообразования при интенсивном ветровом перемешивании поверхностных слоев воды. Текстура мелкопузыристая. Из-за большого количества включений (3—4 балла) лед имеет молочный цвет. Структура мелкокристаллическая. Форма преимущественно изометрическая, иногда встречаются пластинчатые кристаллы.

Тип льда А9. Образуется в результате инфильтрационного ледообразования при смерзании снега, пропитанного водой. Лед имеет ярко выраженный молочный цвет и пузыристую текстуру. При недостаточном увлажнении структура такого льда близка к агломератной, характеризующейся неплотной цементацией кристаллов.

Льды группы Б.

В водоемах с соленостью воды 2,0—24,7 ‰ формирующийся ледяной покров по кристаллической структуре несколько отличается от пресных и морских льдов. Основной особенностью его строения является значительное многообразие различных кристаллических форм. Для этих льдов характерно развитие сравнительно небольших кристаллов как изометрической, так и пластинчатой формы, что приводит к формированию льдов с призматическими и волокнистыми структурами. Типы образующегося льда в большей мере соответствуют типам льда группы А.

Льды группы В.

Тип льда В1. Образование льда этого типа происходит при стабильном ориентированном росте кристаллов, устойчивом гомотермическом состоянии приледного слоя воды и хорошо развитой вертикальной конвекции. Лед имеет волокнистую текстуру и серый цвет из-за довольно большого количества мелких (0,1—0,5 мм) солевых и воздушных включений (2—3 балла), расположенных правильными вертикальными цепочками. Кристаллы состоят из отдельных волокон.

Тип льда В2. Образуется при небольших нарушениях стабильности ориентированного роста кристаллов в гомотермических условиях приледного слоя, обусловленных смещением (дрейфом) льда, а также резкими колебаниями температуры приледного слоя воды и его солености. Этот тип льда имеет наиболее широкое распространение при конжеляционном ледообразовании. В основном это обширные ровные поля дрейфующих льдов в Арктике и часть припая Антарктики. Отличается сложной ветвистой системой расположения первичных солевых и воздушных включений, а также более ветвистой сетью вторичных включений. Этот тип льда имеет волокнистое строение.

Тип льда В3. Этот тип льда формируется в зимний период в результате интенсивного замерзания морской воды при наличии на поверхности водоема большого количества кристаллических зародышей. Цвет льда серый с матовым оттенком, текстура волокнистая. Солевые и воздушные включения встречаются преимущественно в виде мелких сферических пузырьков с диаметром 0,2—0,5 мм и мелких капиллярных пор. Структура льда мелковолокнистая. Сечение волокон составляет 0,2—0,8 мм. Длина волокон достигает 120 мм. Ориентировка кристаллов поясная.

Тип льда В4. Образование льда этого типа наблюдается при нарушении стабильного роста волокнистых кристаллов вследствие поступления к фронту кристаллизации мелкозернистых изометриче-

ских кристаллов внутриводного льда. Эти структуры характерны для дрейфующих льдов Арктики (в зоне интенсивных подвижек) и припая (зоны стационарных полыней). Широко распространены в Антарктике. Текстура льда волокнистая, цвет светло-серый. Для льда этого типа характерны два вида кристаллов: волокна, как у льда типа В2, и изометрические кристаллы-вкрапленники сечением 3—10 мм, расположенные хаотически или образующие скопления на отдельных горизонтах.

Тип льда В5. Лед этого типа образуется при нарушении ориентированного роста волокнистых кристаллов вследствие поступления к фронту кристаллизации мелкозернистых изометрических кристаллов внутриводного льда, количество которого составляет более 25 %. Так же как и во льду типа В4, в нем развиты два вида кристаллов: изометрические, занимающие более 50 % площади среза, и волокнистые, образующие своеобразный скелет кристаллов и отличающиеся характерной горизонтальной ориентировкой.

Тип льда В6. Этот тип льда появляется при замерзании морских водоемов с резко меняющимся гидрологическим режимом — большими изменениями в скорости и направлении течений, резкими колебаниями температуры и солености воды. Образуется в окраинных морях, проливах и районах, прилегающих к устьевым участкам рек. Отличительной особенностью этого вида льда является слоистое строение как в текстуре, так и в кристаллической структуре, при котором светло-серые слои с матовым оттенком сменяются ярко-белыми. Содержит большое количество различных по форме и размеру воздушных и солевых включений. Структура льда, как правило, разнотекстурированная, кристаллы разнообразны по форме.

Тип льда В7. Лед формируется при сильном ветровом перемешивании на мелководных участках моря, сопровождающимся интенсивным образованием шугового, внутриводного и донного льда, который распространяется под ледяным покровом в виде значительных слоев шугообразной массы, толщина которых иногда достигает нескольких метров. Лед имеет светло-молочный или светло-желтый цвет от обилия воздушных и солевых включений). Распределение включений неравномерное, иногда слоистое. Структура мелко- и среднетекстурированная, неравномернозернистая. Форма кристаллов большей частью неправильная. Ориентировка хаотическая.

Тип льда В8. Этот тип льда формируется при смерзании зерен снега и мелких кристалликов внутриводного льда в морской воде. Распространен повсеместно в морских водоемах, особенно широко в водах Антарктики, где составляет до 30—40 % всего объема морских льдов. Текстура льда мелкопузыристая. Много мельчайших включений размером 0,05—0,10 мм. Цвет льда молочно-белый с матовым оттенком. Структура мелкозернистая, размеры кристаллов, форма изометрическая, часто проявляется гипидиоморфность. Ориентировка кристаллов хаотическая.

Тип льда В9. Лед образуется в процессе постепенной инфильтрации морской воды, выступающей на поверхность льда под тяжестью снега (недостаточное насыщение). Наиболее распространен в Антарктике, где составляет до 30 % объема морских льдов. В Арктике этот тип льда образуется главным образом в торосистых участках, где происходит обильное накопление снега. Лед имеет пузыристую, часто слоистую текстуру. Размеры включений изменяются в широком диапазоне: от 0,1—0,5 мм (мелкие полости) до 10—20 мм (крупные полости). Форма их ветвистая. Цвет белый. Ориентировка кристаллов хаотическая.

Льды группы Г.

Тип льда Г1. Этот тип льда образуется при длительном существовании ледяного покрова, главным образом при собирательной кристаллизации, проявляющейся в перемещении границ между соприкасающимися кристаллами. Развивается в многолетнем льду ниже слоя активного радиационного разрушения (слоя деструкции). Лед имеет светло-серый или белесый цвет и слабо выраженную волокнистую текстуру с преобладанием вторичных включений. Распределение включений неравномерное. Иногда наблюдается слоистость. Форма кристаллов сложная. Размеры кристаллов неоднородны и тесно связаны с первичной структурой, преобразование которой ведет не только к изометричности, но и к увеличению их размеров и общему уменьшению количества включений.

Тип льда Г2. Этот тип льда образуется в результате преобразования льдов волокнистой структуры типа В2, В3 в процессе избирательного радиационного таяния и повторного замерзания межкристаллических прослоек, интенсивного опреснения и заполнения их талой водой. Развита эта прослойка преимущественно в двухлетних дрейфующих арктических льдах и антарктическом припае. Текстура льда пузыристая, лед полупрозрачный, серого цвета. По происхождению включения вторичные, возникают при замещении рассола воздухом в стоковых руслах и канальцах. Структура льда волокнистая, кристаллы-волокна имеют извилистую поверхность, за счет расчленения волокон уменьшаются их вертикальные размеры. Первичная поясная ориентировка кристаллов преобразуется в наклонную или даже хаотическую.

Тип льда Г3. Лед формируется в результате преобразования льдов зернистой структуры под действием радиационного таяния и повторного смерзания межкристаллических прослоек и режеляционной перекристаллизации. Распространен в поверхностном деятельном слое многолетних льдов. Встречается преимущественно в Арктике. Лед белого цвета имеет крупнопузыристую текстуру. Включения разнообразны по размеру и форме. Преобладают сложные ветвистые пузырьки, расположенные преимущественно по границам кристаллов. Структура льда разнотекстурированная, кристал-

лы в основном сложной изометрической формы с большим коэффициентом извилистости поверхности граней.

Тип льда Г4. Лед образуется при собирательной режеляционной перекристаллизации в сочетании с инфильтрационным ледообразованием при метаморфизме снежного покрова на льду в весенне-летний период. Распространен преимущественно на многолетних льдах в Арктике. Лед имеет ярко выраженный молочный цвет и пузыристую текстуру. Преобладают сферические формы включений. Располагаясь по границам кристаллов, они хорошо выявляют его зернистое строение¹.

3.3. Граница «литосфера — гидросфера»

Граница литосферы и гидросферы скрыта от взгляда исследователя; кроме того, это весьма динамичная область. Поэтому криогенные системы, приуроченные к границе суши и водоемов, наименее исследованы. Важна прежде область границы водоемов, где вода находится в жидком состоянии, и горных пород, находящихся хотя бы непродолжительное время при отрицательной температуре. Здесь тепломассообмен между гидросферой и литосферой протекает на фоне развития геологических процессов. Рассматриваемая зона состоит из двух подзон: первая приурочена непосредственно к границе раздела воды и горных пород; вторую составляет часть литосферы, примыкающая к водоему.

3.3.1. Донные льды

Прежде всего рассмотрим так называемые *донные льды*, которые представляют собой ледяные образования, формирующиеся на поверхности морского дна и проникающие в верхнюю часть осадков¹. Подводные съемки показывают, что кристаллы льда, растающие в водонасыщенные осадки, занимают огромные участки дна. Иногда донные льды образуют массивные ледяные скопления, смерзшиеся с дном; при всплытии они могут поднимать на поверхность камни больших размеров. Ледяные пластинчатые кристаллы, образующиеся на морском дне, формируют живописные образования, похожие на растительный покров. Ледяные пластины прорастают в глубь увлажненных осадков, что позволяет им надежно скрепляться с грунтом.

Кристаллы донного льда в большинстве скелетные по типу роста и пластинчатые по форме. Пластинки располагаются под различными углами и образуют сростки разнообразной формы и размеров. Как правило, величина пластинок не превышает 4—5 см, а срост-

¹ Черепанов Н. В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331..

ков — 20—30 см. Иногда донный лед нарастает на дне сплошным покровом толщиной до 1,5 м.

Н. Н. Зубов¹ приводит многочисленные данные о формировании донных льдов и в более теплых морях. Образование и всплытие донного льда наблюдается, например, в Азовском море и Днепро-Бугском лимане, при этом необязательно формирование поверхностных льдов. Известны случаи, когда в начале зимы в Балтийском море корабли оказывались окруженными льдом, внезапно поднявшимся со дна моря, что доказывалось песком и придонными предметами, всплывавшими вместе со льдом. Донный лед у скалистых берегов Гренландии, Шпицбергена, Лабрадора часто поднимает с собой на поверхность моря обломки камней и грунта. У берегов Ньюфаунленда донный лед встречается на глубинах 20—30 м. В Гудзоновом заливе отмечен вынос на поверхность моря донным льдом ящика с инструментами, принадлежащего судну, погибшему много лет назад в нескольких сотнях миль к северу от места находки. Внезапное появление больших масс глубинного льда отмечалось и в центральной части Северного Ледовитого океана. Так, во время экспедиции на «Фраме» Ф. Нансен наблюдал это явление к северу от Новосибирских островов.

Всплывая, глыбы многолетнего донного льда могут поднимать на поверхность не только рыхлые донные отложения, но и морские организмы, развившиеся на нем за время его подводного существования. Донные льды формируются не только в полярных морях, но и в пресноводных водоемах. Их существование непродолжительно, потому что донные льды легко разрушаются под действием движения воды или вытаивают. В полярных морских бассейнах, где температура воды имеет отрицательные значения, создаются условия сохранения донных льдов при погребении их осадками.

3.3.2. Консервация поверхностных льдов в субаквальных осадках

Отрицательные температуры в арктических морских бассейнах создают возможность сохранения ледяных тел, сформировавшихся в субаэральных условиях и погребенных в морские осадки. Для современных условий этот процесс можно показать на примере образования стамух.

Стамухи представляют собой торосистые образования динамического происхождения, формирующиеся в результате ветрового воздействия и развития сил сжатия морского льда на отмелях, банках и рифах при глубинах моря, не превышающих обычно 20 м. Плавающий торосистый лед, попадая на мелководные участки моря, смерзается с донными осадками, становится неподвижным и превращается в стамухи. Длина стамух изменяется от 50 до 4750 м, ширина —

¹ Зубов Н. Н. Морские воды и льды.

от 20 до 3500 м и высота — от 3 до 20 м. Большинство стамух в течение летнего сезона разрушаются, но среди них встречаются и многолетние. Данных по температурному режиму под стамухами нет, но если судить по температурам на границе многолетних льдов (при их толщине 8 м), которая в течение года изменялась от $-2,4^{\circ}\text{C}$ (июнь 1957 г.) до $-3,8^{\circ}\text{C}$ (апрель 1958 г.)¹, донные осадки могут промерзнуть и сохранять часть ледяного массива, погруженного в грунт. При образовании стамух плавучие льды выплывают морское дно на глубинах в десятки метров и могут частично погребаться. Аналогичные процессы могут приводить к захоронению плавучих айсбергов и формированию крупных массивов льда в морских осадках.

Таким образом, для объяснения многочисленных находок пластовых льдов нет никакой необходимости разрабатывать модели грандиозных покровных оледенений. Нужны лишь естественные «ловушки», где бы айсберги могли осесть на дно. Следовательно, существование льда как осадочной горной породы не только не противоречит морскому арктическому криолитогенезу, а, напротив, вытекает из него.

3.3.3. Формирование криогенных систем в субаквальных осадках

Субаквальные криогенные геосистемы начинают устойчиво формироваться с момента смерзания покровных льдов (припайных льдов) с донными осадками. Пресноводные водоемы имеют положительную температуру, в них сезонное промерзание не приводит к развитию многолетнемерзлых пород. Поэтому на границе пресноводных водоемов и литосферы формирование устойчивых криогенных систем невозможно. Воды полярных морских бассейнов имеют отрицательную температуру поэтому осадки попадают в среду, благоприятную для формирования криогенных геосистем.

Область распространения отрицательнотемпературных осадочных толщ морского генезиса (субаквальные и субаэральные толщи) должна рассматриваться, как единая, закономерно построенная природная система. Ее существование обусловлено устойчивым и долговременным взаимодействием океанической области осадконакопления и океанического полярного климата². 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. Она развивается в субаквальных условиях, но в результате многократных колебаний уровня моря и локальных

¹ Жигарев Л. А. Океанический криолитогенез. М. : Изд-во МГУ, 1997.

² Хименков А. Н. Формирование криогенного строения морских отложений : автореф. дис. ... канд. геолого-минералогических наук. М. : ПНИИИС ГОССТРОЯ СССР, 1985; Хименков А. Н., Брушков А. В. Океанический криолитогенез. М. : Наука, 2003.

тектонических движений, 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, промерзнуть, частично оттаивать, вновь переходить в субаквальное состояние.

Особенность формирования криогенных геосистем в морских осадках связана с переходом от глубоководных условий седиментогенеза к мелководным, а затем к субаэральным. При этом развитие мерзлых 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.

3.3.4. Стадии океанического криолитогенеза

1. Стадия первичного океанического криолитогенеза. Накоплению осадочных толщ в арктических бассейнах и их преобразованию процессами диагенеза соответствует этап первичного океанического криолитогенеза¹. На данной стадии происходит первичное накопление морских осадков. При этом процессы седиментогенеза и криогенеза протекают одновременно. Формирующиеся криогенные толщи представляют собой неконсолидированные, отрицательно-температурные и содержащие лед осадки, в которых протекают диагенетические процессы и наблюдается активная жизнедеятельность, присущая данным осадкам биоценозов. Мощность слоя субаквальных осадков, где активно может протекать первичный субаквальный океанический криолитогенез, составляет около нескольких десятков метров.

Наиболее существенной характеристикой данного этапа является то, что он осуществляется в узком температурном диапазоне от 0 до $-1,8$ °С. Данный температурный режим устойчиво поддерживается за счет саморегуляции на протяжении сотен тысяч, а может и миллионов лет. Под первичным океаническим криолитогенезом

¹ Хименков А. Н., Брушков А. В. Океанический криолитогенез.

мы понимаем совокупность криогенных процессов, развивающихся одновременно с накоплением морских осадков и их диагенетическим преобразованием на глубинах 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 характеризуются рыхлостью и пластичностью сложения, большой обводненностью, обогащенностью микроорганизмами и неуравновешенностью физико-химической системы в целом.

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 ее в свободную. Таким образом, совокупность процессов диагенеза приводит к выделению в осадочной толще локальных очагов свободной опресненной 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 счет промерзания выделившихся при диагенезе опресненных поровых вод. Это связано со следующими причинами. Не формируется четко выраженного фронта промерзания. При незначительных температурных градиентах в субаквальных толщах и минерализации порового раствора центры льдообразования будут рассеяны в толще осадков. Кристаллизация приведет к увеличению минерализации у растущей поверхности льда (поскольку лед всегда более пресный, чем исходный раствор), что вызовет остановку дальнейшего роста кристаллов. При структурировании илов соли из поровых растворов переходят в минеральные частицы, за счет чего и опресняется выделившаяся вода, но при этом засоленность минеральных частиц увеличивается. Поскольку минимальная температура придонных вод не может быть ниже $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а часто бывает и выше, то она не обеспечит промерзание глинистых илов и они останутся неконсолидированными.

Породы, соответствующие первичному океаническому криолитогенезу, выделяются как криодиагенетические¹. Они представляют собой отрицательнотемпературные, неконсолидированные субаквальные осадки, содержащие лед, в которых не прерываются диагенетические преобразования, жизнедеятельность присущих им биоценозов, миграция поровых вод, минералообразование. Их отличие от «тради-

¹ Хименков А. Н., Брушков А. В. Океанический криолитогенез.

ционных» мерзлых пород в том, что все они не связаны с фактором промерзания, определяемым внешним источником охлаждения, т. е. непосредственным теплообменом с атмосферой. Ледообразование в толще субаквальных осадков происходит за счет внутренних причин, обусловленных особенностями развития области морского субаквального полярного седиментогенеза и диагенеза, и ограничено ими.

Уже на стадии первичного океанического криолитогенеза формирование многолетнемерзлых морских пород обусловлено перераспределением водных, газовых флюидов формирующихся в среде с отрицательной температурой¹.

2. Регрессивная стадия. Эта стадия развития океанического криолитогенеза соответствует условиям перехода морских криогенных геосистем, сформировавшихся в условиях первичного океанического глубоководного криолитогенеза, к прибрежным мелководным условиям. С момента смерзания морских осадков с припайным льдом на них накладывается мощное зимнее охлаждение, и с этого момента, собственно, и начинается формирование многолетнемерзлых пород в привычном понимании.

У берегов арктических морей, в зимний период на мелководье, в зоне смерзания припайного льда с грунтом в зависимости от глубины формируются сезонномерзлые и многолетнемерзлые породы, которые в виде «kozyрька» выступают в море на сотни метров. Для района побережья моря Лаптевых при мощности припайного льда 0,4—0,6 м мощность СМС составляла 1,8—2,0 м, при толщине льда 1,8 м уменьшалась до 0,5 м, а при большей толщине СМС не формировался. Для Баренцева моря границей формирования СМС является изобата² 1 м.

В зависимости от среднегодовых температур воздуха глубина моря, с которой начинают формироваться многолетнемерзлые породы, будет меняться. При температурах $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже мерзлые породы начинают формироваться начиная с глубины около 1,5 м. При повышении среднегодовых температур необходимая глубина моря уменьшается, а начиная со среднегодовых температур воздуха $-5\text{...}-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ мерзлые отложения в субаквальных условиях не развиваются.

На участках образования припайных льдов, а также при глубинах моря, ненамного превышающих их мощность, наблюдаются криогенные процессы, связанные с концентрацией солей в толще осадков и придонных слоях воды. Эти процессы связаны с отжатием солей при формировании ледяного покрова. В целом по мере уменьшения слоя воды между припайным льдом и дном засоленность верхнего слоя донных осадков увеличивается.

¹ *Хименков А. Н.* Переходные зоны в системе криолитогенеза // Материалы международной конференции «Экстремальные криосферные явления: фундаментальные и прикладные аспекты. Пушино, 2002.

² *Жигарев Л. А.* Океанический криолитогенез.

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

Большинство исследователей, занимавшихся полевыми исследованиями криогенного строения современных субаквальных отложений, придерживаются мнения, что при формировании криотестур в данных условиях роль процессов миграции связанной воды незначительна, а роль процессов, связанных с перераспределением свободной воды, наоборот, велика.

Для мерзлых толщ морских осадков, промерзающих в субаквальном состоянии, характерно широкое распространение горизонтов высокоминерализованных вод с отрицательной температурой (*криопэггов*). Криопэги, как правило, не приурочены к какой-либо глубине, и минерализация в них колеблется в больших диапазонах, но в целом минерализации вод в криопэгах находится в диапазоне равновесных значений, соответствующих разбросу температур грунтов. При формировании мерзлоты в песчаных осадках перед фронтом промерзания формируется зона повышенной минерализации. Это связано с тем, что лед более пресный, чем исходный раствор. Когда минерализация грунтового раствора достигнет равновесной для данной температуры), льдообразование в этом месте прекращается и начинается ниже, там, где возможно его продолжение. Таким образом, незамерзший водный горизонт оказывается зажатым между мерзлыми слоями.

Мелководную прибрежную зону следует выделять в виде самостоятельной криогенной области — переходной зоны. Основанием для такого выделения является сочетание в переходной зоне двух типов криолитогенеза. Здесь, на мелководье арктических морей формируются, особые мерзлые толщ. Особенностью их строения является значительная дифференциация в цементации льдом. Здесь соседствуют прочные мерзлые породы, полностью сцементированные льдом, с текучими осадками, где наблюдаются отдельные кристаллы льда или их нет вообще. Переслаиваются напорные водоносные горизонты с минерализованными водами и льдистые водонепроницаемые слои. При этом вся толща может иметь отрицательные температуры¹.

4. Стадия перекрытия многолетнемерзлых пород морскими водами с отрицательной температурой. Эта стадия (трансгрессив-

¹ Хименков А. Н., Шешин Ю. Б. Геокриологические условия побережья Карского моря в районе пос. Амдерма // Инженерная геология. 1992. № 2. С. 71—82.

ная) связана с вторичным переходом мерзлых морских толщ в субаквальное состояние. При этом развивается совокупность термоденудационных процессов, обусловленных перестройкой параметров мерзлых 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 стадии первичного океанического криолитогенеза.

В последние годы значительную роль в выявлении мерзлых пород на шельфе играют геофизические исследования. На шельфе Печорского, Карского, Лаптевых, Чукотского морей с помощью геофизических исследований зафиксирован высокоомный слой (рис. 3.13, 3.14). Данные бурения позволяют утверждать, что высокоомный слой является слоем многолетнемерзлых пород.

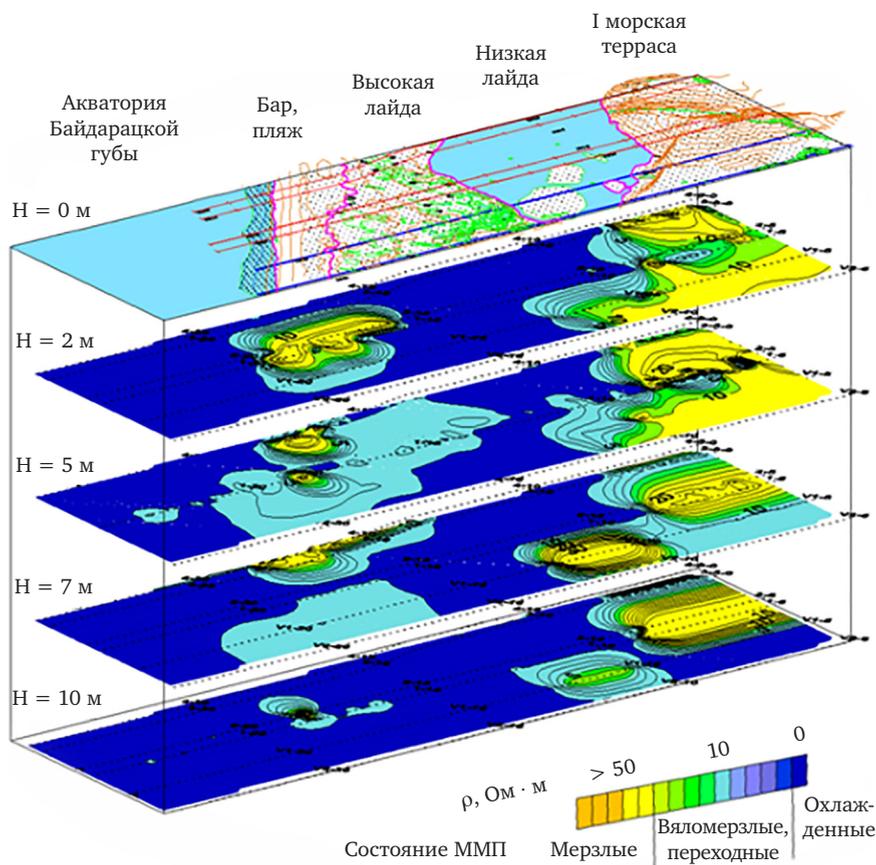
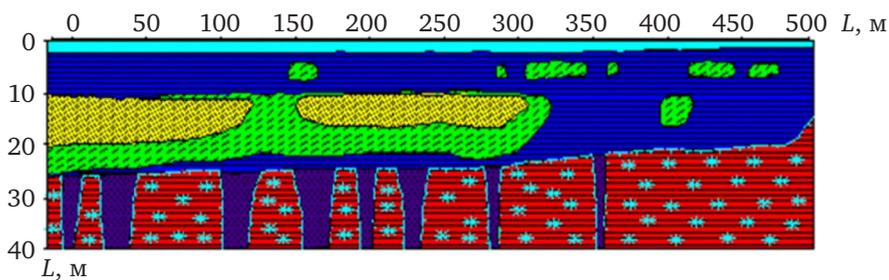


Рис. 3.13. Особенности строения криолитозны в районе Байдарацкой губы (схема А. В. Кошурникова)



Геоэлектрический разрез по данным ЧЗ + ЗСБ профиль 9

Рис. 3.14. Результаты геофизических исследований на Уральском берегу перехода газопроводом Бованенково — Ухта через Байдарацкую губу (материалы А. В. Кошурникова)

- — менее 1 Ом · м (пески, содержащие сильноминерализованные воды);
- — 1—2 Ом · м (глины, суглинки);
- — 3—4 Ом · м (супеси, переслаивание супесей и песков);
- — 5—7 Ом · м (песок пылеватый);
- граница многолетнемерзлых пород;
- — вода; ■ — мерзлые породы (более 10 Ом · м)

3.3.5. Газонасыщенные и газодинамические криогенные геосистемы шельфа арктических морей

Многолетними комплексными исследованиями дна морей установлено широкое распространение газонасыщенных грунтов в придонной части осадочного чехла. В обзорной статье¹ С. Г. Миронюк и В. П. Отто, систематизируя данные об особенностях строения и распространения субаквальных газонасыщенных морских осадков, указывают, что важнейшей геологической особенностью верхних горизонтов субмаринной части литосферы является широкое распространение газосодержащих грунтов.

Выделяются следующие элементы геосистемы газонасыщенных морских осадков²:

- газ (биогенный, термогенный и биогенно-термогенный). В осадках (породах) он находится в виде пузырьков, окруженных водой (кристаллами льда, соли), в растворенном (в поровом пространстве) или в свободном виде, а также в твердом состоянии (газогидраты);
- осадки, включающие минеральные и органические компоненты, а также соли и воду;

¹ 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.

² Миронюк С. Г., Отто В. П. Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов; Хименков А. Н., Станиловская Ю. В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера.

— газовыделяющие структуры (зоны генерации): поверхностные газогенерирующие осадки (биогенный газ), глубинные газогенерирующие породы (катагенный газ), гидратосодержащие породы;

— газовые потоки в осадочной толще (зоны танзита): газовые «трубы» («столбы», «колонны»);

— газовые ловушки (зоны накопления газа), газогидратные толщи, газовые карманы, обширные скопления свободного газа в приповерхностных осадках под региональными флюидоупорами, в том числе под подводными реликтовыми многолетнемерзлыми породами, так называемые газовые фронты¹, дома (невысокие придонные купольные структуры), купола газового вспучивания, трещины растяжения²;

— линейные флюидопроводящие структуры на донной поверхности (зоны тектонических разломов, трещины, борозды выпахивания айсбергов (плугмарки))³.

В порах грунтов газ содержится в свободном (в виде пузырей), адсорбированном, защемленном и растворенном состоянии. В морских осадках газовая компонента представлена в основном метаном, углекислым газом, сероводородом, кислородом, азотом. Данные компьютерной томографии кернов показали наличие в толще осадка многочисленных полых трещин субвертикальной ориентировки, обусловленных дегазацией осадка (рис. 3.15).

В пределах мелководных областей Арктических морей газонасыщение новейших отложений произошло, вероятно, в результате деградации многолетнемерзлых пород под воздействием трансгрессии современного морского бассейна. После перемещения в подводное состояние температура многолетнемерзлых пород повышается, оставаясь в основном в пределах отрицательных значений. Повышение температуры до положительных значений вызвало резкую активизацию процессов разложения погребенного 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. 3.16). Стабильность газовых газогидратов, широко распространенных в морских породах в субаквальное состояние нарушается раньше, чем начинается таяние

¹ Шахова Н. Е. Метан в морях Восточной Арктики : Автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. М. : ИО РАН, 2010.

² Андреев В. М., Туголесов Д. Д., Хренов С. Н. Грязевые вулканы и нефтегазопроявления российского сектора Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 2. С. 50—59.

³ Лобковский Л. И. и др. О процессах газовой выделении и деградации подводных многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 283—290.

мерзлоты, в результате чего формируется газовый фронт, стремящийся к восходящему движению¹.

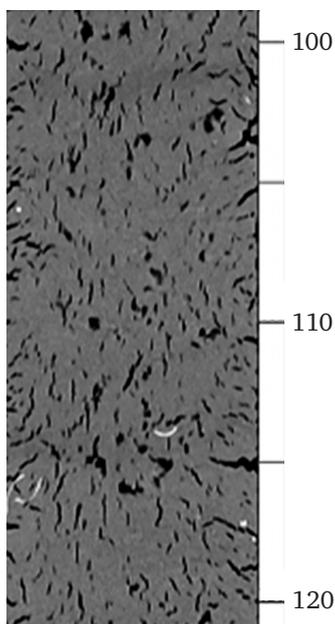


Рис. 3.15. Фрагмент рентгеноплотностного среза²:

■ — осадок; ■ — трещины, обусловленные дегазацией осадка (глубина 100—120 см)

На мелководных участках шельфа (глубинах менее 60 м) выброс метана из разрушающихся газогидратов может иметь характер мощной пузырьковой эмиссии в форме факелов (рис. 3.17).

Часто в морских осадках при геофизических исследованиях наблюдаются узкие субвертикальные зоны, которые интерпретируются как зоны трещиноватости пород, представляющие собой каналы вертикальной миграции газа и жидкого флюида к поверхности из глубоких горизонтов. Они образуются в случае прохождения зоны трещиноватости через проницаемые породы происходит их насыщение (горизонтальная миграция флюида в проницаемые породы).

По результатам геоэлектрических и сейсмических исследований, проведенных «МГУ-геофизика» областях, обнаружены узкие зоны вертикальной миграции газа из нижележащих слоев (рис. 3.18).

¹ 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.

² Токарев М. Ю. и др. 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.

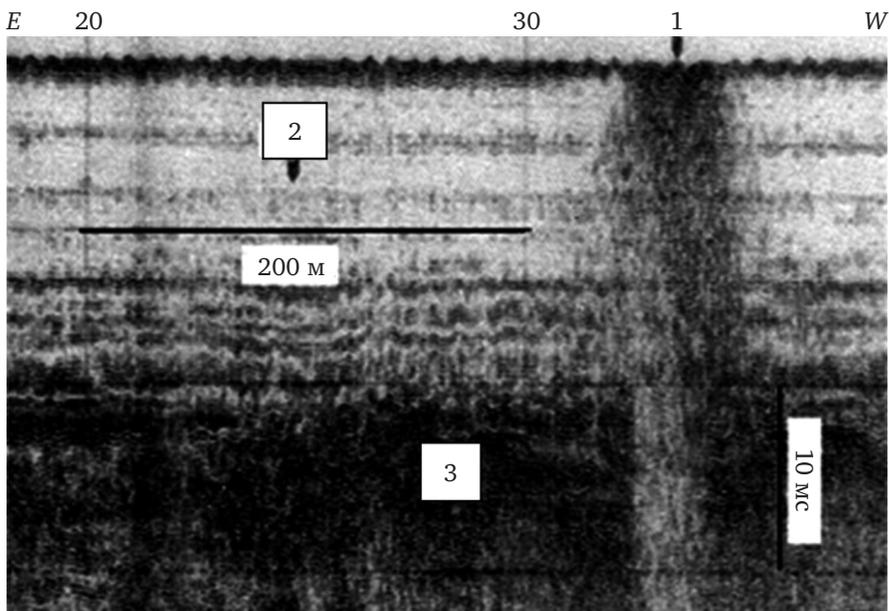


Рис. 3.16. Локальные скопления газа в толще современных аллювиально-морских осадков на сонограмме гидролокации бокового обзора¹:

1 — выход газа на поверхность дна, 2 — современные прибрежно-морские осадки, 3 — доголоценовые газонасыщенные породы

Газ находящийся в осадочных морских толщах находится под большим давлением (до 2,5 МПа). В результате деформаций осадочной толщи скоплением газа с аномально высоким пластовым давлением. Формируются диапироподобные образования, представленные высокольдистыми мерзлыми породами подстилаются тальми осадками насыщенные газом с аномально высоким давлением (см. рис. 3.19). Высокое давление приводит к выжиманию мерзлых отложений к поверхности дна. При этом в первую очередь мобилизуются наиболее льдистые разности, обладающие относительно высокой пластичностью². В качестве примера подобных структур приведем результаты исследования морсеого дна в восточной части Печорского моря (объект «Диапиры»).

Здесь на поверхности дна широко развиты изометричные в плане диапироподобные поднятия с относительным превышением до 30—50 м при ширине основания до 70—100 м (рис. 3.19). На сводах этих поднятий, при глубине менее 0,5 м ниже дна, бурением

¹ 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.

² Бондарев В. Н. и др. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочно-чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 587—598.

были вскрыты мерзлые льдистые грунты (льдистость достигает 80—95 %). Мощность мерзлоты составляет около 100 м. На участках между поднятиями также распространены мерзлые льдистые отложения. Здесь их кровля залегает на глубине около 20—30 м. В процессе бурения скважины, пробуренной на участке между диапироподобными поднятиями, на глубине 49,5 м ниже поверхности дна произошел мощный выброс газо-водяной смеси. Высота фонтана достигала более 10 м. Вокруг бурового судна образовался «котел кипения» диаметром около 150—200 м, внутри которого наблюдалось бурление воды с пузырьками газа и взвешенными грунтовыми частицами¹.

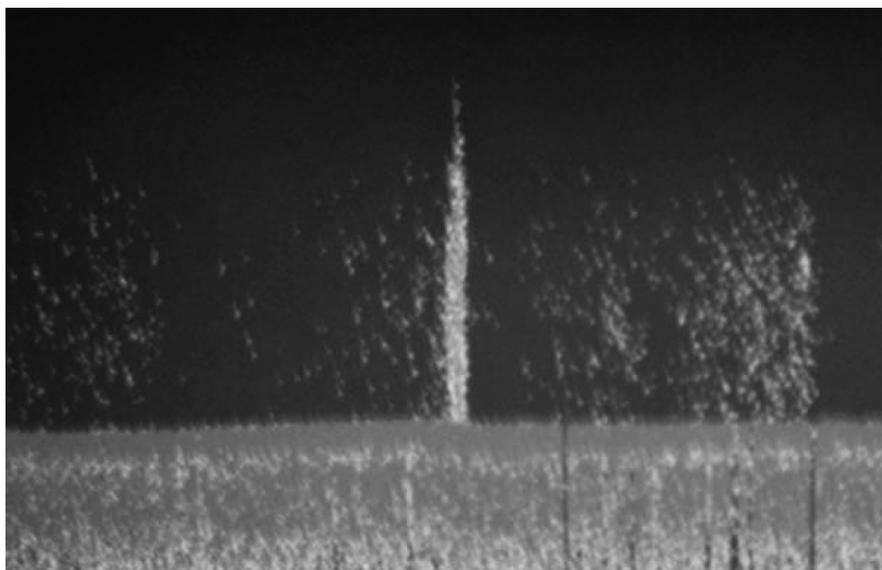


Рис.3.17. Метановый факел, зарегистрированный с помощью эхолота в центральной части моря Лаптевых в сентябре 2007 г.²

На полученных временных разрезах локальные поднятия поверхности морского дна представляют собой диапироподобные структуры, прорывающие и деформирующие покров вышележащих осадков.

Батиметрические исследования, проведенные в **Море Бофорта**, показали существование глубинах 10—20 м большого количества бугров высотой до 18 м, окруженных понижениями (рис. 3.20, 3.21). Данные образования аналогичны обнаруженных российскими исследователями на шельфе арктических морей РФ (см. рис. 3.19).

¹ Рокос С. И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа : автореф. дис. ... кандидата геолого-минералогических наук. Мурманск : Мурманский морской биологический институт, 2009.

² Шахова Н. Е., Сергиенко В. И., Семилетов И. П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана.

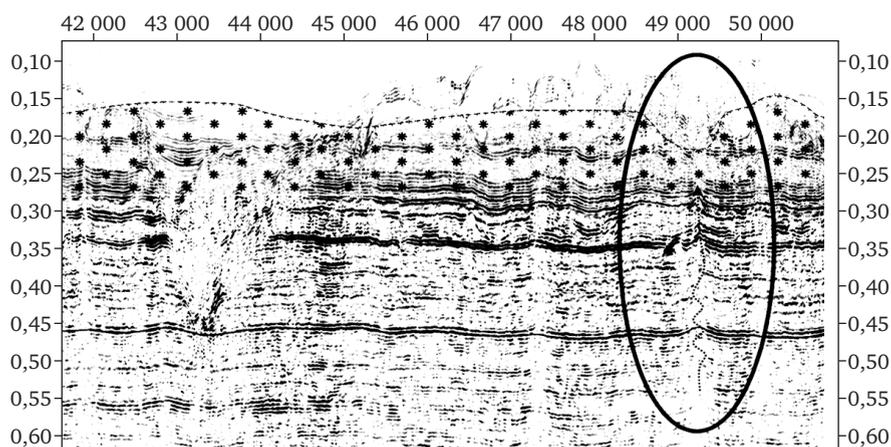


Рис. 3.18. Газовые каналы в толще морских осадков по результатам геоэлектрического и сейсмического исследований, овалом выделена зона миграции газа (по данным А. В. Кошурикова)

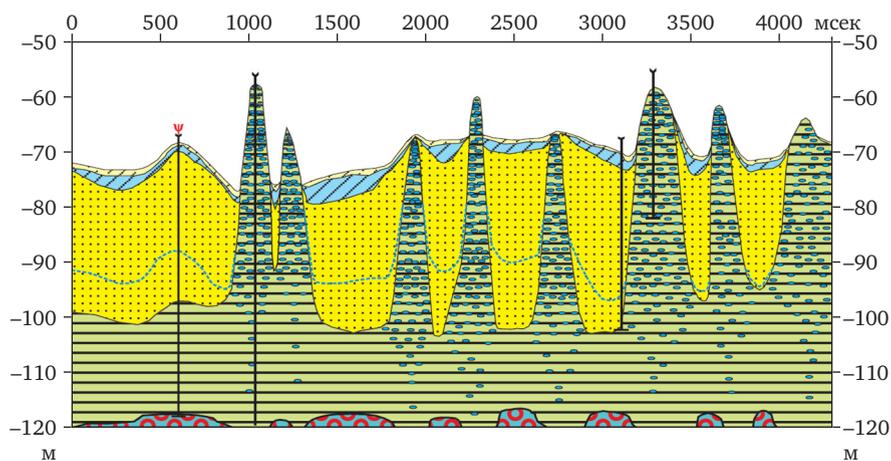


Рис. 3.19. Временные разрезы, полученные на объекте «Диапиры», и их интерпретация по данным бурения¹:

-  — нижневалдайские аллювиальные пески;
-  — средневалдайские суглинки;  — микулинские глины;
-  — морские голоценовые супеси;  — пески, насыщенные газом с АВГД (аномально высокое пластовое давление);
-  — сегрегационный лед;  — инженерно-геологические скважины;  — скважина, в которой имел место выброс;
-  — кровля многолетнемерзлых пород

¹ Рокос С. И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа.

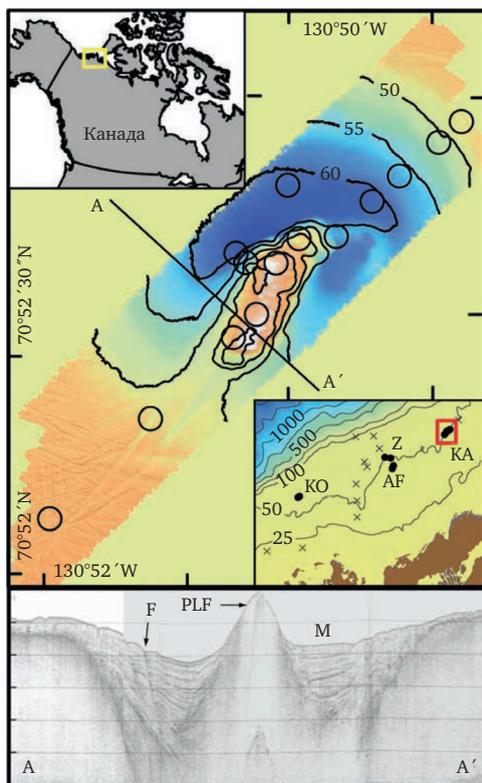


Рис. 3.20. Местоположения пингообразных бугров на морском дне (вверху) и положение сейсмического профиля А—А' (внизу)¹:

PLF — пингообразный бугор; М — понижение, окружающее бугор заполненным слоистым слоем осадков, содержащих вертикально ориентированные трещины (F)

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. Объемное содержание льда в ядре бугра было от 10 до 30 % (и более в некоторых образцах). Канадские исследователи предположили, что пингоподобные образования могут формироваться вследствие нагрева гидратосодержащих многолетнемерзлых пород водами голоценовой трансгрессии арктического шельфа. После перекрытия водами Северного Ледовитого океана температура мерзлых пород начинается повышаться. Потепление приводит к формированию постепенно утолщающегося

¹ Charles K. P. et al. 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 (1).

слоя разложения газогидрата (коричневый цвет на рис. 3.21), и выделения газообразного метана в донные отложения (желтые точки). Образование пузырьков газа, связанное с фазовыми переходами, создает избыточное давление. Под действием давления газонасыщенные мерзлые породы на локальных участках начинают выдавливаться вверх.

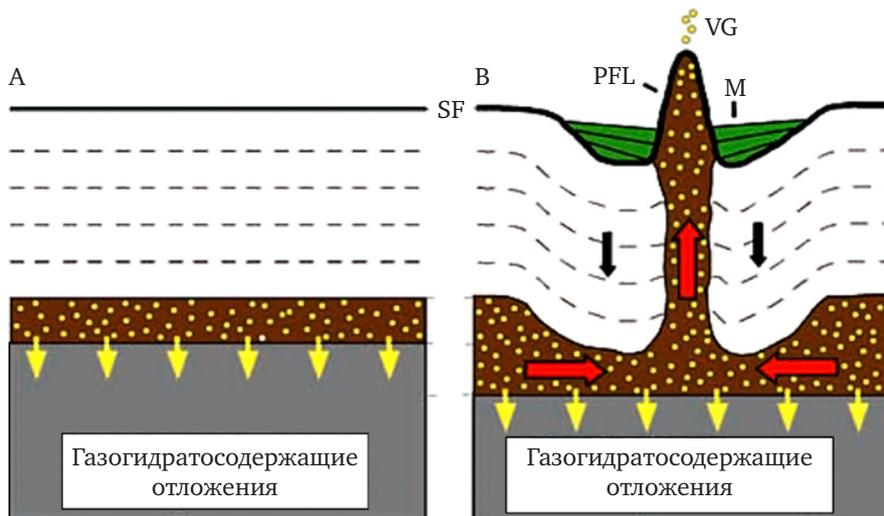


Рис. 3.21. Схематический чертеж пингоподобной структуры (PLF) и окружающего ее рва (M), связанных с разложением гидрата газа¹:

VG — выход газа; SF — морское дно

Выделение большого количества углеводородных газов, находящихся под давлением, может быть связано с массивным 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 этой роли. При этом вероятность эмиссии значительной части метана в атмосферу очень высока. Миграция газа может происходить через мерзлые породы на шельфе, после того как будет достигнуто соответствующее давление. При этом в мерзлых породах формируются каналы, по которым газ проникает в морские воды, а затем и в атмосферу².

¹ Charles K. P. et al. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates.

² Shakhova N. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature Communications. 2017. Vol. 8. (15872). P. 1—13.

Выводы

Криогенные системы, приуроченные к границам геосфер, отличаются значительной динамичностью и разнообразием строения. Строение и морфология этих криогенных систем определяются условиями, существующими на границах геосфер. Сформировавшиеся криогенные системы оказывают значительное влияние на тепло-массообмен между геосферами. Как образование, так и разрушение криогенных систем происходит неравномерно, проходя через промежуточные стадии.

Снежный покров представляет из себя сообщество сезонных криогенных систем, сформированных из твердых атмосферных осадков. Каждая система имеет свои условия формирования, динамику и особенности метаморфизма, а также последовательность ветровой, механической и тепловой переработки.

Ледники образуются в результате аккумуляции и преобразования твердых атмосферных осадков при их положительном многолетнем балансе. Особенность ледника — его вязкопластическое течение под действием силы тяжести. Ледники, по сути, представляют собой ледниковые потоки.

Ледяные покровы являются сезонными криогенными системами, образовавшийся на поверхности воды вследствие понижения среднесуточной температуры воздуха до отрицательных значений. Они имеют сложное строение и претерпевают несколько закономерно сменяющихся этапов развития.

Формирование криогенных геосистем на контакте гидросферы и литосферы характерно только для полярных морских бассейнов где воды имеют отрицательные температуры. Развитие мерзлых пород определяется не только климатическими факторами, но и трансгрессивно-регрессивными циклами.

В толще морских осадков газ может содержаться в виде свободного газа, сконцентрированного в результате эпигенетического промерзания в виде локальных зон, газовых карманов или в клатратной форме в виде включений газогидратов в мерзлых породах. Повышение температуры многолетнемерзлых пород, происходящее при их перекрытии морскими водами, вызывает разложение газогидратов, выделение газа в толще мерзлых пород и возникновение в них очагов повышенного давления. При этом на морском дне формируются ледогрунтовые бугры. При выбросе газа из морских осадков образуются воронки (покмарки) сходные с воронками газового выброса в континентальных условиях.

Тема 4

КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ В БИОСФЕРЕ

Вряд ли можно назвать природный фактор, который бы на Земле оказывал столь мощное влияние на растительный и животный мир, как низкие температуры. Только тропическая область планеты, если исключить ее высокогорные районы, свободна от его действия. Пульсации криосферы являются одним из основных факторов, определяющих развитие живого вещества на Земле. Глобальное похолодание приводило к развитию ледниковых покровов и сужению климатических поясов. Это, в свою очередь сопровождалось изменением среды обитания растений и животных, их вымиранием и перераспределением в огромных масштабах.

Потепление и уменьшение области распространения криосферы сопровождалось обычно резкой активизацией биологических процессов. В. И. Вернадский¹ установил, что основой самоорганизации и саморегуляции природных ландшафтов является биологический круговорот элементов — образование живого вещества и его разложение.

В криогенных ландшафтах — неотъемлемой части биосферы наблюдается самоорганизация криобиологических систем разного уровня. Главным условием возникновения и развития данных систем является непрерывный циклический (зима — лето, ледниковая эпоха — межледниковье) круговорот биологического вещества и энергии. Самоорганизация и устойчивость криогенных биологических систем обеспечиваются внутренними связями и периодичностью взаимодействия криогенных и биогенных процессов².

Влияние отрицательных температур на живое вещество проявляется в ослаблении жизнедеятельности, прекращении обмена веществ и возникновении разнообразных повреждений, связанных с образованием кристаллов льда. Выделяется три температурных диапазона, в которых могут существовать устойчивые криогенные

¹ Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М. : Наука, 1987.

² Тайсаев Т. Т. Криобиогенез — фактор самоорганизации геохимических ландшафтов криолитозоны // Материалы третьей конференции геокриологов России. М. : Изд-во МГУ, 2005. Т. 2. С. 291—298.

биологические системы, каждый из них характеризуется определенными особенностями жизнедеятельности живого вещества¹:

1) 0...–20 °С — при данной температуре еще возможна клеточная активность;

2) –20...–80 °С — живые организмы могут находиться в анабиотическом состоянии;

2) ниже –80 °С — возможна полная консервация биологических объектов (данная температура в естественных условиях на Земле не наблюдается).

4.1. Криобиология

Криобиология представляет собой раздел биологии, изучающий действие низких температур на живые системы. Среди задач криобиологии — выяснение причин устойчивости организмов к переохлаждению и замерзанию, исследование повреждающего действия отрицательных температур и способов защиты клеток и тканей при замораживании². Некоторые клеточные белки способны выполнять роль антифризов (криопротекторов). Они ингибируют образование кристаллов льда и изменяют закономерности роста льда. Белки зародышеобразования льда, с другой стороны, обеспечивают соответствующую матрицу для стимулирования роста льда³. Проблемы криобиологии имеют большое теоретическое и практическое значение, так как связаны с выяснением нижних температурных границ жизни, механизмов адаптации в естественных условиях к холоду.

Научные основы криобиологии были заложены в конце XIX в. русским ученым П. И. Бахметьевым, изучавшим явление переохлаждения у насекомых и анабиоз у летучих мышей. Термин «анабиоз» был предложен в 1873 г. Вильгельмом Прейером в его сводке по исследованию феномена временного прекращения жизнедеятельности. Последнее не обязательно наступает от холода, но холод — среди важнейших причин.

¹ Лозина-Лозинский Л. К. Очерки по криобиологии. Л., Наука, 1972; Fuller B, Paynter S. Fundamentals of cryobiology in reproductive medicine // Reproductive BioMedicine Online. 2004. Vol 9. № 6. P. 680—691.

² Смит О. Биологическое действие замораживания и переохлаждения : пер. с англ. М., 1963; Fuller B, Paynter S. Fundamentals of cryobiology in reproductive medicine; Life in the Frozen State / eds. by B. J. Fuller, N. Lane, E. E. Benson. Boca Raton : CRC Press, 2004; Жмакин А. Физические основы криобиологии // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 3. С. 243—266; Тихомиров А. Основы криобиологии. LAP Lambert Academic Publishing, 2014; Прохоров Г. Г., Беляев А. М., Прохоров Д. Г. Основы клинической криомедицины. СПб. ; М. : Книга по требованию, 2017.

³ Hew C. L., Yang D. S. C. Protein interaction with ice // European Journal of Biochemistry. 1992. Vol. 203. P. 33—42.

Считается, что анабиоз был открыт еще в начале XVIII в. Антони ван Левенгуком, который при исследовании проб песка, взятого из водосточного желоба, обнаружил, что коловратки, будучи полностью высушенными и не подававшие никаких признаков жизни, при добавлении воды оживали. Хотя Левенгук считал, что настоящей остановки жизни не происходит, на основании дальнейших опытов сложилось мнение, что она все-таки возможна. П. Беккерель и Г. Рам в начале XX в. установили способность различных организмов (микроорганизмы, беспозвоночные — тихоходки, коловратки, нематоды), а также спор и семян переносить в высушенном состоянии глубокое охлаждение (до -269 и -271°C , т. е. до температур, близких к абсолютному нулю)¹.

Микроорганизмы отличаются наибольшей устойчивостью; многие из них легко переносят замораживание². Семена растений также мало повреждаются. В дальнейшем было показано, что некоторые растения и животные выживают при замерзании содержащейся в них воды. Например, такие высокоорганизованные существа, как гусеницы некоторых бабочек, предварительно закаленные, т. е. адаптированные к холоду, «оживали» после длительного замораживания при -78 , -196 и даже -269°C , когда вода в их теле превращалась в кристаллический лед. Яйца лягушки, замороженные при -8°C в течение двух дней, после оттаивания дали потомство. Часть куриных яиц переносит замораживание.

Японцы Асахина и Аоки работали с личинками насекомого *Cnidocampa flavescens*, которые были удалены из защитных коконов, охлаждены до -30°C на один день, а после этого помещены в жидкий кислород при -180°C ; после нагревания некоторые из них дожили до следующего этапа развития. Раствор этиленгликоля был использован Б. Дж. Люэтом и М. К. Хартрингом при заморозке угриц (*Anguillula aceti*), которые пережили погружение в жидкий воздух при температуре около -190°C при условии, что и охлаждение, и нагревание были достаточно быстрыми.

Остаются жизнеспособными при замораживании многие черви, например нематоды и гельминты³. Гусеницы *Pyrausta* замораживались до -21°C и становились хрупкими, как стекло, однако после восьми дней в таком состоянии возвращались к жизни⁴.

Моллюски на северных побережьях, подверженные морозу во время отлива, возможно, замерзают и оттаивают по два раза

¹ Тихомиров А. Основы криобиологии.

² Похиленко В. Д., Баранов А. М., Детушев К. В. Методы длительного хранения коллекционных культур микроорганизмов и тенденции развития // Известия вузов. Поволжский регион. Медицинские науки. 2009. № 4. С. 99—121.

³ Тихомиров А. Основы криобиологии.

⁴ Lyuet B. J., and Gehenio P. M. Life and death at low temperatures // Biodynamica. Normandy, Miss., 1940.

в день в течение недель, но выживают¹. Известен своей способностью переносить замораживание моллюск *Helix pomatia*; сообщает о выживании некоторых мух². Замороженное насекомое — маленький рачок *Chydorus sphericus*, найденный в мерзлоте, возраст которой, возможно, несколько тысяч лет, на глубине 3,5 м в долине реки Большой Невер П. Н. Каптеревым³, вернулся к жизни! Сибирский углозуб, или четырехпалый тритон, способен переносить понижение температуры до $-35...-40$ °С и долго сохранять жизнеспособность в замороженном состоянии.

Выживают некоторые охлажденные рыбы, например, карпы при -3 °С; многочисленные сведения о выживании рыб при полном замораживании считаются, однако, недостоверными⁴. Древесная лягушка (*Rana sylvatica*), одна из самых распространенных лягушек на Аляске, достигающая 7 см в длину, обладает способностью впадать в глубокую зимнюю спячку, выживая при температуре тела до -6 °С⁵. Возможно, эта лягушка — самый близкий к человеку живой организм, который может пережить настоящее замораживание. Временное охлаждение теплокровных, например кроликов, при температуре -73 °С и падении ректальной температуры до $6,1$ °С, по результатам экспериментов, оставляет их живыми. Охлажденные обезьяны при падении температуры тела до 14 °С также выжили. **Коты** переживают падение температуры тела до 16 °С. Мышей и белок иногда можно охладить даже до -1 °С, и они возвращаются к жизни⁶.

Одна из проблем криобиологии — изучение процессов, сопровождающих охлаждение живых систем и ведущих к необратимым повреждениям. Причин, вызывающих повреждения при охлаждении и замерзании, много. Для неадаптированных к холоду клеток особенно опасно обезвоживание, так как возникают контакты внутриклеточных компонентов, которые при нормальных условиях разобщены; при этом происходят разрывы одних межмолекулярных связей и образование других, повреждения клеточных мембран. Подобные явления могут возникать и в случае образования кристаллов льда внутри клетки.

Устойчивость многих наземных организмов к температурам ниже 0 °С сильно изменяется в течение жизненного цикла, связанно-

¹ Эттингер Р. Перспективы бессмертия (The prospect of immortality // Worlds of Tomorrow. June 1963).

² Luyet B. J., and Gehenio P. M. Life and death at low temperatures.

³ Каптерев П. Н. Оживление организмов из вечной мерзлоты // Наука и жизнь. 1936. № 8. С. 25—30.

⁴ Тихомиров А. Основы криобиологии.

⁵ Costanzo, J. P., Lee R. E. Jr. Avoidance and tolerance of freezing in ectothermic vertebrates // J. Exp. Biol. 2013. Vol. 216. P. 1961—1967.

⁶ Тихомиров А. Основы криобиологии.

го с сезонами года. Так, у насекомых и растений сильно повышаются холодоустойчивость и морозоустойчивость при переходе к состоянию покоя (диапаузы у насекомых и клещей) еще до наступления морозов¹. В начале периода покоя при температурах немного выше 0 °С происходят значительные перестройки в обмене веществ и физико-химическом состоянии клеток, повышающие устойчивость организмов. Накапливаются жиры, гликоген, сахара, образуются защитные вещества, изменяется состояние воды и белков в клетках. Насекомые в зависимости от их экологии приобретают способность сильно переохлаждаться, иногда до –40 °С или еще ниже².

Некоторые виды насекомых и растений перезимовывают в замерзшем состоянии. Хорошо переносят низкие и даже сверхнизкие температуры многие микроорганизмы (бактерии, дрожжи), мхи и лишайники. На этом свойстве, по существу, основаны методы их длительного хранения³. Обычно их холодоустойчивость связана с быстрым обезвоживанием, повышенной вязкостью цитоплазмы, наличием оболочки, препятствующей проникновению кристаллов в клетку. Жизнедеятельность организмов (исключая теплокровных животных) прекращается обычно при температурах несколько ниже 0 °С, но некоторые процессы обмена веществ могут протекать при температурах около –20 °С (например, дыхание, фотосинтез) и даже ниже⁴. В связи с этим представляет интерес малоизученная биология морских организмов, обитающих на подводных льдах Антарктики, а также микроорганизмов в ледниках и вечной мерзлоте⁵.

4.2. Взаимодействие льда с живым веществом

Существует несколько механизмов взаимодействия кристаллов льда с живым веществом. Некоторые из них действуют на клеточном уровне, другие — на уровне тканей. Рассмотрим их подробнее.

¹ Lee R. Insect cold-hardiness: To freeze or not to freeze // *Bioscience*. 1989. Vol. 39. P. 308—313.

² Лу Н. Г. Кробиология насекомых, обитающих в экстремально холодных регионах // *Наука и техника в Якутии*. 2012. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kriobiologiya-nasekomyh-obitayuschih-v-ekstremalno-holodnyh-regionah> (дата обращения: 18.11.2020).

³ Похиленко В. Д., Баранов А. М., Детушев К. В. Методы длительного хранения коллекционных культур микроорганизмов и тенденции развития.

⁴ Drost-Hansen W. Temperature effects on cell-functioning—A critical role for vicinal water // *Cell Mol Biol*. 2001. Vol. 47. P. 865—883; Junge K., Eicken H., Deming J. W. Bacterial activity at –2 to –20 °С in Arctic wintertime sea ice // *Appl Environ Microbiol*. 2004. Vol. 70. P. 550—557; Panikov N. S. et al. Microbial activity in soils frozen to below –39 °С // *Soil Biol Biochem*. 2006. Vol. 38. P. 785—794; Feller G. Life at low temperatures: is disorder the driving force? // *Extremophiles*. 2007. Vol. 11. P. 211—216.

⁵ Price P. B. A habitat for psychrophiles in deep Antarctic ice // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2000. Vol. 97. P. 1247—1251.

4.2.1. Образование кристаллов льда в клетке

Экспериментально установлено, что само по себе переохлаждение до субнулевых температур не вызывает повреждения клеток. Главное, что им грозит при замораживании, — это образование в них кристалликов льда, что вызывает механическую денатурацию макромолекул, обезвоживание и деформацию клеток. Большое значение имеет скорость охлаждения и нагревания. При медленном охлаждении сначала переходит в лед вода окружающей клетку жидкости. Это приводит к потере клеткой воды, нарушению солевого равновесия между вне- и внутриклеточной жидкостью, повышению концентрации электролитов в клетке. Некоторые клетки вследствие этого погибают. Для того чтобы сохранить живыми клетки растений и некоторые ткани животных, требуется очень медленное охлаждение, при котором не происходит резкого изменения концентрации веществ в клетке. Кроме того, чем выше скорость охлаждения, тем больше воды в клетках оказывается переохлажденной (рис. 4.1); последующая кристаллизация этой переохлажденной воды внутри клетки может привести к гибели последней.

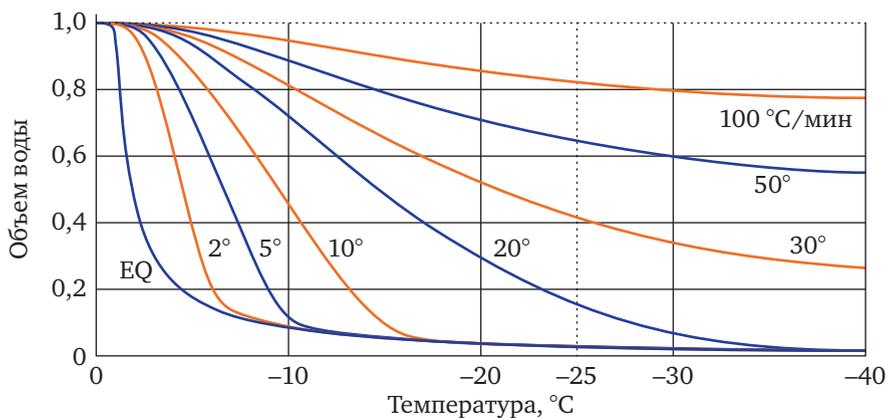


Рис. 4.1. Расчетное содержание воды, сохраняющейся при различной температуре в клетках дрожжей при различной скорости охлаждения (от 2 до 100 °C/мин) и в равновесии (EQ)¹

Чаще всего клетки подвергаются повреждениям в критической температурной зоне, когда выделяется латентное тепло кристаллизации. Чтобы быстрее миновать эту зону, нужно точно контролировать процесс замораживания и регулировать скорость охлаждения. Режим замораживания зависит от природы биологического объекта и состава среды, в которой находятся клетки. У разных их типов раз-

¹ Seki S., Kleinmans F. W., Mazur P. Intracellular ice formation in yeast cells vs. cooling rate: predictions from modeling vs. experimental observations by differential scanning calorimetry // *Cryobiology*. 2009. Vol. 58. № 2. P. 157—165.

ная устойчивость к замораживанию и, соответственно, своя оптимальная скорость охлаждения.

Кристаллизация растворов представляет собой сложный процесс (рис. 4.2). Кристаллы льда повреждают мембраны клеток, разрывая их¹. Клетки способны «залечивать» небольшие повреждения, но сильно поврежденная клетка может погибнуть. Образование кристаллов льда может происходить внутри клеток и снаружи их, в межклеточном пространстве. Как правило, сначала начинается образование внеклеточных кристаллов, поскольку внутри клетки выше концентрация различных веществ, понижающих температуру замерзания. Внеклеточное кристаллообразование намного менее опасно для клетки. Однако при более низких температурах начинается также и внутриклеточное образование кристаллов льда.

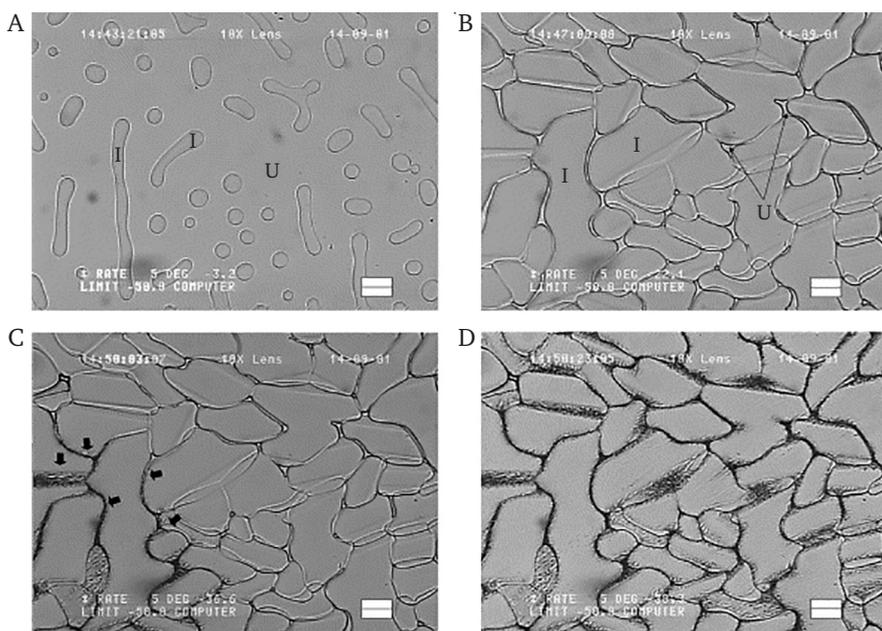


Рис. 4.2. Фотографии (увеличение $\times 5$) замерзающего фосфатного буферного (PBS) раствора²:

- A — зародыши льда при температуре фазового перехода;
 B — ледяные кристаллы с незамерзшим раствором при эвтектической температуре; C — начало эвтектической кристаллизации;
 D — завершение эвтектической кристаллизации; температуры: $-3,2$ °C (A), $-22,1$ °C (B), $-36,6$ °C (C), $-38,3$ °C (D); отрезок представляет длину 50 мкм;
 I — лед; U — незамерзший раствор; стрелки — фаза эвтектики

¹ Yi J. *et al.* An improved model for nucleation-limited ice formation in living cells during freezing // PLoS ONE. 2014. Vol. 9 (5). e98132.

² Han B., Bischof J. C. Direct cell injury associated with eutectic crystallization during freezing // Cryobiology. 2004. Vol. 48. № 1. P. 8—21.

Кристаллы льда легко образуются при скорости охлаждения выше 10 градусов в минуту. Криотекстура зависит от условий промораживания (рис. 4.3). После окончания процесса охлаждения (при температурах выше $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$) возможен их рост, а также перекристаллизация. Увеличение их размеров особенно значительно при отогревании.

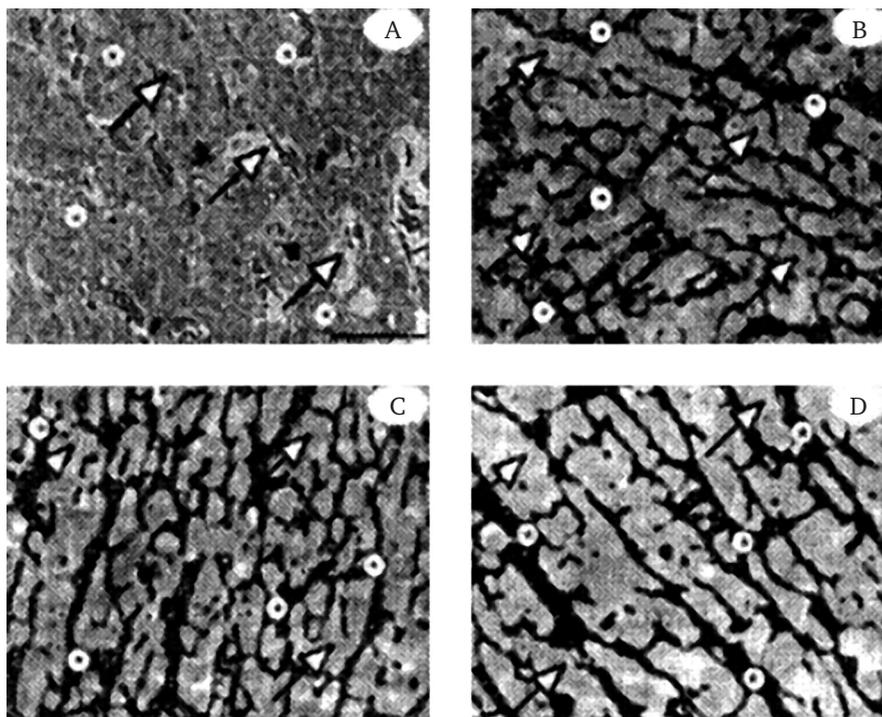


Рис. 4.3. Фотографии печени лягушки, охлажденной со скоростью $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ при температуре: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (А), $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (В), $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (С), $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (D), а затем замороженной при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹:

на А стрелки показывают клетки крови внутри сосудов, окруженные другими клетками (отмеченные звездочками); на В, С и D темные области (звездочки) соответствуют тканям, а светлые (стрелки) — ледяным кристаллам в межклеточном пространстве. Отрезок на фото А соответствует 50 мкм

Считается, что именно во время отогревания и оттаивания происходят основные повреждения в клетках. Как правило, при образовании внутри клетки кристаллов льда она погибает; однако клетки некоторых закаленных насекомых и злокачественных опухолей переносят внутриклеточную кристаллизацию воды. При сверхбы-

¹ Barrat P. R. et al. Biophysics of freezing in liver of the freeze-tolerant wood frog // Annals of the New York Academy of Sciences. 1998. Vol. 858. P. 284—297.

стром охлаждении со скоростью нескольких сот **градусов в секунду** (такое охлаждение возможно лишь у живых объектов, имеющих микроскопические размеры) большая часть воды превращается в аморфный лед, структура которого мало отличается от структуры воды. Этот процесс называется *витрификацией*. Благодаря этому клетки не повреждаются и выживают независимо от своего происхождения. Но после сверхбыстрого глубокого охлаждения клетки сохраняют жизнеспособность лишь при очень быстром отогревании (за 3—10 с), при котором можно избежать рекристаллизации. На практике этот метод сохранения клеток почти неприменим ввиду невозможности сверхбыстрого охлаждения и отогревания более или менее крупных объектов.

Л. К. Лозина-Лозинским предложена общая классификация скоростей охлаждения клеток (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Классификация скорости охлаждения¹

Группа	Изменение скорости охлаждения	Продолжительность процесса с начала охлаждения до конца опыта	Скорость процесса
1-я	Очень медленное	Несколько часов	До 10 °С/ч и медленнее
2-я	Медленное	1 ч — 10 мин	10 °С/ч — 10 °С/мин
3-я	Быстрое	10 мин — 1 мин	10—60 °С/мин
4-я	Очень быстрое	60 — 10 с	1—100 °С/с
5-я	Сверхбыстрое	Меньше 5 с	Свыше 100 °С/с

Для первой группы характерно замерзание вне клеток с образованием крупных, быстро растущих кристаллов льда, имеющих неустойчивую форму (дендриты и тому подобные структуры). Начиная с третьей группы происходит преимущественно внутриклеточное замерзание. Преобладает образование кристаллов кубической и радиальной волокнистой структуры. При еще более быстром охлаждении (4-я группа) кристаллы всегда образуются внутри клеток. Формируются мелкие кристаллы, клетки становятся непрозрачными. В 5-й группе мгновенное охлаждение вызывает значительную аморфизацию, в этом случае клетки повреждаются в наименьшей степени². **Исследование** проблемы замерзания воды в живых клетках далеко не закончены и продолжаются³.

¹ Лозина-Лозинский Л. К. Очерки по криобиологии.

² Лозина-Лозинский Л. К. Очерки по криобиологии.

³ Yi J. et al. An improved model for nucleation-limited ice formation in living cells during freezing.

Деформации и растрескивание тканей. Клетки значительно изменяют свой объем при замораживании (рис. 4.4), что связано прежде всего с осмосом и дегидратацией. Кроме того, при замораживании больших образцов тканей и органов невозможно добиться равномерного охлаждения. Это приводит к возникновению механических напряжений в тканях и их растрескиванию. Особенно подвержены растрескиванию образцы при витрификации — как в силу более хрупкого стеклообразного состояния, так и из-за того, что для витрификации требуются максимально возможные скорости охлаждения. Наибольшую опасность растрескивание представляет при температурах около $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже.

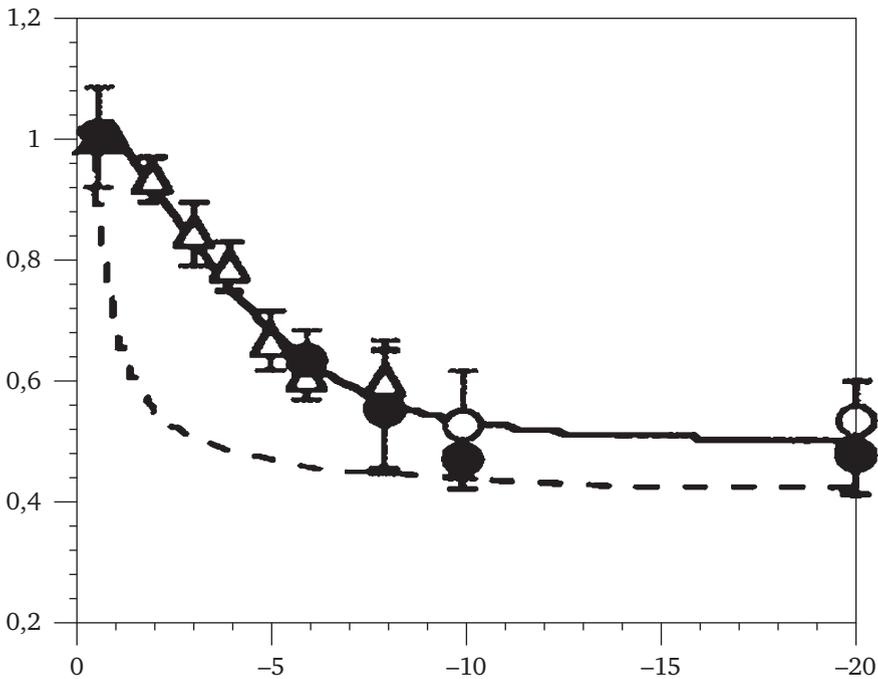


Рис. 4.4. Изменение относительного объема клетки печени лягушки (ось ординат) при замораживании со скоростью $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ при различной температуре (ось абсцисс), $^{\circ}\text{C}^1$

Связанная вода. Данные многих авторов показывают, что даже при температурах ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ часть воды в тканях (свыше 10 %) остается **ненезамерзшей**². В опытах с дрожжами Вуд и Розенберг

¹ Barrat P. R. et al. Biophysics of freezing in liver of the freeze-tolerant wood frog.

² Mazur P, Rall W. F, Rigopoulos N. Relative contributions of the fraction of unfrozen water and of salt concentration to the survival of slowly frozen human erythrocytes // Biophys. J. 1981. Vol. 36 (3). P. 653—675; Plant cold hardiness: molecular biology, biochemistry, and physiology / ed. by P. H. Li, T. H. H. Chen. Corvallis, Oregon, USA, 1996; Wolfe J., Bryant C., Koster K. L. What is unfreezable water, how unfreezable is it and how much is there? // Cryo Letters. 2002. Vol. 23. P. 157—166.

установили¹, что даже при $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ замерзало только 74 % клеточной воды. При этом дрожжи сохраняли жизнеспособность. В криобиологии сформировались представления, по которым молекулы воды принадлежат к структурной организации живого вещества (протоплазмы, клеточных стенок, белков), а не просто являются окружающей их средой. Для того чтобы разорвать эти связи, необходимо приложить дополнительную энергию.

Осмотические повреждения. При образовании кристаллов льда в оставшейся воде повышается концентрация солей. Очень высокая концентрация может привести к необратимому изменению структур белковых молекул и к гибели клетки².

Особенно большие концентрации солей могут возникнуть при медленном, но неравномерном охлаждении больших образцов. Дело в том, что при замерзании воды в части образца происходит вытеснение солей в еще не замерзшую зону. В образце формируется «фронт кристаллизации», который образует перед собой зону с высокой концентрацией солей. Если образец охлаждается с поверхности, концентрация соли в центре его может достигнуть эвтектической; при этом клетки гибнут.

Методы защиты от криогенных повреждений. Для защиты клеток от повреждающего действия холода используют различные защитные вещества, подбирают оптимальные режимы замораживания и оттаивания. К сожалению, разные типы клеток сильно различаются по оптимальному подбору таких веществ и по оптимальному режиму охлаждения. Это затрудняет охлаждение тканей и органов, состоящих из многих разных типов клеток.

4.2.2. Криопротекторы

Для сохранения живых систем в условиях низких температур применяют защитные вещества — *криопротекторы*. Криопротекторы ослабляют эффект кристаллизации, изменяя ее характер, препятствуют слипанию и денатурации макромолекул, способствуют сохранению целостности мембран клеток³.

Интересен механизм действия биологических криопротекторов — белков, предотвращающих кристаллизацию льда в клеточном растворе. Считается, что они адсорбируются на поверхности ледяного кристалла и тем самым препятствуют его росту. Их структуры оказались различны (рис. 4.5).

¹ Цит по: Лозина-Лозинский Л. К. Очерки по криобиологии.

² Mazur P, Rall W. F, Rigopoulos N. Relative contributions of the fraction of unfrozen water and of salt concentration to the survival of slowly frozen human erythrocytes; Wolfe J., Bryant G. Freezing, drying and/or vitrification of membrane-solute-water systems // Cryobiology. 1999. Vol. 39. P. 103—129.

³ Костяев А. А и др. Анналы криобиологии. Классификации криопротекторов и криоконсервантов для клеток крови и костного мозга // Вестник гематологии. 2016. № 3. С. 23—27.

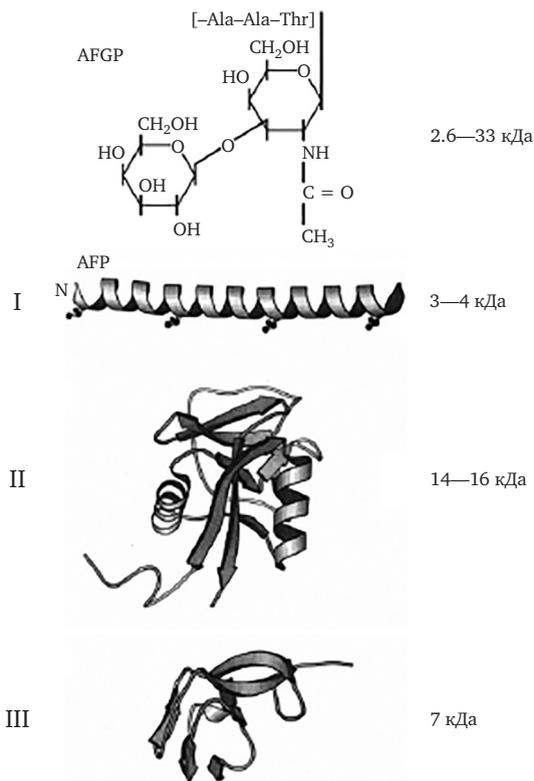


Рис. 4.5. Структуры различных криопротекторов; приблизительные массы указаны в килодальтонах¹

Криопротекторы получили широкое применение в медицине и животноводстве для длительного хранения при низких температурах крови, тканей, органов, а также спермы домашних животных, используемой для искусственного осеменения². С целью предохранения сперматозоидов от холодовых повреждений, например, в сперму рекомендуется добавлять глицерин, яичный желток или диметилсульфоксид (ДМСО). Если криопротекторы заменили достаточно воды в клетке, то охлаждение заставляет раствор протектора стать все более густым, переходя от жидкого состояния к стеклообразному в процессе витрификации. Эмбрионы мыши, витрифицированные и сохраненные в жидком азоте, вырастают в здоровых мышей. Состав криопротектора влияет на характер изменений в клетках при замораживании (рис. 4.6).

¹ Cheng C. C., DeVries A. L. Life under extreme conditions / G. di Prisko, ed. Berlin : Springer-Verlag, 1991.

² Wolfe J., Bryant G. Freezing, drying and/or vitrification of membrane-solute-water systems; Best B. P. Cryoprotectant toxicity: facts, issues, and questions // Rejuvenation Res. 2015. Vol. 18 (5). P. 422—436.

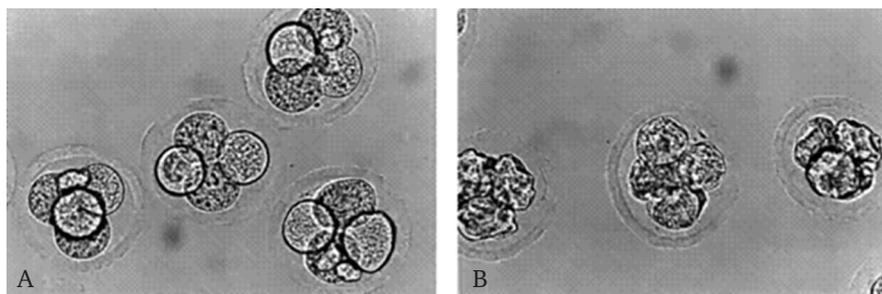


Рис. 4.6. Изменения формы эмбрионов мыши при погружении в раствор 1,5 моль/л этиленгликоля +0,2 моль/л сахарозы (А) или 1,5 моль/л пропиленгликоля +0,2 моль/л сахарозы (В). Эмбрионы замораживались в течении 5 мин; увеличение $\times 400^1$

Криопротекторы делятся на две группы — проникающие (т. е. способные просачиваться сквозь мембрану внутрь клетки), или эндоцеллюлярные, и не проникающие, или экзоцеллюлярные, которые действуют снаружи, осмотически вытягивая из клетки воду. К проникающим относятся глицерин, ДМСО, ацетамид, пропиленгликоль, этиленгликоль и некоторые другие; к непроникающим — полиэтиленгликоль, фикоил, сахароза, трегалоза и др. Последнее, т. е. непроникающие криопротекторы, сокращающие количество воды в клетке, выгоднее: чем меньше в клетке останется воды, тем меньше потом образуется льда. Но удаление воды приводит к повышению концентрации остающихся внутри клетки солей — вплоть до значений, при которых происходит денатурация белка. Эндоцеллюлярные же криопротекторы не только снижают температуру замерзания, но и разбавляют образующийся при кристаллизации «рассол», не давая белкам денатурироваться.

Наиболее широкое применение нашли глицерин и ДМСО. Считается, что защитные свойства глицерина при замораживании растительных тканей были открыты в начале XX в. шведским ботаником Б. Лидфорссом, а также русским ботаником Н. А. Максимовым. В 1949 г. К. Польж с коллегами² подтвердили высокую эффективность глицерина. В 1959 г. были впервые продемонстрированы свойства ДМСО как эффективного криопротектора, который легче проходит через клеточные стенки, чем глицерин, но более токсичен при высоких температурах. В 1972 г. 8-клеточный мышинный эмбрион впервые был сначала медленно заморожен до температуры жидкого азота с применением комбинации ДМСО и глицерина, а затем

¹ Chi H.-J. *et al.* Cryopreservation of human embryos using ethylene glycol in controlled slow freezin // Human Reproduction. 2002. Vol. 17. № 8. P. 2146—2151.

² Polge C., Smith A., Parkes A. Revival of spermatozoa after vitrification and dehydration at low temperatures // Nature. 1949. Vol. 164. P. 666—667.

успешно возвращен мыши. В 1982 г. впервые удалось получить **искусственную** беременность человека также с 8-клеточным эмбрионом, замороженным по аналогичной методике.

Если охлаждать водный раствор какого-нибудь вещества, при достижении температуры его замерзания из раствора начнут выпадать кристаллы льда. При этом концентрация оставшегося раствора будет возрастать, а температура его замерзания — снижаться. Однако так будет продолжаться только до достижения некоторой концентрации, которая называется *эвтектической*. При дальнейшем охлаждении эвтектической смеси она превращается в аморфную фазу. Частицы эвтектической смеси обычно настолько малы, что, в отличие от кристаллов льда, практически безвредны для клеток. Если же охлаждать смесь, содержащую концентрацию растворенного вещества, большую эвтектической, то из раствора при охлаждении будут выпадать кристаллы не льда, а этого вещества, а его концентрация будет снижаться, стремясь к эвтектической. К сожалению, веществ, способных при небольших концентрациях понизить температуру кристаллизации раствора до температуры сублимации сухого льда (при нормальном давлении $-78,5^{\circ}\text{C}$, или $194,65\text{ K}$) — твердого диоксида углерода, не говоря уж о температуре кипения жидкого азота ($-195,75^{\circ}\text{C}$, или $77,4\text{ K}$), пока неизвестно. В большинстве случаев приходится принимать в расчет то, что часть воды неизбежно кристаллизуется.

Понижение температуры замерзания раствора происходит, как известно, приблизительно в соответствии с выражением

$$dT = Kq/m,$$

где dT — понижение температуры замерзания; K — криоскопическая константа воды, теоретически равная $1,86$; m , q — молекулярная масса и масса растворенного вещества в 1000 г воды соответственно. Величина криоскопической постоянной зависит от электростатических свойств молекул растворенного вещества.

Если охлаждать смесь, состоящую из $n\%$ вещества, растворенного в воде, причем $n < E$, где E — эвтектическая концентрация, то максимальная доля льда, которая может выделиться в виде льда, равна

$$M = (1 - n/E).$$

Разные клетки способны выдержать образование разного количества льда. При использовании в качестве криопротектора глицерина (наиболее часто встречающийся в живой природе естественный криопротектор) долю льда можно значительно понизить. К сожалению, глицерин при значительной концентрации оказывается токсичен¹.

¹ Best B. P. Cryoprotectant toxicity: facts, issues, and questions.

На практике обычно используются небольшие концентрации. При этом образцы подвергаются медленному охлаждению — например, в парах жидкого азота. Как уже упоминалось, кристаллы льда образуются сначала в межклеточном пространстве. Такие кристаллы приносят относительно мало вреда. В процессе роста они оттягивают воду из клеток; концентрация растворенных веществ в межклеточном пространстве повышается, и это тормозит образование кристаллов. В конце концов в некоторых клетках вода витрифицируется, в других образуются ледяные кристаллы, но небольшие, не опасные для жизни клетки. Часть клеток погибает.

Большое значение для решения проблемы обратимого замораживания имеет скорость охлаждения¹. Для каждого типа клеток существует своя оптимальная скорость охлаждения. Если охлаждать клетки быстрее, вода из них не будет успевать вытягиваться наружу и внутри клеток будут образовываться слишком крупные ледяные кристаллы. Если медленнее — концентрация криопротектора, солей и других растворенных веществ внутри клеток станет слишком велика, и клетка погибнет от осмотического шока.

К сожалению, оптимальные скорости понижения температуры и условия компромисса между повреждающими действиями кристаллов льда и высокими концентрациями растворенных веществ для разных типов клеток сильно различаются. Различны также оптимальные концентрации криопротекторов. Это затрудняет сохранение при низких температурах органов и тканей, включающих несколько различных типов клеток, а тем более — целых организмов.

При быстром охлаждении (например, опускании образца в жидкий азот) вода не успевает выйти из клеток наружу; кристаллы образуются как вне, так и внутри клеток, но за счет быстрого охлаждения они оказываются значительно мельче и успевают образоваться не во всех клетках. Токсичных концентраций солей при этом удастся избежать, а продолжительность их воздействия оказывается меньше, как и продолжительность вредного воздействия криопротекторов. Последнее позволяет использовать более высокие их концентрации.

При медленном охлаждении (в парах жидкого азота или в специальных программных замораживателях) кристаллы льда образуются в основном в межклеточном пространстве. По мере охлаждения они растут, оттягивая на себя воду из клеток. Это позволяет уменьшить повреждения, наносимые кристаллами клеткам, — но и концентрация солей внутри клеток значительно возрастает, повышая риск денатурации белков.

¹ Wolfe J., Bryant G. Freezing, drying and/or vitrification of membrane-solute-water systems.

Точка замораживания воды, содержащей различные ионы, находится ниже 0 °С и зависит от концентрации растворенных веществ. В случае медленного замораживания клеток их содержимое может сохраниться в жидком состоянии при температуре значительно более низкой, чем точка замерзания соответствующего раствора. Это явление известно как *переохлаждение*.

Солевой фосфатный буферный раствор с добавлением ДМСО имеет точку замерзания –3 °С. При медленном замораживании такой раствор можно охладить (в состоянии переохлаждения) до температуры –21 °С без образования льда. Замораживание производят в специальных программируемых аппаратах, которые точно поддерживают скорость охлаждения и температурный режим.

С целью предотвращения спонтанного образования льда, которое может повредить клетки, он включает в себя важный этап — сидинг. Под ним подразумевают индукцию образования кристаллов льда при температуре, меньшей точки замораживания, что также предотвращает переохлаждение. Сидинг обычно выполняется при температурах –5...–7 °С вручную путем прикосновения пинцетом или другим предметом к соломинке, содержащей раствор с клетками.

Температура, при которой заканчивается замораживание и материал переносится в жидкий азот, влияет на степень дегидратации клеток. Так, клетки, охлажденные медленно до температуры –60 °С, имеют высокую степень дегидратации и требуют медленного оттаивания (8—20 °С/мин) с целью обеспечения адекватной регидратации. Наоборот, клетки, охлажденные медленно только до –30...–40 °С, должны оттаивать быстро (275—500 °С/мин)¹.

Организмы, переносящие в природе сильные холода, часто вырабатывают внутри себя глицерин или сахара (глюкозу, трегалозу). При искусственной же криоконсервации наиболее часто используются глицерин и ДМСО.

4.2.3. Блокаторы образования льда. Витрификация

Кроме криопротекторов многие зимующие насекомые, а также некоторые живущие в холодных водах рыбы вырабатывают так называемые блокаторы образования льда (айс-блокеры). Они позволяют воде некоторое время сохраняться в метастабильном переохлажденном жидком состоянии при температурах ниже точки замерзания — обычно на несколько градусов². При еще более низких температурах замерзание все же происходит. На количество

¹ Руководство по клинической эмбриологии : руководство для врачей / В. С. Корсак [и др.] ; под ред. В. С. Корсака. 2-е изд. М. : СИМК, 2019.

² Marco-Jimenez F. et al. Effect of «ice blockers» in solutions for vitrification of in vitro matured ovine oocytes // Cryo Letters. 2012. Vol. 33 (1). P. 41—44.

образующегося льда такие вещества почти не влияют, поэтому при медленном глубоком замораживании они не эффективны.

Они оказываются, однако, полезны при другом режиме замораживания — быстром. В этом случае стремятся обойтись вообще без образования кристаллов льда. Для этого используются высокие концентрации криопротекторов и быстрое охлаждение. Поскольку время охлаждения сокращается, криопротекторы в меньшей мере успевают проявить свою **токсичность**, и их можно использовать в большем количестве. Блокаторы образования льда позволяют легче пройти опасный участок — от температуры замерзания до нескольких десятков градусов ниже нуля. При еще более низких температурах кристаллообразование тормозится за счет увеличения вязкости раствора.

При использовании метода витрификации значительные трудности подстерегают также и на этапе согревания образца. Поскольку переохлажденная вода метастабильна, на упомянутом опасном участке температур также может происходить образование кристаллов. Кроме того, опять начинает действовать токсичность криопротекторов. Чтобы избежать этого, необходимо обеспечить как быстрое нагревание образца, так и быстрый отмыв его от криопротекторов.

На разрабатываемые в настоящее время методы ультрабыстрого замораживания возлагаются большие надежды. Метод требует высоких концентраций хорошо проникающего сквозь мембрану криоконсерванта в сочетании с малопроницаемыми растворами для дегидратации клеток.

4.3. Практическое использование криогенных биосистем

4.3.1. Криоконсервация

В медицине, сельском хозяйстве, при научных исследованиях часто возникают ситуации, когда тот или иной биологический объект или материал нужно сохранить в неизменном состоянии в течение долгого времени — иногда многих лет. Обычно этого можно достичь охлаждением его до температур достаточно низких, чтобы химические реакции практически приостановились. Отдельные попытки сохранения в замороженном состоянии яйцеклеток и сперматозоидов животных предпринимались еще 200 лет назад. Однако лишь с 1983 г. применяется технология замораживания человеческих эмбрионов, из которых потом развиваются нормальные дети. В мире уже родились сотни таких детей, некоторым из них суждено было прожить в виде эмбриона в жидком азоте по много лет¹. Име-

¹ *Jensen A. K. et al.* 86 successful births and 9 ongoing pregnancies worldwide in women transplanted with frozen-thawed ovarian tissue: focus on birth and perinatal outcome in 40 of these children // *Journal of assisted reproduction and genetics.* 2017. Vol. 34 (3). P. 325—336.

ются примеры рождения людей из семени, хранившего 40 лет¹. Однако до настоящего времени криоконсервация представляет собой трудную проблему; ее сложность обратно пропорциональна сложности биологической замораживаемой системы.

Клетки. Для сохранения живых клеток в течении нескольких месяцев достаточно охладить их до температуры около $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обычно их хранят в присутствии сухого льда. Клеточная терапия — одно из наиболее быстро развивающихся направлений в современной медицине². В большинстве случаев возникает потребность в более или менее длительном хранении пересаживаемых клеток. При температурах около $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже клетки могут сохранить жизнеспособность, возможно, в течении многих сотен лет, что достаточно для большинства приложений. На практике обычно используют хранение в жидком азоте, температура кипения которого составляет $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре кипения жидкого гелия ($-268,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нормальном давлении) клетки, очевидно, можно хранить практически вечно. Некоторые расчеты показывают, что при этом за 1 тыс. лет хранения разрушится только 3 % от числа законсервированных клеток.

Одна из технологий, например, консервации спермы, используемая в Российской Федерации в соответствии приказом Минздрава России от 28 декабря 1993 г. № 301, состоит в следующем. Сперма должна быть охлаждена до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. температуры кипения жидкого азота, который считается лучшей средой для длительного хранения. Охлаждение производится с помощью специальной аппаратуры, в частности, для этого может быть использован универсальный программный охладитель КОП-6.

Соломки со спермой помещаются в горизонтальном положении в камеру охладителя. При замораживании сперма преодолевает два опасных температурных порога: от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$; от $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому для исключения вредного влияния температурных перепадов, особенно при близких к нулю температурах, образцы должны охлаждаться медленно, со скоростью $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. После достижения околонулевой температуры необходима экспозиция образца в течение 30—60 мин. Последнее условие необходимо для стабилизации подвижности клеток.

Дальнейшее замораживание следует продолжать быстро — со скоростью не менее $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до температуры около $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. После этого образцы должны быть перенесены в жидкий азот, в котором они перекладываются в полимерную пробирку и там хранятся. Другим методом криоконсервации является криоконсер-

¹ Szell A. Z. *et al.* Live births from frozen human semen stored for 40 years // Journal of assisted reproduction and genetics. 2013. Vol. 30 (6). P. 743—744.

² Best B. P. Cryoprotectant toxicity: facts, issues, and questions.

вация с помощью сухого льда (твердого диоксида углерода CO_2). При этом не требуется сложного оборудования. После разжижения сперма смешивается в пробирке с криопротекторами в соотношении 1 : 1 и помещается в холодильник на 2 ч при температуре около +4 °С. В куске сухого льда устраиваются луночки диаметром около 1,0 см и глубиной до 0,5 см с помощью формы, имеющей на поверхности выступы и нагретой до температуры около 40 °С. В готовые лунки разливаются образцы. Замерзшие образцы переносятся (пересыпаются) в полимерные пробирки, которые хранятся в криобиологических сосудах с жидким азотом типа X-34A до 10 лет.

Ткани. Значительно труднее решаются вопросы консервации клеточных тканей¹. Еще более сложны проблемы с криоконсервацией органов, предназначенных для последующей трансплантации. Проблема заключается в том, что живые ткани, охлажденные до состояния замерзания, после оттаивания часто оказываются нежизнеспособными.

Наиболее остро проблема сохранения биологических материалов встает в медицинской трансплантологии. Часто заранее неизвестно, когда понадобится тот или иной биологический материал. Поэтому полезно заранее запастись некоторое количество костного мозга или других тканей пациента, чтобы позже — иногда через годы — пересадить его обратно. Трансплантация тканей занимает промежуточное место между трансплантацией клеток и целых органов. Исторически первой тканью, трансплантация которой получила широкое распространение, была кровь. И сейчас переливания крови превосходят по своему количеству все остальные трансплантации, вместе взятые².

4.3.2. Трансплантация органов

В 2020 г., по данным сайта www.donors1.org, в очереди на трансплантацию только в США стоит 112 тыс. человек, причем почки нужно ждать около 5 лет. Положение можно было бы радикально улучшить, если бы существовал способ долговременного хранения органов. Это позволило бы организовать банки органов, которые можно было бы без спешки проверять на возбудители различных заболеваний, сколь угодно долго хранить, а затем доставлять в нужное время в нужное место.

Единственным способом, который мог бы позволить осуществить такое хранение, представляется криоконсервация. Пока, од-

¹ Хлусов И. А. Вопросы клеточных технологий и биоинженерии тканей (обзор) // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: биология. 2008. Т. 1. № 3. С. 269—294.

² Ajmani P. S. History of blood transfusion // Immunohematology and Blood banking. Singapore : Springer, 2020.

нако, не существует надежной методики, которая позволяла бы замораживать такие органы, как сердце, почка, печень или легкое, без недопустимого повреждения его тканей¹.

4.3.3. Криогенная деструкция и криохирургия

Криохирургия представляет собой направление в хирургии, использующее низкие температуры для деструкции органов и тканей больного, подлежащих удалению или разрушению. Еще в 1851 г. Дж. Арнот приготовлением криосмеси облегчил страдания пациентки с опухолью малого таза. В литературе имелись² сообщения о случаях разрушения опухолей кожи с помощью кристаллов углекислого газа и паров жидкого азота. В 1940-х гг. американский хирург Т. Фей длительно охлаждал раковые опухоли у неоперабельных больных и получил заметное улучшение³. С 1950 г. благодаря работам Х. Аллигтона⁴ жидкий азот стал основным криогенным средством в медицине. С 1960 г. И. Купер и А. Ли разработали технику прецизионной криохирургии⁵, а в 1964 г. было создано международное научное общество криобиологов, что положило начало систематическому изучению влияния низких температур на живые объекты. С 1968 г. стал выходить международный журнал «Cryobiology», а с 1974 г. — аналогичный журнал в Японии. Радикальные криохирургические операции стали широко и успешно применяться после 1980 г.⁶

¹ Сачков А. С. и др. Экспериментальная оценка девитализированной криосохраненной аллогенной и ксеногенной ткани в сравнении с традиционной // Бюллетень НЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН «Сердечно-сосудистые заболевания». 2009. Т. 10. № 6. С. 49—57; Рогулина Н. В. и др. Отдаленные результаты применения механических и биологических протезов у пациентов различных возрастов // Медицина и образование в Сибири. 2014. № 3. С. 47; Материалы III Национального конгресса по регенеративной медицине (Москва, 15—18 ноября 2017 г.) // Гены и клетки. 2017. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/materialy-iii-natsionalnogo-kongressa-po-regenerativnoy-meditsine-moskva-15-18-noyabrya-2017-goda> (дата обращения: 18.11.2020).

² Cooper S. M., Dawber R. P. The history of cryosurgery // J. R. Soc. Med. 2001. Vol. 94 (4). P. 196—201; Walzel C. Der heutige stand der kryochirurgie // Chirurg. 1978. Vol. 49. P. 202—208.

³ Fay T. Early experiences with local and generalized refrigeration of the human brain // J. Neurosurg. 1959. Vol. 16. P. 239—259.

⁴ Allington H. V. Liquid nitrogen in the treatment of skin diseases // Calif Med. 1950. Vol. 72. P. 153—155.

⁵ Cooper I. S., Lee A. Cryostatic congelation: a system for producing a limited controlled region of cooling or freezing of biologic tissues // J. Nerv. Ment. Dis. 1961. Vol. 133. P. 259—263.

⁶ Баранов А. Ю., Кидалов В. Н. Лечение холодом. Криомедицина. СПб., 1999; Силантьев В. А., Мовергоз С. В. Возможности современной криомедицины // Успехи современного естествознания. 2009. № 9. С. 199—201; Альперович Б. И., Мерзликин Н. В., Сало В. Н. Роль криохирургических вмешательств при повторных операциях по поводу альвеококкоза // Креативная хирургия и онкология. 2012. № 2. С. 20—24.

Сегодня многие дерматологи применяют локальное замораживание кожи (преимущественно углекислотой) при некоторых ее заболеваниях и раковых поражениях. Значительно труднее оказалось локально замораживать ткани в глубине тела. Замораживание тканей млекопитающих до кристаллического состояния ведет, как правило, к полному и необратимому их некрозу. Это результат дегидратации клеток при образовании кристаллов льда в их недрах и во внеклеточной жидкости; резкого повышения концентрации электролитов в клетках (осмотический шок); механических повреждений клеточных мембран и органоидов образующимися кристаллами льда; прекращения кровообращения в зоне замораживания. Интенсивность этих превращений определяет выживаемость клеток. Оптимальными для деструкции являются быстрое замораживание (со скоростью охлаждения 100 °С/мин) и медленное оттаивание (со скоростью 5—10 °С/мин) Минимальная температура, вызывающая замерзание 90 % внутриклеточной жидкости, составляет около -20 °С.

Локальное замораживание глубоких структур человеческого организма стало возможным с созданием соответствующей аппаратуры. Это позволило внедрять криохирургию в разных областях медицины. Испытание фреона и других хладагентов показало, что для целей криохирургии наиболее подходящим остается жидкий азот. Разрушающее действие холода, однако, ограничено, что связано с недоступностью части влаги, так называемой связанной воды. Криодеструкцию можно усилить с помощью повторных циклов замораживания/оттаивания, ультразвука, введения в зону замораживания адреналина и лидокаина, но незначительно. Последнее время стали применять сверхвысокочастотное электромагнитное поле, которое довольно эффективно для дестабилизации диполей воды и разрыва водородных связей.

Э. И. Кандель, В. В. Яворский, Н. Н. Трапезников в свое время достаточно широко использовали криометоды в онкологии, прежде всего для разрушения опухолей кожи: гемангиом и меланом. В проктологии криохирургический метод внедрен В. Д. Федоровым (1973) и Г. А. Подоляк (1972), которые успешно использовали его при лечении трещин, полипов, кондилом, свищей прямой кишки и геморроя. В. Д. Федоров с сотрудниками осуществил также криодеструкцию злокачественных опухолей прямой кишки в неоперабельных случаях и получил положительные результаты. Первую операцию криодеструкции надпочечника при синдроме Иценко — Кушинга выполнила в 1999 г. группа Санкт-Петербургских врачей в больнице РАН.

Механизм гибели клеток при криодеструкции достаточно сложен¹. Задолго до этапа образования ледяных кристаллов в тканях происходят необратимые патологические изменения. В частности, происходит повышение осмотического давления внутриклеточной

¹ Пушкарь Н. С., Белоус А. М. Введение в криобиологию. Киев : Наукова думка, 1975.

жидкости за счет гипергликемии и выхода воды в межклеточное пространство; в итоге концентрация электролитов внутри клетки возрастает. Снижается температура замерзания, метаболизм становится невозможен, возникают препятствия обмену веществ в клетке. Последующее понижение температуры до $-10...-15$ °C приводит к появлению льда, причем сначала кристаллы образуются во внеклеточной части, где ниже осмотическое давление. Кристаллообразование приводит к дальнейшему обезвоживанию клеток и повышению осмотического давления до величины, когда белки теряют свою третичную структуру. Рост кристаллов разрушает клеточные мембраны, клетки подвергаются сжатию и раздавливаются¹.

4.3.4. Репродуктивная медицина

Самые первые результаты по криоконсервации клеток млекопитающих были получены Польджем и коллегами в 1949 г. Тогда они впервые применили криопротектор — глицерин. В настоящее время в медицине широко используется криоконсервация эмбрионов. В последние годы получает все большее распространение практика очень быстрого замораживания ооцитов и эмбрионов с целью достижения витрификации (стеклоподобного состояния льда). Витрификационные среды обычно содержат высокие концентрации этиленгликоля (40 %), фикола (18 %) и сахарозы (10 %) или только этиленгликоля и сахарозы. К 2000 г. наиболее распространенным способом криоконсервации эмбрионов стал метод замораживания эмбриона на стадии зиготы. В этом случае выживаемость эмбрионов составляет 60—80 %, частота их имплантации достигает тех же значений, что и у свежих эмбрионов, — 10—15 %. Используется также криоконсервация эмбрионов на стадии дробления; в зависимости от качества после оттаивания в этом случае выживают 30—80 % эмбрионов².

4.3.5. Промораживание растений

Под зимостойкостью понимают устойчивость растений к отрицательным температурам, а под морозостойкостью — способность переносить резкие понижения температуры ниже -25 °C. Сегодня они хорошо изучены³.

¹ *Тащев Р. К.* Комбинированное лечение новообразований печени с использованием криодеструкции и эндоваскулярной хирургии: дисс. ... д-ра медицинских наук. 1992.

² *Jensen A. K. et al.* 86 successful births and 9 ongoing pregnancies worldwide in women transplanted with frozen-thawed ovarian tissue: focus on birth and perinatal outcome in 40 of these children // *Journal of assisted reproduction and genetics*. 2017. Vol. 34 (3). P. 325—336.

³ *Зальвская О. С., Бабич Н. А.* Зимостойкость и морозостойчивость интродуцентов // *Лесной вестник*. 2014. № 1. С. 105—109; *Strimbeck G. R. et al.* Extreme low temperature tolerance in woody plants // *Frontiers in Plant Science*. 2015. Vol. 6. № 884. P. 1—15.

Растения выдерживают значительное охлаждение и не замерзают, хотя более чем на 70 % состоят из воды¹. Так, яблони повреждаются морозом ниже -45°C . Причиной этого являются особенности льдообразования. В клетках растений содержатся сложные, в том числе коллоидные, растворы, температура замерзания которых ниже 0°C . Кроме того, растения, приспособившись к замораживанию, принимают «специальные меры». Выделяются два основных механизма устойчивости к низким отрицательным температурам. Основной из них заключается в предотвращении образования льда в клетках путем биосинтеза биологических криопротекторов (антифризов). При промерзании растениями вырабатываются и накапливаются биологические криопротекторы (сахара, энергоемкие жиры), окисление которых сопровождается выделением значительного количества тепла, которое и защищает растение от холода.

Другой механизм состоит в предотвращении образования льда в клетках путем их обезвоживания и перевода воды из клеток в межклеточное пространство, где она, замерзая, не повреждает протоплазму, а окружает клетку ледяной оболочкой и препятствует оттоку из нее тепла². Если замерзание воды в дереве при очень низкой температуре все же произошло, то ткани его разрываются; при этом появляются трещины, проходящие вдоль ствола и ветвей. Интересно, что так называемое закаливание растений, или приобретение растениями устойчивости к морозу, происходит только осенью, когда растения прекращают рост и переходят в состояние покоя. Так, деревья, выдерживающие зимой морозы до -60°C (лиственница, ель, сосна), летом погибают при температуре от -7 до -8°C . Впервые закаливание к морозу на практике применил, вероятно, русский огородник Е. А. Грачев в 1875 г., выдерживая семена кукурузы перед их посевом на снегу в течение двух недель; в результате он получал зрелые початки кукурузы в климате Петербурга³.

В работе Ю. В. Ухатовой и Т. А. Гавриленко⁴ приводится обзор методов криоконсервации, используемых для сохранения генетических ресурсов растений. Эти методы для длительного хранения генофонда культурных растений используются сравнительно недавно. В их число входят методы быстрого замораживания: инкапсуляции-

¹ Plant cold hardiness: molecular biology, biochemistry, and physiology / ed. by P. H. Li, T. H. N. Chen. Corvallis, Oregon, USA, 1996.

² Куцакова В. Е. и др. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Ч. 1. Теоретические основы консервирования. М. : Колос, 2001.

³ Генкель П. А. Физиология устойчивости растительных организмов // Физиология сельскохозяйственных растений. Т. 3. М., 1967.

⁴ Ухатова Ю. В., Гавриленко Т. А. Методы криоконсервации вегетативно размножаемых культурных растений // Биотехнология и селекция растений. 2018. Т. 1 (1). С. 52—63.

дегидратации, витрификации, инкапсуляции-витрификации, капель-метод, капель-витрификации. Влияние низких и сверхнизких температур на жизнеспособность семян плодовых и ягодных растений рассмотрено в статье Г. Ф. Сафиной¹, где показано, что семена груши, яблони, крыжовника, красной и черной смородины с влажностью 5—6 % можно хранить при температуре –18 °С в течение нескольких лет без снижения их жизнеспособности.

4.3.6. Крионика

Возможно, именно Россия является родиной крионики, что, в общем, неудивительно, учитывая, сколько изобретений, намного опередивших время, было в ней сделано, а также число неудач, которых потерпело ее общество. Правда, еще во второй половине XVIII в. английским хирургом Д. Хантером было высказано предположение, что жизнь человека можно продлить путем замораживания и оттаивания. В начале XX в. идеи физического бессмертия, достижимого через научный прогресс, действительно были широко распространены в России. В их разработке главную роль сыграли философ Н. Ф. Федоров², доказывавший возможность и необходимость воскрешения всех умерших их потомками, а также И. И. Мечников³, известный разработкой методов предотвращения старения, один из основателей геронтологии. Он известен также тем, что одним из первых переливал себе кровь молодых людей, надеясь на омолаживание.

Воздерживаясь здесь от критики идей крионики, следует напомнить, что еще К. Э. Циолковский думал о замораживании людей и достижении таким путем человеческого бессмертия. Интересовался анабиозом и П. Ю. Шмидт⁴. Глубокое охлаждение для продления человеческой жизни предложил использовать все тот же Порфирий Бахметьев⁵, чьи идеи получили широкую известность. Вокруг него в начале XX в. существовала группа энтузиастов, собиравшаяся таким образом отправиться в будущее. Он пытался замораживать летучих мышей. Д. И. Менделеев спорил с ними, убеждал, что замораживание влечет за собой неминуемую смерть. После кончины Бахметьева в 1913 г., революции и Гражданской войны группа распалась, хотя один из руководителей страны в тот период, Л. Б. Кра-

¹ Сафина Г. Ф. Влияние низких и сверхнизких температур на жизнеспособность семян плодовых и ягодных растений // Информационный вестник ВОГиС. 2008. Т. 12. № 4. С. 541—547.

² Федоров Н. Ф. Сочинения. М. : Мысль, 1982.

³ Мечников И. И. Этюды о природе человека. 6-е изд., стер. М. : Издательство Юрайт, 2020.

⁴ Шмидт П. Ю. Анабиоз. М. ; Л., 1955.

⁵ Бахметьев П. И. Теоретические и практические следствия из моих исследований анабиоза у животных // Природа. 1912. № 12.

син, известный как один из сторонников Бахметьева, добивался того, чтобы ему разрешили заморозить тело В. И. Ленина.

Следует подчеркнуть, что многочисленные эксперименты по замораживанию больших животных, особенно интенсивно предпринимавшиеся в течение XIX в., были в основном неудачными. В периодической печати, однако, время от времени появляются сообщения, достоверность которых невозможно установить, о возвращении к жизни замерзших людей. Так, в 1961 г. нашли замерзшего в казахской степи тракториста В. Харина. Его тело за несколько часов обледенело так, что по нему можно было постукивать как по твердому предмету; утверждается, что доктора вернули его к жизни. Или есть история, как спасли студента в штате Мичиган, после того как он пролежал в ледяной воде на дне озера около 40 мин. Сообщается, что японец Массару Сайто, водитель рефрижератора, спрятался от жары в своем фургоне при температуре -10°C ; его обнаружили, когда он замерз, и оживили. Есть также сообщение прессы, что ученые из калифорнийской компании «Боитайм» оживили замороженных бабуинов. Едва ли эти факты, однако, могут служить надежным свидетельством.

Личинки и гусеницы полярных бабочек действительно оживают при оттаивании¹. Имеются рассказы полярников об оживании замерзших рыб и даже собак, а также уникальная публикация П.Н. Каптерева², который свидетельствует, что при пробивке шурфа на лугу, прилегающем к Сквородинской мерзлотной станции, на глубине 3,5 м, т. е. на 1 м глубже границы оттаивающего слоя, в вечной мерзлоте, 8 мая 1934 г. были обнаружены живые рачки, относящиеся к ветвистоусым низшим ракообразным. Это сообщение, при всей его фантастичности, требует тщательного изучения. К сожалению, биология вечной мерзлоты, несмотря на огромную территорию ее распространения, до сих пор очень плохо изучена.

В 1962 г. профессор физики из США Роберт Эттингер опубликовал книгу «Перспективы бессмертия»³. В ней он обосновывал точку зрения, что изменения, происходящие в человеческом теле при глубоком замораживании (даже в случае образования кристаллов льда), носят потенциально обратимый характер. Вскоре после этого выяснилось, что другой американец, Эван Купер, в 1962 г. также частным образом опубликовал книгу близкого содержания «Бессмертие: физическое, научное, сейчас». Эттингер и Купер основали в 1963 г. в Вашингтоне Общество продления жизни. Интересно, что на Купера оказала влияние пьеса Владимира Маяковского «Клоп», главный герой которой был случайно заморожен в 1929 г.,

¹ Lee R. Insect cold-hardiness: To freeze or not to freeze // Bioscience. 1989. Vol. 39. P. 308—313.

² Каптерев П. Н. Оживление организмов из вечной мерзлоты.

³ Эттингер Р. Перспективы бессмертия : пер. Д. А. Медведева. М. : Научный мир, 2003.

а через 50 лет разморожен и оживлен. Вероятно, Маяковский знал об идеях Бахметьева.

Таким образом, Эттингер обосновал идею крионики — замораживания умерших после смерти с целью оживления их в будущем. На сегодняшний день идея крионики по-прежнему отвергается большинством специалистов. Тем не менее среди поддерживающих ее есть такие, как известный криобиолог Грегори Фэй. В России выступал в ее защиту известный физиолог и реаниматолог, доктор медицинских наук, академик РАМН В. А. Неговский. На 2014—2016 гг., по данным «Левада-Центра», около 15 % россиян были заинтересованы в том, чтобы крионировать себя или своих родственников¹.

Пока большинство криопациентов находятся в двух крупнейших крионических фирмах — в Институте крионики под руководством Эттингера и в фирме ALCOR. Сама процедура стоит относительно недорого, примерно до ста тысяч долларов, и требуется около 850 долл. в год для поддержания температуры и хранения. Институт крионики использует более дешевую технологию медленного охлаждения (в парах жидкого азота) с применением криопротекторного раствора на основе глицерина, разработанного Ю. Пичугиным, ранее работавшим в Институте проблем криобиологии и криомедицины (Харьков).

Фирма ALCOR использует более дорогую технологию витрификации, с применением криопротекторов и высоких давлений, разработанную под руководством Г. Фэя. Считается, что прежде всего необходимо быстро охладить ткани с начальной температуры 37 °С до 10 °С, потому что каждые 10 °С снижают скорость метаболизма примерно в 2 раза. Замораживание проводится в несколько этапов; в ванне изо льда и силикона тело сначала охлаждают до температуры –31 °С, потом до –79 °С. На следующем этапе с помощью жидкого азота за 7—10 дней температуру понижают до –196 °С, и тело помещают в контейнер.

В 1967 г. в Калифорнии был заморожен первый человек, профессор Джемс Бэдфорд, тело которого сохраняется в жидком азоте. Узнав, что умирает от рака легких, он согласился на то, чтобы его заморозили. Однако многие пациенты после процедуры были заморожены и похоронены обычным образом из-за финансовых проблем: деньги выплачивали родственники пациентов, а они в конечном счете отказывались платить. В прессе сообщается, что сегодня в фирме ALCOR находятся на хранении тринадцать тел и двадцать две головы (утверждают также, что на самом деле замороженных около 120, в их числе Уолт Дисней, Сальвадор Дали, Элвис Пресли

¹ Смыслов В. Замерзшие из Сергиева Посада: кто крионирует людей в России и в мире и сколько это стоит. [Электронный ресурс]. URL: <https://vc.ru/future/19625-cryonics> (дата обращения 23.11.2020).

и Чарли Чаплин), а еще несколько сот человек, потенциальных клиентов, заключили с обществом контракты. В контрактах предусмотрено: ALCOR стопроцентной гарантии, что пациенты воскреснут, не дает.

Интересна идея использования для целей хранения биологических объектов вечной мерзлоты, в нашей стране высказывавшаяся, например, П. Н. Каптеревым¹. Энтузиасты крионики на Западе подсчитали, что в этом случае затраты снизятся до 10 000 долл. Ассоциация крионики Канады участвовала в двух захоронениях в вечной мерзлоте — в Инувике и Йеллоунайфе; еще одно захоронение было организовано частным образом. Считается, что температуры мерзлых пород недостаточно низки. Однако в той же Канадской Арктике есть области, где средняя годовая температура пород ниже -20°C ; для этих территорий даже глобальное потепление, возможно, не стало бы критическим. Однако при такой температуре активность ферментов все-таки еще фиксируется. Кроме того, в Британской Колумбии, например, в 1990 г. издали закон, вообще запрещающий подобные процедуры.

Несомненно, однако, что существующие в России подземные лаборатории в Амдерме, Игарке и Якутске, а также в других странах, например на Аляске в США, целесообразно использовать для биологических экспериментов, что предлагал в свое время П. Н. Каптерев. Независимость от внешних источников энергии и условий обслуживания, надежность таких хранилищ позволит провести действительно длительные опыты. Исключительно перспективным представляется исследование в таких лабораториях микроорганизмов и их жизнедеятельности при низких температурах (см. тему, посвященную внеземной криосфере). Способность некоторых микроорганизмов, бактерий и грибов сохранять жизнеспособность длительное время, в течение десятилетий и даже, возможно, тысячелетий, при таких сравнительно высоких отрицательных температурах ($-3\dots-5^{\circ}\text{C}$), когда химические реакции в клеточном растворе продолжают, предполагает существование механизма, предотвращающего накопление повреждений и старение клетки. Исследование таких бактерий, возможно, позволит приблизиться к разрешению древней загадки старения и смерти.

4.4. Живое вещество в криолитозоне

4.4.1. Микроорганизмы в мерзлых породах

Биологическим проблемам криолитогенеза, как и литогенеза вообще, уделяется неоправданно мало внимания. Именно условия

¹ Каптерев П. Н. Оживление организмов из вечной мерзлоты.

Земли с ее жидкой водой являются единственными из известных, подходящими для живых организмов. В то же время жизнедеятельность и ее продукты, изменяющие состав и строение горных пород, представляют собой важный компонент криолитогенеза. Микроорганизмы встречаются везде, и без их участия не обходятся ни выветривание, ни перенос материала, ни седиментация, ни диагенез осадков¹. Описано уже более 100 минералов, образование которых может быть связано с деятельностью бактерий². Установлено, что микроорганизмы выживают на Земле в условиях криолитозоны. Поэтому было бы неправильно исключать возможность жизни в космосе на том основании, что ее там пока не нашли. Кроме того, этот вопрос имеет и огромное естественнонаучное и философское значение.

Жизнь на Земле, определяющая характер многих экзогенных геологических процессов, оказывает большое влияние на криолитозону, изменяя за счет изолирующего влияния растительности температурный режим поверхности, состав и строение слоя оттаивания и мерзлоты, газосодержание в мерзлых породах. Исследования жизни в мерзлоте в земных условиях могут совершенно поменять представления не только о возможности ее существования на других планетах, но и пролить свет на загадку ее происхождения, а также принести новые фундаментальные открытия в биологии.

Долгое время даже вопрос существования микроорганизмов в глубоких слоях литосферы не вызывал большого интереса³; в основном считалось, что жизнь на планете существует только в небольшом поверхностном слое. Но существовало и другое мнение, подкрепляемое данными о микроорганизмах в литосфере⁴. Микробная жизнь в литосфере существует и представлена особыми

¹ Розанов А. Ю. Ископаемые бактерии и новый взгляд на процесс седиментации // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 63—68.

² Tazaki K. Biomineralization of layer silicates and hydrated Fe/Mn oxides in microbial mats: An electron microscopical study // *Clays and Clay Minerals*. 1997. Vol. 45. P. 203—212.

³ Добровольский Г. В. Педосфера — оболочка жизни планеты Земля // *Биосфера*. 2009. № 1. С. 6—14.

⁴ Гинзбург-Карагичева Т. Л. Микробиологическое исследование серносоленых вод Апшерона // *Азерб. нефт. хоз-во*. 1926. № 6. С. 30—34; Соколов Д. В. О микроорганизмах в подпочвенных слоях и о биохимических факторах выветривания // *Известия Академии наук СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук*. 1932. № 5. С. 693—712; Вернадский В. И. О пределах биосферы // *Известия АН СССР. Серия геология*. 1937. № 1. С. 3—24; Кузнецов С. И., Иванов М. В., Ляликова Н. Н. Введение в геологическую микробиологию. М.: Изд-во АН СССР, 1962; Виноградский С. Н. Микробиология почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1952; Верховцева Н. В., Кондакова Г. В. Микробиологические исследования пород и подземных вод // *Сверхглубокое бурение Пучеж-Катунской импактной структуры*. СПб.: ВСЕ-ГЕИ, 1999. С. 176—186; Lopez-Garcia P. Extremophiles // *Lectures in Astrobiology* / eds. M. Gargaud, B. Barbier, H. Martin, J. Reisse. New York, NY, USA : Springer, 2008.

сообществами¹; примером могут служить метаногенные бактерии, выделенные на больших глубинах из подземных вод нефтегазовых месторождений².

Интересно, что поиски жизни на Марсе начались, возможно, даже ранее, чем изучение жизни в мерзлоте. Их история драматична и поучительна. Существовало несколько аргументов в пользу существования биосферы на Марсе, среди которых особенно убедительной была давно известная способность темных областей восстанавливаться после сильных пылевых бурь³. Действительно, бури должны были бы покрыть поверхность планеты однородным слоем пыли, если бы растительность не восстанавливала первоначальный вид. В то же время низкие давления и температуры, малое содержание воды в атмосфере, отсутствие кислорода делают Марс непригодным для жизни. Однако известно, что в условиях, аналогичных марсианским, многие почвенные бактерии по крайней мере не погибают; их много в любом взятом наугад образце почвы на Земле. К сожалению, биологические эксперименты с марсианским грунтом не принесли результатов; высокий уровень ультрафиолетовой радиации на поверхности и обнаружение там перекисных соединений также оставляют немного надежд.

Дж. Бернал однажды сказал, что молекула ДНК, породившая некогда на берегу первобытного океана всю остальную жизнь, выглядит, пожалуй, даже менее правдоподобно, чем Адам и Ева в райском саду⁴. Действительно, как за сравнительно короткий срок — а сейчас предполагается, что это около 500 млн лет или менее — могла возникнуть жизнь? Хотя представить прокариотную биосферу архея ранее 3,5 млрд лет назад затруднительно из-за отсутствия должных геологических данных. Напрашивается предположение, что она могла быть привнесена извне. В таком случае перелет потребовал бы огромного количества времени, и клетки, если все было именно так, должны были выжить при низких температурах космического пространства. Возможно, какие-то из привнесенных необычайно

¹ *Аширов К. Б.* Жизнедеятельность пластовой микрофлоры как индикатор геологических условий и процессов, протекающих в нефтяных пластах // Труды Ин-та микробиологии АН СССР. 1961. Вып. 9; *Альтовский М. Е. и др.* Органические вещества и микрофлора подземных вод, и их значение в процессах нефтегазообразования. М. : Гостоптехиздат, 1962; *Беляев С. С. и др.* Развитие микробиологических процессов в разрабатываемых пластах Ромашкинского нефтяного месторождения // Микробиология. 1990. Т. 59. № 6. С. 1118—1125.

² *Кожевин П. А.* Микробные популяции в природе. М. : Изд-во МГУ, 1989; *Кондакова Г. В., Верховцева Н. В., Рутковская О. М.* Биологический цикл метана в подземной биосфере // Материалы Первой международной конференции «Циклы природы и общества» (25—30 октября 1996 г., Ставрополь). Ставрополь, 1996. С. 128—130.

³ *Маров М. Я.* Планеты Солнечной системы. М. : Наука, 1986.

⁴ *Горбачев В. В.* Концепции современного естествознания. В 2 ч. / Московский государственный университет печати. М. : Изд-во МГУП, 2000.

живучих организмов не изменились и живы до сих пор. Тогда древняя мерзлота — именно то место, где их следует искать.

В последние годы появилось много материалов о возможностях живых организмов существовать в экстремальных условиях длительное время. Существует точка зрения (Г. А. Заварзин), по которой в истории происходило постоянное не развитие биосферы, а ее сужение. И экстремофилы на самом деле показывают ту большую область жизни, которая была, но постепенно исчезла по мере усложнения. Хорошо изучена способность некоторых видов бактерий переносить очень высокий уровень радиации. Установлено, что бактерии могут развиваться как при отрицательных, так и при очень высоких (до ста градусов) положительных температурах. Но, пожалуй, наиболее удивительным свойством бактерий является возможность длительного сохранения жизнедеятельности индивидуальным организмом при нахождении в неблагоприятных условиях.

На рубеже веков биологи университета штата Пенсильвания в США обнаружили живые бактерии в кристаллах соли, имеющих возраст 250 млн лет¹. Если учесть, что целенаправленные работы по поиску живых микроорганизмов в древних породах не проводятся, то возраст наиболее древних живых организмов на Земле еще не установлен. Столь необычные свойства бактерий, вероятно, связаны с их строением. Для биологов XIX в. бактерии казались наиболее примитивными формами жизни, их ничтожные размеры казались несовместимыми со сколько-нибудь значимым морфологическим дифференцированием. Но уже в 1912 г. появилась первая монография («Бактериальная клетка» Мейера), показывающая сложность организации бактерий и выполняемых ими функций.

К настоящему времени установлено, что бактерии представляют собой сложнейшую систему, включающую в себя как ДНК, так и РНК. Удивительна возможность бактерий при возникновении неблагоприятных условий образовывать споры, переходя из живого организма, с динамично протекающими процессами энерго- и массообмена, в покрытое жестким панцирем образование с замедленными (или остановленными) процессами метаболизма. Находясь в таком состоянии сотни тысяч лет (а возможно, и сотни миллионов лет) и подвергаясь жесточайшим воздействиям внешней среды, бактерии при создании благоприятных условий, вероятно, могут возвращаться к своей обычной жизнедеятельности. Причем выживающие в течение миллионов лет бактерии вовсе не всегда образуют споры². Впрочем, вероятно, это и не так уж удивительно —

¹ Vreeland R. H., Rosenzweig W. D., Powers D. W. Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal // *Nature*. 2000. Vol. 407 (6806). P. 897—900.

² Greenblatt C. et al. *Micrococcus luteus* — survival in amber // *Microb. Ecol.* 2004. Vol. 48. P. 120—127.

споры имеют всего лишь примерно меньше на 17 % воды (которая является часто сопутствующим или главным повреждающим ДНК фактором) чем бактериальные клетки¹.

Поразительно, что даже бактерии способны полностью или частично восстанавливать исходную структуру поврежденной ДНК. Существующая в бактериях система репараций сходна с аналогичными системами более высокоорганизованных живых организмов, включая человека². Сегодня нет сомнений, что именно утрата этого механизма играет решающую роль не только в онкогенной трансформации клетки, но и старении³.

Перечисленные выше проблемы свидетельствуют о том, что изучение древних микроорганизмов является одним из важнейших направлений современной науки. Возможно, наибольших успехов в этом направлении можно добиться, изучая мерзлые породы.

Так как большая часть земной поверхности имеет температуру ниже 5 °С, способность клеток к существованию при низких температурах имеет важное значение для их способности к выживанию⁴. Первые свидетельства жизнеспособности микроорганизмов из мерзлоты появились в девятнадцатом столетии⁵. Большинство исследований микроорганизмов проводилось в Арктических и Антарктических мерзлых породах, которые не оттаивали в течение нескольких миллионов лет. Согласно этим результатам некоторые выделенные из мерзлых пород бактерии оказались способны к росту при повышении температур до положительных значений⁶. Изучение мерзлых морских осадков с полуострова Ямал, выполненное одним из авторов данного курса летом 1999 г., подтвердило такую возможность. Эти отложения не таяли в течение по крайней мере последних сокока тысяч лет и имели среднюю температуру около –4 °С.

С. С. Абызов⁷ обнаружил во льду на Антарктической станции «Восток» бактерии, грибы, диатомеи и другие микроорганизмы. Циано-

¹ *Nicholson W. L. et al.* Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments // *Microbiology and molecular biology reviews*. 2000. Vol. 64 (3). P. 548—572.

² *Žgur-Bertok D.* DNA damage repair and bacterial pathogens // *PLoS Pathog.* 2013. Vol. 9 (11). e1003711.

³ *Lodish H. et al.* *Molecular cell biology*. 4th edition. New York : W. H. Freeman, 2000. Sect. 12.4; *Maynard S. et al.* DNA damage, DNA repair, aging, and neurodegeneration // *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*. 2015. Vol. 5 (10), a025130.

⁴ *Morita R. Y.* *Bacteria in oligotrophic environments*. New York : Chapman & Hall, 1997.

⁵ *Исаченко Б. Л.* Некоторые данные о бактериях из вечной мерзлоты // *Известия Санкт-Петербургского Ботанического сада*. 1912. Т. 2. Вып. 5—6. С. 140—168.

⁶ *Gilichinsky D., Wagener S.* Microbial life in permafrost: a historical review // *Permafrost and Periglacial Processes*. 1995. Vol. 6. P. 243—250.

⁷ *Абызов С. С. и др.* Микробиологические исследования ледяного керна из глубоких скважин ледника Центральной Антарктиды // *Информ. бюл. САЭ*. 1989. № 111. С. 86—91.

бактерии были найдены глубоко в Антарктическом ледяном щите на глубине 3600 м, их возраст соответствует возрасту льда на этой глубине и составляет около 500 тыс. лет. Рост выделенных штаммов происходит при широком диапазоне температур от 4 до 50 °С.

Большинство микроорганизмов не размножается при температурах ниже 0 °С, хотя, как это было установлено впервые еще в 1887 г. Фостером, имеются бактерии, способные к росту при отрицательных температурах. Метаболизм бактерий в вечной мерзлоте был отмечен при температурах около –20 °С¹ и даже ниже². Бактериальное сообщество было найдено в Антарктической вечной мерзлоте³. Имеются некоторые другие факты относительно роста бактерий ниже 0 °С⁴. Рост бактерий, например, наблюдался при –10 °С⁵. Ферменты могут быть активны при температуре –20 °С и ниже⁶. Некоторые дрожжи растут при температурах ниже 0 °С. Вода внутри клеток не замерзает иногда и при температуре –20 °С⁷, это было, например, установлено для *Mytilus edulis* и *Littorina rudis*⁸.

При низкой температуре происходят изменения со стороны экстракорпоральных структур и компонентов мембраны микроорганизмов: уменьшаются размеры бактериальных клеток, формируются жгутики и не образуются фимбрии и гемагглютинины, усиливается степень агрегированности термозависимого белка наружной мембраны, формируются длинные О-специфические полисахаридные боковые цепи липополисахаридов, изменятся характер полипептидного состава бактерий, увеличивается степень ненасыщенности жирных кислот⁹.

В настоящее время проблема развития бактерий при отрицательных температурах еще далека от своего разрешения. Считается, что

¹ Rivkina E. M. et al. Metabolic activity of permafrost bacteria below the freezing point // Applied and Environmental Microbiology. Aug 2000. Vol. 66 (8). P. 3230—3233.

² Panikov N. S. et al. Microbial activity in soils frozen to below –39 °С // Soil Biol Biochem. 2006. Vol. 38. P. 785—794

³ Gilichinsky D. A. et al. Microbial populations in Antarctic permafrost: biodiversity, state, age, and implication for astrobiology // Astrobiology. 2007. Vol. 7 (2). P. 275—311.

⁴ Jansson J., Taş N. The microbial ecology of permafrost // Nat. Rev. Microbiol. 2014. Vol. 12. P. 414—425.

⁵ Bakermans C. et al. Reproduction and metabolism at –10 °С of bacteria isolated from Siberian permafrost // Environmental microbiology. 2003. Vol. 5 (4). P. 321—326.

⁶ Ченцов В. С. и др. Влияние гамма-излучения, низкого давления и низкой температуры на активность каталазы и реакционную способность экзометаболитов *Kocuria rosea* и *Arthrobacter polychromogenes* // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 5. С. 25133.

⁷ Wolfe J., Bryant C., Koster K. L. What is unfreezable water, how unfreezable is it and how much is there? // Cryo Letters. 2002. Vol. 23. P. 157—166.

⁸ Kanwisher J. W. Freezing in intertidal animals // Biol. Bull. 1955. Vol. 109. P. 56—63.

⁹ Воронин Е. С. и др. Ветеринарная микробиология и иммунология. Электронный дидактический комплекс. URL: <https://nsau.edu.ru/images/vetfac/images/ebooks/microbiology/index.htm> (дата обращения: 23.11.2020).

в клетках микроорганизмов имеется ряд органических криопротекторов и используются сложные механизмы, чтобы защитить клетки от ледяной кристаллизации¹. Это позволяет им жить в течение нескольких лет в переохлажденном состоянии². Таким образом, сегодня имеется ряд доказательств, что некоторые микроорганизмы, сохраняемые во льду и вечной мерзлоте в течение длительного времени, могут не только сохраняться в анабиотическом состоянии, но и продолжать жизнедеятельность.

Способны ли микроорганизмы в вечной мерзлоте к делению и росту? Принципиально, в свете известных данных, — да. Однако, не отрицая эту возможность развития микроорганизмов в мерзлых породах, следует признать, что в реальных условиях и, главное, в течение длительного времени она, по-видимому, трудно реализуема. Микроорганизмы в многолетнемерзлых породах находятся на самом краю возможного существования. Даже при благоприятных условиях бактерии в культуре, как известно, постепенно, но довольно быстро теряют способность к росту — наблюдается эффект *старения культуры*³. Интересно, что и наши собственные клетки также теряют эту способность с течением времени, вызывая различные патологические процессы⁴). Промерзание почвы и кристаллизация воды резко уменьшает способность к микробному росту⁵. Поры замерзающей породы, как правило, насыщаются на 85—90 % и более льдом⁶, таким образом, микроорганизмы в вечной мерзлоте оказываются практически изолированными среди минеральных частиц и льда, лишены способности движения — пространство, которое занимают бактерии, возможно, лишь немного больше их собственного размера. Следовательно, условия для роста скорее всего отсутствуют или неблагоприятны.

Специально следует рассмотреть возможность проникновения в мерзлые толщи микроорганизмов извне. Казалось бы, само строение мерзлых толщ должно способствовать этому благодаря нали-

¹ Костяев А. А и др. *Анналы криобиологии. Классификации криопротекторов и криоконсервантов для клеток крови и костного мозга // Вестник гематологии. 2016. № 3. С. 23—27.*

² De Vries A. L. *Biological antifreeze agents in coldwater fishes // Comp. Biochem. Physiol. A. 1982. Vol. 73. P. 627—640.*

³ Баснакьян И. А. *Культивирование микроорганизмов с заданными свойствами. М. : Медицина, 1992; Чернявская М. И. и др. Экологическая микробиология : учеб.-метод. пособие. Минск : БГУ, 2016.*

⁴ Малыгина Н. А. *Старение клеток и возрастзависимые заболевания // Клиническая геронтология. 2014. № 3-4. С. 30—34.*

⁵ Nedwell D. B. *Effect of low temperature on microbial growth: lowered affinity for substrates limits growth at low temperature // FEMS Microbiology Ecology. 1999. Vol. 30. P. 101—111.*

⁶ Harris S. A., Brouckov Guodong C. *Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms, Leide, The Netherlands : CRC Press, 2018.*

чию пленок незамерзшей воды. Незамерзшая вода в мерзлых породах при отрицательных температурах — необходимый элемент их структуры. Однако проникновение микроорганизмов в мерзлые породы по пленкам незамерзшей воды, очевидно, невозможно, потому что отсутствуют проводящие пути соответствующего размера. Лишь в значительно засоленных породах это, по-видимому, возможно. Прослой незамерзшей воды при температурах -3 и -4 °С очень тонкие. Их толщина составляет¹, вероятно, приблизительно 0,01—0,1 мкм, т. е., как правило, меньше, чем размеры микроорганизмов, которые составляют по крайней мере 0,3—1,4 мкм и более. Недавно были получены экспериментальные данные, подтверждающие невозможность переноса бактериальных клеток в мерзлых породах². Таким образом, можно предположить, что во многих случаях микроорганизмы, находящиеся в многолетнемерзлых породах, представляют собой не новые молодые поколения и не привнесенные извне, а древние первичные организмы.

Если микроорганизмы в вечной мерзлоте живы, но не способны к делению, какой механизм поддерживает их жизнеспособность? Рассмотрим стабильность белка и ДНК. Молекула ДНК содержит четыре азотистых основания — аденин (А), цитозин (Ц), гуанин (Г) и тимин (Т), из которых цитозин представляет собой наименее химически устойчивое соединение³. Сама структура генетического кода для всего живого одинакова, а с возникновением мутаций связана и проблема старения организма⁴. Информационные молекулы наследственности ДНК, которые содержат информацию для построения других биомакромолекул, в результате действия мутаций повреждаются⁵. Нарушение структуры молекул ДНК приводит к нарушению генетического кода, а это делает невозможным сохранение и передачу необходимой генетической информации, обеспечивающей развитие признаков, присущих организму.

Сейчас принято считать, что именно вследствие потери части информации, хранящейся в ДНК, и происходит старение⁶. По суще-

¹ Фрумкин А. Н. Современное состояние проблемы потенциалов нулевого заряда // Материалы 3-го симпозиума «Двойной слой и адсорбция на твердых электродах» (Тарту, 11—13 июня 1972 г.). Тарту : Изд-во Тартуского ун-та, 1972. С. 5—29; Wolfe J., Bryant C., Koster K. L. What is unfreezable water, how unfreezable is it and how much is there? // *Cryo Letters*. 2002. Vol. 23. P. 157—166.

² Карнышева Э. А., Филиппова С. Н., Брушков А. В. Изучение способности клеток микроорганизмов к миграции в мерзлых породах разной дисперсности // *Арктика и Антарктика*. 2019. Т. 1. С. 53—63.

³ Levy M., Miller S. L. The stability of the RNA bases: Implications for the origin of life // *Biochemistry*. 1998. № 95 (14). P. 7933—7938.

⁴ Maynard S. et al. DNA damage, DNA repair, aging, and neurodegeneration // *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*. 2015. Vol. 5 (10), a025130.

⁵ Bernstein C. et al. DNA damage, DNA repair and cancer // *New research directions in DNA repair* / ed. C. Chen. 2013.

⁶ Maynard S. et al. DNA damage, DNA repair, aging, and neurodegeneration.

ству, продолжительность жизни определяется способностью репаративных ферментов «ремонттировать» поврежденные участки ДНК и тем самым сохранять информацию. Поскольку мутации происходят и в неделящихся соматических клетках, то именно мутации **будут определять** максимальную продолжительность жизни многоклеточных организмов.

Известно, что белки клеток также неустойчивы¹, например 40 % белков печени крысы распадается в течение дня; максимальный период полураспада, установленный для белков, — приблизительно 95 дней; для ДНК ткани мыши это приблизительно 5 дней². Среднее время жизни большинства глобулярных белков находится в диапазоне 2—200 ч³, т. е. они имеют сравнительно короткий период жизни. В то же время изучение теплового распада некоторых ферментов показало, что их максимальный период полураспада составляет приблизительно 12 000 дней⁴). Тем не менее это не тысячи лет.

Имеется мнение, основанное на экспериментах, что в организме в состоянии анабиоза не происходит никаких химических и биологических реакций⁵. С другой стороны, на клеточные структуры воздействуют температурные изменения, радиация, давление. Тепловое движение атомов и молекул также является сильным разрушающим фактором, потому что температура далека от абсолютного нуля. Цитоплазма клетки полностью не замерзает, очень вероятно, она не замерзает вообще: значения $-2...-5$ °C недостаточно низки. Поэтому трудно предположить, что организм в анабиозе находится в состоянии термодинамического равновесия, которое в природных условиях недостижимо.

Молекулярные основы тепловой стабильности биологических материалов представляют собой сложную проблему⁶. В целом стабильность белка определяется величиной свободной энергии G для

¹ Current medical diagnosis and treatment / Ed. by L. M. Tierney, S. J. McPhee, M. A. Papadakis. 42th edition. McGraw-Hill : Lange Med. Books, 2003.

² Dean R. G., Cutler R. G. Absence of significant age-dependent increase of single-stranded DNA extracted from mouse liver nuclei // Exp. Gerontol. 1978ю Vol. 13 (5). P. 287—292.

³ Финкельштейн А. В., Птицын О. Б. Физика белка : курс лекций с цветными и стереоскопическими иллюстрациями и задачами. 4-е изд., испр. и доп. М. : Книжный дом Университет, 2012.

⁴ Segal H. L. et al. What determines the half-life of proteins in vivo? Some experiences with alanine aminotransferase of rat tissues // Biochemical and Biophysical Research Communications. 1969. Vol. 36. P. 764—770.

⁵ Hinton H. E. Reversible suspension of metabolism and the origin of life // Proc. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. 1968. Vol. 171 (1022). P. 43—57.

⁶ Baker D., Agard D. Kinetics versus thermodynamics in protein folding // Biochemistry. 1994. Vol. 33. P. 7505—7509; Jaenicke R. Stability and folding of ultrastable proteins: eye lens crystallins and enzymes from thermophiles // FASEB J. 1996. Vol. 10. P. 84—92; Pucci F., Rooman M. Physical and molecular bases of protein thermal stability and cold adaptation // Curr. Opin. Struct. Biol. 2017. Vol. 42. P. 117—128.

реакции «свернутая — развернутая структура» при физиологических условиях. Большинство белков характеризуются значением $G = 5 \div 15$ ккал/моль (около 20—60 кДж/моль). При этом существует большой разброс данных, есть очень высокие значения, но проблема в том, что энергия активации определяется в экспериментах по тепловой денатурации¹. В терминах термодинамики, очень упрощенно, доля разрушенных областей структуры, отнесенная к доле упорядоченных областей (k), представляется следующей:

$$k = e^{-\frac{G}{RT}},$$

где G — свободная энергии перехода от упорядоченной области к случайной, ккал/моль; T — температура, К; R — газовая константа, $\sim 0,008333$, кДж/(моль·К). Подобное выражение может быть использовано для приблизительной оценки времени существования (T_e) белков:

$$T_e = te^{-\frac{G}{RT}},$$

где t — период температурных колебаний молекул, приблизительно 10^{-12} — 10^{-13} с. Вычисления на основе последнего выражения показали, что даже для условия $G = 105$ кДж/моль время существования молекулярных связей составляет менее 300 лет. Для периода температурных колебаний молекул 10^{-8} — 10^{-9} с и $G = 83$ кДж/моль время существования молекулярных связей — менее года. Максимальное же известное значение энергии активации — приблизительно 188 кДж/моль, обычно — намного меньше².

Приведенные оценки очень приблизительны, но и они показывают, насколько нестабильны белки и ДНК. Примечательно, что интерпретация экспериментальных данных по стабильности ДНК, правда, в водных растворах, также показывает, что из-за неустойчивости **циторина** максимальная продолжительность жизни ДНК составляет несколько сот лет и довольно слабо зависит от температуры³. Небольшие изменения температуры, непредсказуемое влияние радиации и химических реакций в среде вечной мерзлоты — другие способы уничтожить биологический материал. Проблемы, которые возникают в клетке при действии радиации или дегидра-

¹ Vogl T. et al. Thermodynamic stability of annexin VE17G: equilibrium parameters from an irreversible unfolding reaction // Biochemistry. 1997. Vol. 36. P. 1657—1668; Мельник Т. Н. и др. Исследование тепловой денатурации зеленого флуоресцентного белка методом дифференциальной сканирующей микрокалориметрии // Вестник СПбГУ. Серия 4. Физика. Химия. 2009. № 3. С. 137—142.

² Александров В. Я. Клетка, макромолекула и температура. Л. : Наука, 1975.

³ Levy M., Miller S. L. The stability of the RNA bases: Implications for the origin of life.

тации, связаны с разрывами, возникающими в ДНК. Известно, что за счет радиоактивных веществ, содержащихся в горных породах, мы поглощаем дозу облучения около 2,4 мГр (или 2,4 мЗв) в год¹, что эквивалентно более $2 \cdot 10^3$ Гр за миллион лет (для человека около 5—15 Гр — смертельная доза). Правда, были найдены некоторые бактерии в урановых рудах и даже в воде атомных реакторов, где ионизирующее излучение превышало $2 \cdot 10^4$ Гр.

Однако повреждающим фактором является прежде всего вода, которая находится в клетке (и в бактериальных спорах). Молекула ДНК в целом гидрофобна², и именно эта гидрофобность, а не водородные связи, как раньше думали, обеспечивает связь между ее двумя нитями³. Однако воды так много, а цепь ДНК так велика, что избежать гидролиза нельзя⁴. Цитозин превращается в результате гидролиза в урацил⁵, и низкие температуры тому не препятствие — в клетке достаточно воды, которая не замерзает⁶. Древняя ДНК умерших организмов достаточно быстро разрушается⁷, через миллион лет уже не найти ни **одного куска** длиннее 100 пар нуклеотидов (при длине бактериального генома в миллионы пар). В некоторых недавних публикациях появляются более точные оценки периода полураспада ДНК, которые говорят о нестабильности этой «молекулы жизни». Так, ее оценивают всего примерно в 520 лет⁸. Следовательно, представляет настоящую загадку, как микроорганизмы выживают в древней мерзлоте.

Таким образом, живые микроорганизмы в вечной мерзлоте (если они появились там во время ее формирования) представляют собой уникальное явление — они должны иметь, очевидно, специальные механизмы восстановления структур клетки, склонных к разрушению из-за огромной продолжительности их существования. В этом случае они должны иметь структурные и биохимические особен-

¹ Василенко О. И. Радиационная экология. М. : Медицина, 2004.

² Спивак И. М. Репликация ДНК : учеб. пособие. Эко-Вектор, 2011.

³ Feng B. et al. Hydrophobic catalysis and a potential biological role of DNA unstacking induced by environment effects // Proceedings of the National Academy of Sciences. Aug 2019. Vol. 116 (35). P. 17169—17174.

⁴ Williams N. H. DNA hydrolysis: mechanism and reactivity // Artificial nucleases. Nucleic acids and molecular biology / ed. M. A. Zenkova. Vol. 13. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004.

⁵ Lewis Jr. et al. Cytosine deamination and the precipitous decline of spontaneous mutation during Earth's history // PNAS. July 2016. Vol. 113 (29). P. 8194—8199.

⁶ Wolfe J., Bryant C., Koster K. L. What is unfreezable water, how unfreezable is it and how much is there?

⁷ Poinar H. N. et al. Metagenomics to paleogenomics: large-scale sequencing of mammoth DNA // Science. 2006. Vol. 311 (5759). P. 392—394; Leonardi M. et al. Evolutionary patterns and processes: lessons from ancient DNA // Syst. Biol. 2017. Vol. 66. P. e1—e29.

⁸ Allentoft M. E. The half-life of DNA in bone: measuring decay kinetics in 158 dated fossils // Proc. R. Soc. B. 2012. Vol. 279. P. 4724—4733.

ности, которые их отличают от существующих микроорганизмов. Они могут иметь что-то подобное двум кольцам ДНК в клеточном ядре, найденным специалистами в Институте исследования генома (Мэриленд, США) внутри бактерии *Deinococcus radiodurans*, который может переживать дозу радиации в 3000 раз больше, чем это необходимо для уничтожения человека¹.

Для исследования микроорганизмов в мерзлых породах были отобраны образцы из обнажений и подземных сооружений в нескольких районах. Одно из них расположено на левом берегу Алдана, в 325 км вверх по течению от его впадения в Лену, на Мамонтовой горе. Образцы были отобраны на 0,9—1 м глубже слоя сезонного оттаивания. Обнажение разрушается рекой (более 10—15 см в год), так что отложения, из которых отбирались образцы, находились, очевидно, в многолетнемерзлом состоянии. Они представляют собой тонкозернистые пески и алевролиты; их возраст соответствует среднему миоцену². Похолодание началось здесь в конце плиоцена, около 3—3,5 млн лет назад. Температура в январе была оценена Н. Т. Бакулиной и В. Б. Спектором³ от –12 до –32 °С, а в июле от +12 до +16 °С. Отложения, по-видимому, не оттаивали в плейстоцене из-за холодного климата Якутии. Таким образом, возраст мерзлоты на Мамонтовой горе, вероятно, может достигать 3,5 млн лет. Кроме того, были отобраны образцы из повторно-жильных льдов ледяного комплекса как в Якутии, так и на Аляске: в тоннеле Фокс и на золотом руднике вблизи Фербенкса. Были также опробованы стенки подземелья Института мерзлотоведения имени П. И. Мельникова в Якутске.

На Мамонтовой горе в мерзлых миоценовых отложениях была найдена бацилла (рис. 4.7), способная к аэробному и анаэробному росту в средах GYP, MRS и NA; оптимальная температура роста — +37 °С. Она также росла при –5 °С. Бацилла представляет собой сравнительно большую (1÷1,5 × 3÷6 мкм) палочку, которая в культуре соединяется в цепи и способна образовывать споры круглой формы. Она неподвижна и обладает гемолитической активностью.

При температуре –5 °С бацилла росла как в замороженной, так и в переохлажденной среде. Ее филогенетическое дерево представлено на рис. 4.8; родственные виды включают *Bacillus simplex*, *B. macroides* и др. Последовательность нового бактериального гена rRNA16S из образцов Мамонтовой горы была депозирована в DDBJ/

¹ Krisko A., Radman M. Biology of extreme radiation resistance: the way of *Deinococcus radiodurans* // Cold Spring Harb Perspect Biol. 2013. Vol. 5 (7). a012765.

² Баранова Ю. П. и др. Миоцен мамонтовой горы (стратиграфия и ископаемая флора). М : Наука, 1976.

³ Бакулина Н. Т., Спектор В. Б. Реконструкция климатических параметров неогена Якутии по палинологическим данным // Климат и мерзлота / под ред. Г. Н. Максимова, А. Н. Федорова. Якутск : Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2000. С. 21—32.

EMBL/GeneBank под номером AB178889, идентификационный номер 20040510203204.24251. Впоследствии было выполнено полное секвенирование генома этой бактерии, данные помещены в DDBJ/EMBL/GenBank под номером ANH100000000¹.

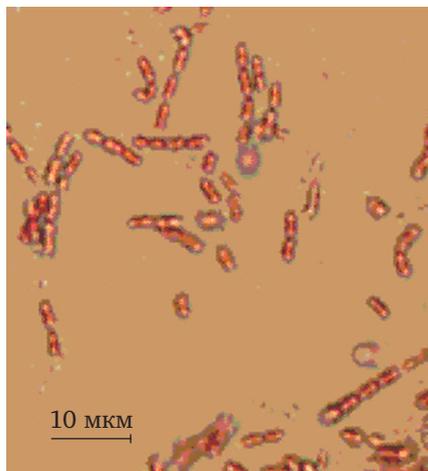


Рис. 4.7. Бактерия из мерзлых отложений Мамонтовой горы

Различие полного генома этой бактерии с геномом одного из современных штаммов *Bacillus cereus* составило менее 1,5 %, что меньше, чем различия между некоторыми другими штаммами *Bacillus cereus*. Некоторых исследователей такое близкое сходство с современной бациллой *Bacillus cereus* разочаровало. Однако это далеко не первый подобный случай «удивительно современной ДНК у древней бактерии»².

Сравнение геномов бактерий из мерзлоты и их современных аналогов показывает сравнительно малое число нуклеотидных замен — если «молекулярные часы» в данном случае не замедляют ход, то этой бацилле не 3,5 млн лет, а только 70 тыс.³ Однако такие микроорганизмы успешно защищают свой геном от разрушения в течение продолжительного времени, значит, вероятно, и от мутаций. Свидетельства непостоянства «молекулярных часов» в последнее время множатся⁴. По нашему мнению, факты находок «новых»

¹ Brenner E. et al. Draft genome sequence of bacillus cereus strain F, isolated from ancient permafrost // Genome announcements. 2013. Vol. 1 (4). e00561-13.

² Nickle D. C. et al. Curiously modern DNA for a 250 Million-Year-Old Bacterium // Journal of Molecular Evolution. 2002. Vol. 54. P. 134—137.

³ Едидин Г. М., Брушков А. В., Игнатов С. Г. Филогенетический анализ микроорганизмов из мерзлых грунтов // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2016. № 5. С. 92—95.

⁴ Lee H. J., Rodrigue N., Thorne J. L. Relaxing the molecular clock to different degrees for different substitution types // Molecular biology and evolution. 2015. Vol. 32 (8). P. 1948—1961.

геномов в «древних» бактериях свидетельствуют не об ошибках в оценке возраста или методах работы, а, вероятно, об удивительно стабильном, «защищенном» геноме — что и следовало ожидать.

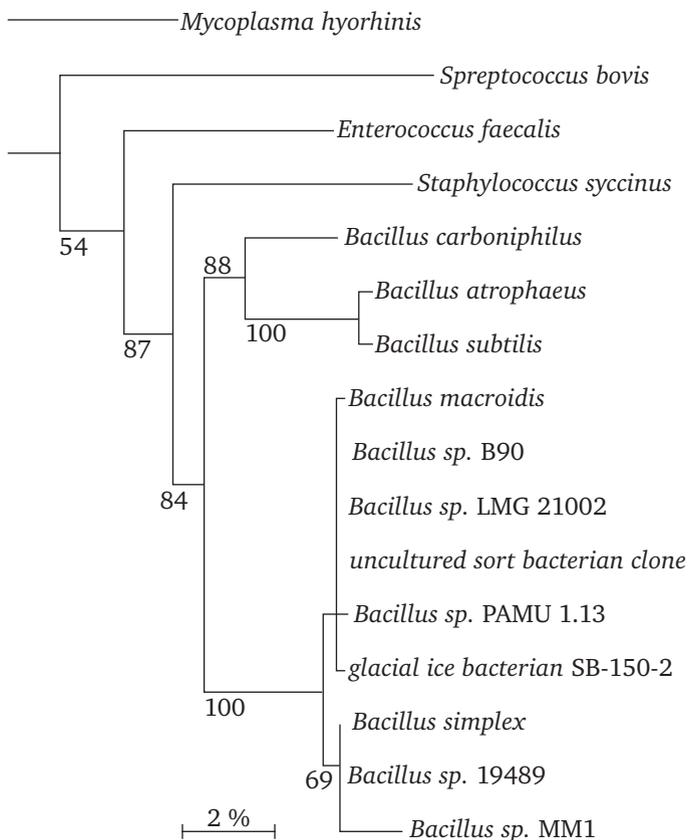


Рис. 4.8. Филогенетическое дерево для **бактерии** с Мамонтовой горы

Рост бацилл при низких температурах наблюдался ранее¹; известно, например, что *Bacillus anthracis* легко переносит замораживание². Однако оптимальная температура роста найденной бациллы довольно высока. Несмотря на то что бацилла может расти и при температуре ниже нуля, колоний на отобранных образцах не наблюдалось. Споры бацилл известны как наиболее резистентные³; так, они были найдены в янтаре с абсолютным возрастом 120 миллионов лет⁴. Поэтому находка живой бациллы в древней мерзло-

¹ Ashcroft F. M. Life at the extremes: the science of survival. University of California Press; 2000.

² Luyet B. J., and Gehenio P. M. Life and death at low temperatures.

³ Nicholson W. L. et al. Resistance of Bacillus endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments.

⁴ Greenblatt C. et al. Micrococcus luteus — survival in amber.

те Мамонтовой горы в целом не удивительна. Насколько активна ее жизнь в мерзлоте, однако, неясно; это относится и к микроорганизмам, выделенным из льдов Центральной Якутии и Аляски.

Интересной и важной представляется находка бацилл сибирской язвы *Bacillus anthracis* в аллювиальных отложениях голоцена в Якутии¹. И хотя по числу нуклеотидных замен авторы этой работы предполагают, что их возраст составляет несколько веков, по нашему мнению, геологическое положение находки скорее свидетельствует о возрасте в несколько тысяч лет. Если последнее справедливо, бациллы сибирской язвы также, вероятно, способны стабилизировать геном, предотвращая накопление мутаций в соответствии с ходом «молекулярных часов» и создавая эффект современной ДНК у древней бактерии².

Из повторно-жильных льдов Якутии и Аляски было выделено несколько видов микроорганизмов. Многие из выделенных бактерий грамм-положительны и близки к *Arthrobacter* и *Micrococcus spp.*, а грибы — к *Geomyces sp.* Большинство изолятов оказались способны к росту при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, но не росли при $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Интересно, что ДНК метаногенов нескольких групп была также обнаружена и идентифицирована в аллювиальных мерзлых отложениях Якутии. Их исследование не закончено; пока не ясно, имеем ли мы дело с живыми метаногенами. Однако инкубация этих многолетнемерзлых отложений принесла положительные результаты: наблюдалась эмиссия метана при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Исследования метаногенов представляются перспективными; последние могут оказаться ответственными за большое содержание метана в многолетнемерзлых отложениях.

В подземелье Института мерзлотоведения имени П. А. Мельникова в Якутске на глубине около 7 м на стенах найден белый грибной мицелий. Похожий мицелий наблюдается и на стенках тоннеля Фокс на Аляске. Идентификация выделенного вида (штамм PF) была основана на его морфологических характеристиках (рис. 4.9) и анализе последовательности нуклеотидов амплифицированной 18S rRNA; он близок к *Penicillium echinulatum* и, возможно, представляет собой новый вид.

Образцы из мерзлых отложений были подготовлены вместе с образцами штаммов *P. echinulatum*, полученных из банка культур, и инкубированы при температурах 25, 5 и $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характеристики прорастания спор и роста штамма PF из мерзлых отложений и штаммов IFO 7760 и IFO 7753 *P. echinulatum* при более низких температурах оказались различными: штамм PF сравнительно быстро рос при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.10). Выделенный штамм *Penicillium echinulatum* в подзе-

¹ Timofeev V. et al. Insights from *Bacillus anthracis* strains isolated from permafrost in the tundra zone of Russia // PLoS One. 2019. Vol. 14 (5). e0209140.

² Nickle D. C. et al. Curiously modern DNA for a 250 Million-Year-Old Bacterium.

мелье Института мерзлотоведения, несмотря на его адаптацию к холоду и условиям питания, вполне может быть современным, занесенным с поверхности. Кроме того, этот гриб растет только в аэробных условиях. Поэтому и его способность к росту в мерзлоте сомнительна.

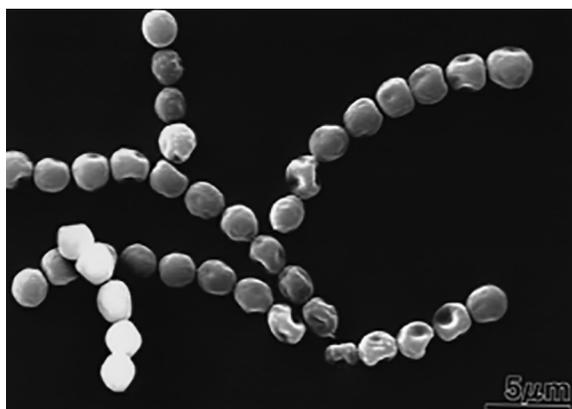


Рис. 4.9. Споры *Penicillium echinulatum* (снимок под электронным микроскопом)

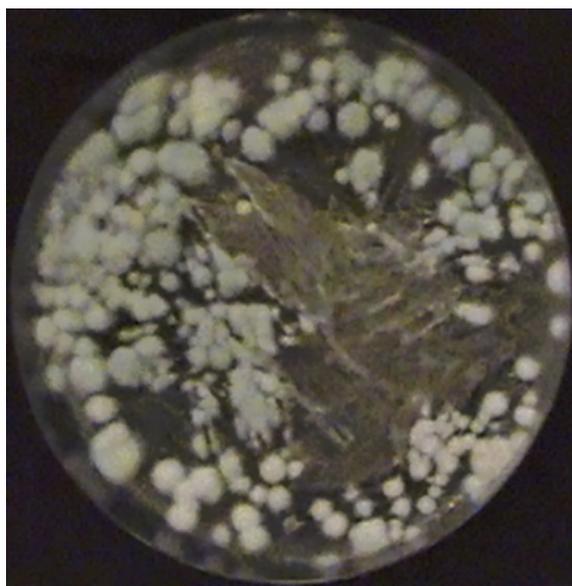


Рис. 4.10. Колонии *Penicillium echinulatum* из подземной лаборатории Института мерзлотоведения имени П. И. Мельникова (температура -5°C)

В целом, однако, имеются очевидные свидетельства о том, что ряд живых микроорганизмов в мерзлых породах, возможно, имеет возраст, аналогичный времени промерзания отложений. Несмотря на то что древние живые микроорганизмы встречаются в раз-

личных климатических зонах, мерзлые породы являются наиболее благоприятной областью для их сохранения. Длительное (до сотен миллионов лет, а может быть, и более) существование живых микроорганизмов не может быть объяснено с позиций замедления жизнедеятельности при анабиозе и требует изучения механизмов, поддерживающих функционирование клеточные структуры при столь продолжительном существовании. Разгадка этих механизмов позволит, вероятно, радикально пересмотреть взгляд на возможности жизни и человеческого организма.

Несмотря на то что целенаправленные исследования мерзлых пород продолжается уже более 100 лет, микроорганизмы в них изучены слабо. Поэтому геокриология оказалась не вполне готова к объяснению фактов, появившихся в последнее время, — таких, например, как значительное содержание биогенного газа в мерзлых породах. Исследование древних микроорганизмов в мерзлоте имеет огромное теоретическое и практическое значение и, несомненно, приблизит к решению ряда фундаментальных проблем. Среди них такие, как происхождение жизни на земле, а также возможность переноса живого вещества в космосе; создание медицинских препаратов, обеспечивающих увеличение продолжительности жизни; понимание роли микроорганизмов в формировании состава и строения мерзлых пород и их участия в криолитогенезе.

4.4.2. Вирусы в вечной мерзлоте

Группой исследователей, в числе которых был один из авторов книги, были изучены водная толща постоянно покрытого льдом ультраолиготрофного озера Унтерзее (Восточная Антарктида) и ледяная толща древнего повторно-жильного льда из обнажения Мамонтовой горы (р. Алдан, Центральная Якутия) с целью сравнительного анализа наличия вирусов микроорганизмов — бактериофагов¹. При этом микроскопически бактериофаги были выявлены в образцах повторно-жильного льда едомы (возрастом около 20 тыс. лет), а также в лизатах культур фагочувствительных бактерий, выделенных из этих образцов. Из культур были выделены нитчатые фаги, которые по своему характеру взаимодействия с бактериями относятся к фагам умеренного (лизогенного) типа.

Наибольшее разнообразие бактериофагов выявлено в толще озера Унтерзее в области хемоклина и в сероводородсодержащей толще. Результаты обнаружения сходных нитчатых фагов в образце реликтового повторно-жильного льда и водных пробах антарктического озера Унтерзее свидетельствуют о широком распространении бактериофагов в криолитозоне. Особенно интересной представля-

¹ Филиппова С. Н. и др. Бактериофаги низкотемпературных систем Арктики и Антарктики // Микробиология. 2016. Т. 85. № 3. С. 337—346.

ется находка под микроскопом различных по форме бактериофагов в древнем повторно-жильном льду, свидетельствующая о возможности сохранения вирусов в этих условиях в течение тысяч лет. В вечной мерзлоте примерно такого же возраста были обнаружены жизнеспособные так называемые гигантские вирусы¹. Некоторые представители гигантских вирусов иногда выделяются у больных пневмонией, что заставляет задумываться о биологических рисках изменения климата.

4.4.3. Роль льда в происхождении и эволюции жизни

Происхождение жизни и ее присутствие на других планетах², появление разума также загадочно связаны с холодом. И рождение (развитие) живого, и образование льда из воды и пара понижают энтропию системы, формируя самоупорядоченные системы. Температурная устойчивость определяет благоприятные для возникновения и развития живого условия. Лед выступает в роли биопротектора, стабилизируя параметры внешней среды. Кроме того, лед — это убежище от смертельных излучений космоса, термостат с минимальными температурными градиентами, защита от химических и биологических мутагенов, постоянно обновляющаяся среда³.

Возможно, жизнь своим появлением обязана именно холоду. В последние годы показано, что завершение химической эволюции требует в том числе условий заморозания. Циклы замораживания и оттаивания могут приводить к образованию основного генетического материала — молекул РНК и ДНК. Химики в Кембридже обнаружили, что крупные молекулы РНК — простой формы ДНК — собираются сами при многократном замораживании при $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и оттаивании до $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁴. При замораживании раствор HCN должен быть достаточно концентрированным для полимеризации, а само заморозание возможно, если на Земле были холодные условия⁵. Ранее было показано, что охлаждение раствора HCN до температуры ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к образованию аденина и аминокислот⁶. Такое

¹ Legendre M. Thirty-thousand-year-old distance relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology // PNAS. 2014. Vol. 111. P. 4274—4279.

² Levy M. et al. Prebiotic synthesis of adenine and amino acids under Europa-like conditions // Icarus. 2000. Vol. 145. P. 609—613.

³ Мельников В. П., Геннадюк В. Б., Брушков А. В. Аспекты криософии: криоразнообразии в природе // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 2. С. 3—11.

⁴ Mutschler H., Wochner A., Holliger P. Freeze-thaw cycles as drivers of complex ribosome assembly // Nature Chemistry. 2015. Vol. 7. P. 502—508.

⁵ Miyakawa S., Cleaves J. H., Miller S. L. The cold origin of life: a. implications based on the hydrolytic stabilities of hydrogen cyanide and formamide // Origins of Life and Evolution of Biospheres. 2002. Vol. 32. P. 195—208.

⁶ Schwartz A. W., Joosten H., Voet A. B. Prebiotic adenine synthesis via HCN oligomerization in ice // Biosystems. 1982. Vol. 15. P. 191—193; Levy M. et al. Prebiotic synthesis of adenine and amino acids under Europa-like conditions.

замерзание, возможно, происходило не в самом первобытном океане, а на мелководье или в локализованных водоемах.

Неизвестна причина появления около 900—1000 млн лет назад многоклеточных организмов¹. Очевидная увеличенная потребность в кислороде у многоклеточных организмов традиционно объясняется постепенным его накоплением в атмосфере за счет фотосинтеза, но инициация их развития вполне могла быть связана с повышением его концентрации в холодной воде. И появление скелетных организмов, приуроченное к границе протерозоя и фанерозоя, связано, возможно, со свойством выделения организмами карбоната кальция в условиях, богатых кислородом.

Обогащение кислородом Мирового океана на пороге венд-кембрий скорее всего связано с оледенением Земли, понижением температуры воды и увеличением растворимости газов. Интересно, что именно в это холодное время венда появляются первые гигантские организмы: гигантизм, как известно, характерен для полярных областей и связан в том числе с особенностями теплообмена.

Эпохи похолодания и эволюция живых организмов оказываются связанными на протяжении всего фанерозоя. С похолоданием в юрском периоде, а затем и в конце мелового периода могут быть связаны крупнейшие эпохи вымирания, которые произошли в это время. Появление *Homo sapiens* произошло во время крупнейшей ледниковой эпохи, а в роли похолоданий в происхождении и развитии человека много неясного, и она нуждается в исследовании².

Выводы

Лед является одним из ведущих факторов, влияющих на протекание процессов в живом веществе при отрицательной температуре.

Живое вещество, подвергаясь воздействию отрицательных температур, может быть разрушено или сохранять жизнедеятельность, изменив ее. В обоих случаях образовавшиеся биологические криогенные системы могут сохраняться длительное время (до десятков тысяч лет).

Разрушение или сохранение жизнедеятельности организмов при отрицательной температуре обусловлено определенным соотношением скоростей изменения температуры и комплексом процессов, обеспечивающих их адаптацию. Другими словами, существует переходная зона, в которой происходит перестройка структуры живого вещества, обеспечивающего его переход из одного устойчивого

¹ Федонкин М. А. Холодная заря животной жизни // Природа. 2000. № 9. С. 3—11.

² Мельников В. П., Геннадиник В. Б., Брушков А. В. Аспекты криософии: криоразнообразии в природе.

состояния (жизнедеятельность при положительных температурах) в другое. Если в данной переходной зоне оптимальное соотношение между изменением внешних температурных воздействий и перестройкой внутренней структуры будет нарушено, то живое вещество разрушается. Многократное охлаждение может приводить к самообучению живого вещества, выражающемуся в способности более успешно противостоять неблагоприятному воздействию отрицательных температур (эффект закаливания).

Циклы замерзания-оттаивания, в которых возникают молекулы ДНК, в прошлом, возможно, являлись необходимыми условиями появления на Земле жизни. Феноменальная сохранность микроорганизмов в мерзлоте может быть ключом к пониманию проблем мутагенеза и старения.

Тема 5

ПЕРЕХОДНЫЕ ЗОНЫ В КРИОСФЕРЕ

5.1. Переходные зоны как структурный элемент криосферы

Где начало того конца, которым оканчивается начало?

Козьма Прутков

Сегодня в науках о Земле преобладает подход, при котором основным изучаемым объектом является квазистационарная геосистема, т. е. такая, где изменения относительно медленные — для ее мгновенных состояний с достаточной точностью выполняются законы постоянства (стационарности). В нашем случае такой системой является криогенная квазистационарная система. Под ней мы понимаем компонент криолитозоны, сложившийся в определенных пространственно-временных условиях, имеющий однородные характеристики, состояние которых поддерживается длительное время.

Данные образования обладают одним общим качеством: в пределах каждого из них сохраняется структурный порядок и обеспечиваются определенные параметры существования (температура, физико-механические свойства, структура и текстура). Материальная основа всех квазистационарных систем и криосферы в целом — лед. Реализуясь в природных условиях, кристаллы льда формируют разнообразие криогенных образований, наблюдаемое в природе. Можно было бы определить криосферу как иерархическую систему, состоящую из множества квазистационарных подсистем.

Однако в криосфере существует особая группа явлений и образований, которые не вписываются в эту структуру. Она приурочена к определенным областям и обусловлена нестабильностью, динамикой развития, неустойчивыми внутренними связями. Мы определяем данные области криосферы как переходные зоны. В периоды неустойчивости, когда внутренние связи ослаблены, система оказывается перед выбором дальнейшего сценария развития. Чаще всего это разрушение старых связей и формирование новых, хотя в переходной зоне часть структур может сохраняться и встраиваться в новую систему.

Неустойчивому переходному состоянию присущи определенное строение и свойства. Именно в переходных состояниях реализуются преобразования, формирующие новые характеристики строения и свойств системы при достижении стабилизации и нового квазистационарного состояния. Основными причинами, вызывающими деформации криогенных систем, являются температурные и механические воздействия.

Можно выделить следующие типы переходных зон.

1. Первый тип соответствует стадии формирования или разрушения криогенных систем.

2. Второй тип соответствует общим или локальным деформациям существующих криогенных систем, при которых они полностью или частично переходят в новое состояние (изменение строения и свойств).

Мы считаем возможным выделение особого научного направления в рамках криологии — *криологии переходных состояний*. Криология переходных состояний включает изучение особенностей строения, динамики и направленности изменений природной среды при формировании криогенных систем различного уровня, а также при переходе их из одного квазистойчивого состояния в другое. Это имеет большое значение как при палеогеографических реконструкциях, так и при оценке устойчивости природно-технических систем. Данное научное направление потребует новых подходов при изучении изменения криогенных систем. В настоящем курсе не представляется возможным провести описание и дать характеристику всем переходным зонам криосферы, поэтому попытаемся рассмотреть некоторые из них. Структура и свойства криогенных систем и криосферы в целом основываются на строении и свойствах кристалла льда, поэтому рассмотрим строение соответствующей переходной зоны.

5.1.1. Кристалл льда

Вблизи растущей поверхности кристалла льда формируется переходный слой¹, состоящий из ассоциаций молекул (кластеров), имеющих льдоподобные связи. Посредством их присоединения и осуществляется рост кристаллов.

При этом кристалл льда представляет собой совокупность плоских, одинаково ориентированных пластин, перпендикулярных главной оптической оси (рис. 5.1). В растущем кристалле (рис. 5.2) первичные блоки какое-то время «достраиваются», приходя в равновесие с новыми термодинамическими условиями. Спустя некоторое время они укрепляются, и кристалл приобретает монолитное строение.

¹ Голубев В. Н. Формирование кристаллов льда в атмосфере // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. № 3. С. 19—25.

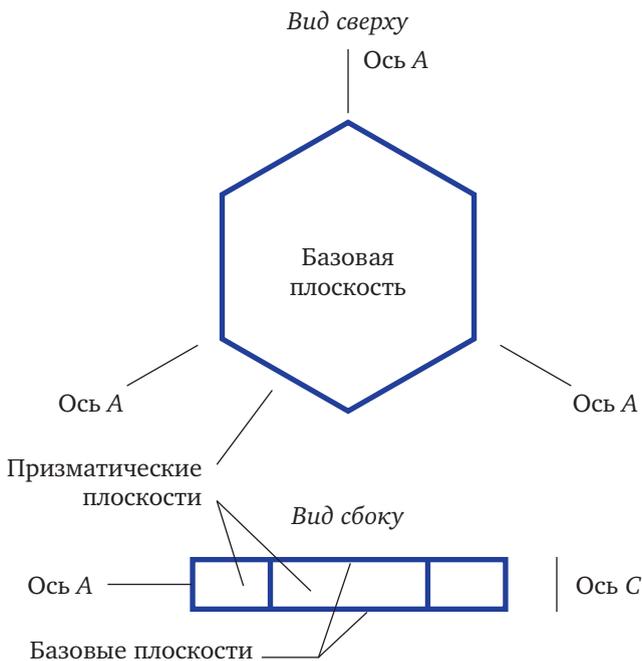


Рис. 5.1. Гексагональный кристалл льда. Рис. О. В. Мосина¹

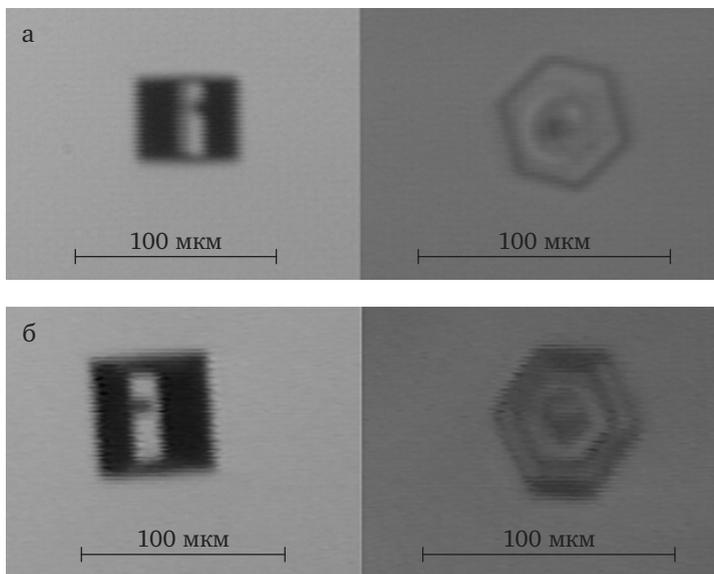


Рис. 5.2. Микрофотография колонообразного ледяного кристалла при $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ из зародыша (а); снимок (б) сделан через 12 мин (фото Б. Свенсона)

¹ URL: <https://kp-tts.ru/kakaya-kristallicheskaya-reshetka-u-lda-tainy-ledyanyh-kristallov-issledovaniya-processa-zamerzaniya.html> (дата обращения 22.12.2020).

Перечислим некоторые особенности строения переходной зоны растущего кристалла льда.

- У растущей поверхности наблюдается сочетание молекул воды и блоков льдоподобных структур (кластеров).

- Нарастание кристаллов льда происходит дискретно путем присоединения кластеров.

- Размеры кластеров и их количество определяется внешними условиями (температура, примеси, минерализация воды).

- Присоединение кластеров к растущей поверхности определяется особенностями формирующейся структуры (кристалла льда); криопротекторы, например, способны препятствовать росту, присоединяясь к поверхности кристалла.

- Первоначально блоки, формирующие кристалл льда, имеют некоторое несогласование, и лишь через некоторое время при первичном диагенезе происходит его достройка.

При термическом разрушении льда (плавлении) наблюдаются¹:

- разрыв сравнительно небольшой части водородных связей (10—15 %);

- появление значительного числа свободных молекул, внедряющихся в пустоты решетки, что обуславливает увеличение плотности вещества за счет формирования водородных связей, характерных для воды;

- тепловое движение, приводящее к непрерывному дроблению и «полимеризации» ассоциаций молекул, которые следует рассматривать как статистические образования.

Термическое разрушение кристаллов льда сопровождается развитием жидких ослабленных зон вдоль базисных плоскостей («цветы Тиндаля»)². Кристалл распадается на отдельные пластинки. Потом разрушаются и сами пластинки. После разрушении льда, по мнению многих исследователей, в талой воде остаются долгое время льдоподобные структуры, придающие ей особые качества. При термическом разрушении кристалла льда повторяются, только в обратном направлении, те же процессы и, соответственно, возникает переходная зона, как и при его формировании.

5.1.2. Промерзающий грунт

В предыдущих темах уже рассматривались особенности формирования криогенных систем в литосфере. И здесь наблюдается развитие переходной зоны³. В промерзающем массиве горных пород сначала возникают отдельные ледяные кристаллы, которые затем, постепенно

¹ Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. 2-е изд., перераб. и доп. Пущино : ОНТИ ПНЦ РАН, 2005.

² Tyndall J. On some physical properties of ice.

³ Ершов Э. Д. Общая геокриология.

увеличиваясь, формируют криотекстуры. Таким образом образуется промежуточный «промерзающий» слой, имеющий в своем строении элементы мерзлой и талой породы и состоящий из области интенсивного льдообразования и «мерзлой каймы» (*frozen fringe*) (рис. 5.3).

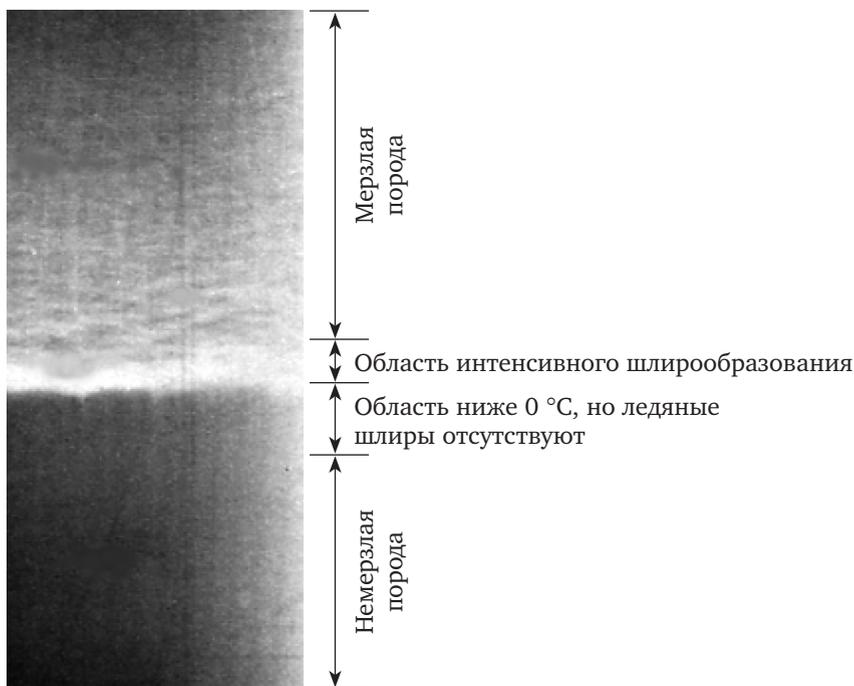


Рис. 5.3. Аллювиальный суглинок при промерзании при температуре около $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$; строение переходной промерзающей области; вертикальный размер образца 10 см (фото С. Акагавы)

Мощность этого слоя может изменяться от миллиметров до десятков метров. Например, при промерзании морских осадков формируется переходная зона, включающая слои, сцементированные льдом, и водоносные минерализованные, не содержащие лед горизонты криопэггов. Здесь так же переходная зона мощностью в десятки метров несет в себе элементы мерзлых и талых пород. Переходная зона наблюдается на всех стадиях развития ледяного и снежного покровов (см. тему 3).

5.2. Перестройка криогенных систем

5.2.1. Повышение температуры выше температуры фазовых переходов (оттаивание)

Устойчивость криогенных систем определяется возможностью сохранять отрицательную температуру и лед. Устойчивость кри-

огенной системы утрачивается после того, когда ее температура поднимается до значений, характерных для интенсивных фазовых переходов, и начинают разрушаться ледяные связи.

В оттаивающих грунтах влага получает большую подвижность и снова происходит процесс ее перераспределения. При этом обусловленные льдом цементационные связи между частицами породы и их агрегатами ослабляются или разрушаются. Перераспределение влаги в оттаивающих грунтах определяется рядом факторов: дисперсностью, минералогическим составом, составом водно-растворимых веществ, сложением мерзлого грунта и характером его изменения при оттаивании, суммарной влажностью мерзлого грунта (вода + лед), водонепроницаемостью. В дисперсных, особенно глинистых, породах направление процессов при оттаивании в большинстве случаев обратно тому, которое наблюдается в промерзающих породах. Так, в промерзающих грунтах развиваются процессы накопления влаги у фронта промерзания, льдовыделения, дегидратации, коагуляции и внутриобъемного сжатия, а также цементации минеральных частиц и их агрегатов. Для оттаивающих пород характерны процессы таяния льда, ремиграции влаги из оттаивающего слоя, гидратации (обводнения), диспергации и внутриобъемного набухания. Перераспределение влаги в оттаивающих дисперсных породах имеет некоторые общие черты с процессом ее миграции при промерзании. В обоих случаях влага передвигается в направлении теплотоков — из более теплых участков в более холодные. Экспериментальными исследованиями установлено, что и при протаивании может идти процесс дополнительного льдовыделения и пучения в мерзлой зоне у фронта протаивания, когда влага из оттаивающего грунта подтягивается в мерзлую область в результате температурного градиента и вымерзает, увеличивая мощность ледяных шлиров¹.

Замерзание глинистых пород сопровождается пучением; в оттаивающих сильно льдистых породах наблюдаются явления, связанные с перемещением земной поверхности в обратном направлении, — просадки и провалы, развитие термокарста.

Скорость оттаивания мерзлого грунта прежде всего зависит от содержания льда. Кроме того, она зависит от текстуры мерзлого грунта. Чем мельче ледяные включения, тем больше их контактная поверхность, тем быстрее фазовый переход. Горизонтальные и вертикальные прослойки льда замедляют протаивание.

В оттаивающих крупнодисперсных породах (гравий, щебень, песок) изменения содержания влаги, как и при замерзании, в большинстве случаев не происходит. В этих породах влага, образовавшаяся при таянии льда, как правило, удерживается на поверхности частиц скелета.

¹ Ершов Э. Д. Общая геокриология.

При таянии льда водоемов происходит постепенное объемное расслоение целостного массива на отдельные кристаллы. Лед при этом становится пористым из-за вытекания минерализованных вод и образования воздушных полостей. При внутреннем таянии наблюдается развитие «цветов Тиндаля», как будто скрашивающих это печальное зрелище распада и разрушения.

Похожие процессы наблюдаются при таянии снега¹. Здесь развивается переходная зона, в которой происходит внутреннее таяние, образование водонасыщенных областей снежицы.

5.2.2. Изменение строения криогенных систем при механическом воздействии

Деформации криогенных систем при механических воздействиях — явление широко распространенное. Существование некоторых систем, например ледников, вообще, по сути, на них основано, потому что связано с течением льда². В других случаях деформации проявляются локально и сопровождают развитие криогенных систем: рост повторно-жильных льдов, промерзание замкнутых ядер воды, деформация мерзлых пород при пучении.

В целом в результате механических воздействий происходит перестройка первоначального строения криогенных образований и формирование переходной зоны.

Монокристаллы льда. Монокристалл льда является наиболее простой криогенной системой. Рассмотрим его поведение при воздействии нагрузки. Монокристаллы льда с точки зрения пластических свойств обладают сильно выраженной анизотропией³. Пластические свойства монокристаллического льда сильно зависят от направления приложения нагрузки по отношению к базисной плоскости. П. И. Шумским дается описание⁴ поведение монокристалла льда при изгибе. При небольшой нагрузке в кристалле появляется двуосность. При этом сам кристалл остается в прежних границах. При устранении нагрузки (при температурах в пределах от -5 до -12 °C) происходит довольно быстрая релаксация с исчезновением двуосности. Сохранение двуосности после устранения нагрузки имеет место только в тех случаях, когда изгибы вызывают расхождение оптических осей не свыше $7-8^\circ$.

¹ Кузьмин П. П. Процесс таяния снежного покрова. Л. : Гидрометеиздат, 1961; Шмакин А. Б., Турков Д. В., Михайлов А. Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 69—79.

² Бадд У. Ф. Динамика масс льда. Л. : Гидрометеиздат, 1975; Рыбак О. О. Математические модели континентальных ледниковых щитов. 1. Архитектура моделей // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 1. С. 12—23.

³ Zheligovskaya E. A. Structural mechanisms of the I_h-II and II→I_c transitions between the crystalline phases of aqueous ice // Crystallography Reports. 2015. Vol. 60. № 5. P. 714—720.

⁴ Шумский П. А. Основы структурного ледоведения.

При дальнейшем деформировании изогнутая часть кристалла без видимых нарушений сплошности распадается на ряд блоков с более или менее близкой друг к другу ориентировкой, достигая таким образом устойчивого равновесия, сохраняющегося и после освобождения от нагрузки¹. Возникающие в кристалле льда деформации можно объяснить с помощью теории дислокаций, возникающих после приложения нагрузки. Было доказано, что внутри льда существуют дислокации, смещающиеся вдоль базисных плоскостей при приложении внешней нагрузки.

Согласно работам А. Фукуды и А. Хигаси² (Университет Хоккайдо), скорость смещения дислокации при напряжении сдвига около 0,1 МПа равна примерно 0,5 мкм/с (2 мм/ч). Если же увеличивать напряжение, скорость будет возрастать пропорционально ему. Таким образом, отдельная дислокация перемещается довольно медленно. Однако по мере развития деформации число дислокации все увеличивается и в результате их незначительные смещения приводят к тому, что становится возможным макроскопическое скольжение вдоль базисных плоскостей.

Сначала дислокации в кристалле не очень много. Следовательно, для того чтобы деформация развивалась с постоянной скоростью, дислокации должны смещаться очень быстро, что требует большого механического напряжения. Однако по мере развития деформации в кристалле появляется все больше дислокаций; в результате на каком-то этапе достаточным оказывается меньшее механическое напряжение, и с этого момента оно начинает быстро падать³.

Поликристаллический лед. Поликристаллический лед представляет собой криогенную систему, в структуру которых входят различно ориентированные кристаллы⁴, обладающие дефектами строения (дислокации, вакансии, внутрикристаллические трещины). Если к поликристаллическому льду приложить силу, внутри каждого кристаллического зерна возникнет движение дислокации и начнет развиваться скольжение вдоль базисных плоскостей. Однако главные оптические оси, а значит, и базисные плоскости разных зерен ориентированы различным образом, поэтому скольжение вдоль базисных плоскостей в каждом кристаллическом зерне огра-

¹ Шумский П. А. Основы структурного ледоведения.

² Fukuda A. Higashi A. X-ray diffraction topographic studies of the deformation behaviour of ice single crystals // Physics of ice: proceedings of the International symposium on physics of ice (Munich, Germany, September 9—14, 1968) / Ed. by N. Riehl, V. Bullemer, H. Engelhardt. New York : Plenum Press, 1969. P. 239—250.

³ Маэно Н. Наука о льде. М. : Мир, 1988.

⁴ Орлов М. Ю. и др. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения поликристаллического льда при динамических нагрузках. Ч. 1. Эксперименты по ударно-взрывному нагружению пресноводного льда. Расчет процесса взрывного нагружения системы «Лед-ВВ-вода» // Вестник ПГУ имени Шолом-Алейхема. 2013. № 2 (13). С. 98—112.

ничено соседними зернами и не может развиваться так же свободно, как в монокристалле.

В результате пластические свойства поликристаллического льда оказываются сильно зависящими от величины образующих его кристаллических зерен и от ориентации их оптических осей. Процесс деформирования такой структуры включает в себя несколько этапов¹. В первый момент после приложения нагрузки происходит упругая деформация кристаллов, а в местах наибольшей концентрации напряжений, обусловленной дефектами упаковки, на стыках различно ориентированных кристаллов возникают зоны дробления, появляются свободные от напряжений обломки за счет скалывания углов и краев кристаллов, развиваются микротрещины. Ориентация трещин на этой стадии хаотична. Если нагрузка достигает критического значения, рост трещин становится лавинообразным, образуются магистральные трещины, ориентированные по направлению максимальных растягивающих или сдвигающих напряжений, и процесс заканчивается хрупким разрушением.

Длительные небольшие нагрузки, действуя в течение продолжительного времени, вызывают процесс ползучести², в ходе которого происходит перестройка структуры льда. Трещины либо не возникают, либо локализованы и не определяют макроскопического поведения льда; преобладают равномерно протекающие во всем объеме процессы постепенной переориентации кристаллов, сопровождающиеся молекулярным распадом и рекристаллизацией с уменьшением их среднего размера.

В силу анизотропии кристаллы стремятся течь по своим базисным плоскостям³, при этом максимальная скорость течения будет у кристаллов, ориентированных по направлению максимальных сдвигающих напряжений. Развитию этого течения препятствует различная ориентация кристаллов, приводящая к пересечению полос скольжения, причем наибольшее сопротивление оказывают наиболее неблагоприятно ориентированные кристаллы. В соответствующих местах возникает концентрация напряжений, обуславливающая трещинообразование, дробление и распад кристаллов. При длительном деформировании процессы молекулярного распада и дробления приводят к уменьшению среднего размера кристаллов. Одновременно во льду протекает процесс рекристаллизации, цен-

¹ Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов. М. : Стройиздат, 2000.

² Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М. : Наука, 1988; Горев Б. В., Банищикова И. А. К описанию процесса ползучести и разрушения упругих материалов по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: физико-математические науки. 2009. № 2 (19). С. 90—98.

³ Зиненко В. И., Сорокин Б. П., Турчин П. П. Основы физики твердого тела. М. : Физматлит, 2000.

трами которого являются ненапряженные обломки и менее напряженные кристаллы. При этом вновь образуемые кристаллы ориентированы базисными плоскостями вдоль направления сдвига.

При достаточно больших нагрузках определяющим является процесс микротрещинообразования, обуславливающий переход к блоковому механизму скольжения по системе трещин, ориентированных согласно максимальным сдвигающим напряжениям. Структура основного объема кристаллов остается при этом неизменной; переориентация приурочена к тонким граничным участкам.

Мерзлые грунты. Процесс деформирования мерзлого грунта, как и других твердых тел, сопровождается формированием и развитием дефектов его структуры, отождествляемым как процесс длительного разрушения этого грунта¹. В многокомпонентной системе, каковой является мерзлый грунт, под дефектами структуры следует иметь в виду нарушение межчастичных связей. Такие нарушения всегда образуются в мерзлом грунте в процессе естественного формирования. Деформирование грунта под воздействием нагрузки ведет к их дальнейшему развитию. Деформации мерзлых грунтов можно рассматривать как последовательный процесс распада исходной фазы с кооперативным образованием квантованных по величине зародышей новых фаз, ростом их числа до критического, их спонтанным синтезом и последующим упорядочением².

На процесс деформирования оказывают влияние такие факторы, как локальные фазовые переходы, миграция влаги, изменение положения грунтовых частиц и другие процессы, роль которых еще предстоит выяснить количественно. Несмотря на то что этот вопрос является слабо разработанным, на уровне модели удалось, в частности, получить решение для количественного описания влияния локальных фазовых переходов на деформируемость пластично-мерзлых грунтов³.

В качестве модели грунта рассмотрим безграничное упругое пространство с коэффициентами Ламе λ , μ и объемным коэффициентом температурного расширения α , содержащее сферическое включение радиусом R из изотропного материала, характеризуемого упругими модулями λ_1 , μ_1 и объемным коэффициентом температурного расширения α_1 . Под действием внешнего поля напряжений, характеризуемого тензором σ_{ij}^0 ($i, j = 1, 2, 3$), в окрестности

¹ Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов. М. : Наука/Интерпериодика, 2002.

² Ошурков Н. В. Общие признаки термического и механического разрушения материалов // Материалы международной конференции «Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения» (Пушино, 26—28 мая 2003 г.). М., 2003.

³ Брушков А. В. и др. Влияние локальных фазовых переходов на деформируемость пластично-мерзлых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 1995. № 5. С. 71—77.

включений возникает неоднородное поле напряжений, которое определяется следующим выражением (без учета проскальзывания по контакту):

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + F_{ij}T + W_{ij},$$

где компоненты тензоров F_{ij} и W_{ij} определяются выражениями, которые получаются из известных в механике сплошной среды с учетом принятых допущений.

Неоднородность напряженного состояния в окрестности частицы приводит к изменению температуры фазового перехода, вследствие чего на поверхности контакта частицы со льдом возникают условия для плавления. Результаты расчета плавления льда вокруг минеральной частицы при различных уровнях внешней нагрузки показывают, что деформации имеют затухающий характер с течением времени, что согласуется с экспериментом. Разработка физических и математических моделей, описывающих сложные процессы в мерзлых породах при деформировании, является актуальной задачей будущего.

Как показано для мерзлых грунтов впервые Е. П. Шушериной, а затем С. С. Вяловым, Н. К. Пекарской и Р. В. Максимаком, зарождение и развитие ползучести определяется развитием трещин, разрушением агрегатов частиц и возникновением других дефектов. При затухающей ползучести преобладает процесс уменьшения, закрытия трещин и смещения частиц относительно друг друга. Закрытие и исчезновение трещин, по мнению Н. А. Цытовича, происходит также в результате процесса таяния льда в точках контакта минеральных частиц и последующего его замерзания в менее напряженных зонах мерзлого грунта. Затухающая ползучесть характеризуется постепенным уменьшением скорости необратимых деформаций. В процессе затухающей ползучести происходят переориентировка и перекристаллизация льда с уменьшением размеров кристаллов, что увеличивает плотность льда. Очевидно, что учесть эти процессы при разработке количественного прогноза трудно, поэтому исследователи часто идут по пути аппроксимации опытных данных различными уравнениями¹.

Для мерзлых незасоленных пород наблюдается экстремальная зависимость сопротивления мерзлых пород сжатию от льдосодержания². Действительно, при неполной степени заполнения пор грунта льдом увеличение льдистости приводит к упрочнению грунта ввиду усиления льдоцементационных связей.

¹ Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов.

² Шушерина Е. П., Бобков Ю. П. О влиянии влажности мерзлых грунтов на их прочность // Мерзлотные исследования : сб. научных статей. М. : Изд-во МГУ, 1969.

Напротив, при дальнейшем увеличении льдосодержания сопротивление грунта снижается, достигая в пределе значения, которое характерно для чистого льда, что связано с постепенным уменьшением упрочняющего влияния минеральных частиц. Само упрочняющее влияние на лед минеральных частиц объясняется тем, что вокруг минеральных зерен при деформации льда возможно образование зон дислокаций, которые препятствуют основным сдвиговым дислокациям. Вероятно, это одно из проявлений масштабного эффекта, когда сокращаются деформирующиеся объемы льда, находящиеся между минеральными частицами.

При воздействии механической нагрузки вследствие существования в мерзлых породах льда, представляющего собой почти идеальное текучее тело, и вязкой незамерзшей воды происходят необратимые перестройки структуры и развитие реологических процессов. Деформирование мерзлых пород обусловлено смещением относительно друг друга отдельных грунтовых частиц и микроагрегатов по разделяющим их пленкам связанной воды и включениям льда, которые в своем преобладающем большинстве и являются ослабленными участками мерзлой породы — «дефектами», которые могут быть точечными и линейными. Механизм пластического деформирования кристаллических тел (льда) связывают преимущественно с перемещением дислокаций путем скольжения, которые при некотором критическом напряжении порождают новые дислокации и трещины. Кроме того, происходит перемещение незамерзшей воды из участков с большим напряжением к участкам с меньшим напряжением с соответственными фазовыми переходами.

Вместе с этими процессами структурного преобразования (ослабления) мерзлой породы в ней происходят закрытие микротрещин, уменьшение межагрегатной и агрегатной пористости, более плотная упаковка грунтовых частиц и восстановление структурных связей. Преобладание тех или иных процессов и определяет упрочнение или разрушение мерзлой породы.

В понятие «прочность мерзлых грунтов» вкладывают различный смысл в зависимости от решаемой задачи. Оно включает как разрушение, так и избыточную деформацию¹. Со времени фундаментального исследования С. С. Вялова² принято считать, что мерзлые породы при достаточно больших напряжениях разрушаются, что фиксируется увеличением скоростей деформирования при постоянной нагрузке. Причем для мерзлых пород характерно вязкое разрушение с большими деформациями и сплющиванием образ-

¹ Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов.

² Вялов С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. М. : Изд-во АН СССР, 1959.

ца (образование «бочки») без нарушения сплошности. По данным Н. К. Пекарской, С. Э. Городецкого, Е. П. Шушериной, С. С. Вялова, у мерзлых грунтов выражены все три стадии ползучести, а переход от затухающей к незатухающей ползучести четкий. Однако длительность стадии неустановившейся ползучести для мерзлых пород может составлять сотни и даже тысячи часов¹.

Для некоторых глинистых талых пород перехода в прогрессирующее течение так и не происходит. Поскольку в процессе ползучести грунт одновременно и упрочняется, и расслабляется, то, по мнению С. С. Вялова, стадия установившегося течения возникает тогда, когда нарушение и восстановление межчастичных связей взаимно компенсируются. У слабоструктурированных систем такое состояние может продолжаться неограниченно долго. При этом развитие прогрессирующего течения связано с явлением дилатансии — увеличением объема образца при воздействии сдвиговых усилий, что, к свою очередь, обусловлено развитием микротрещин. Эксперименты Е. П. Шушериной в 1966 г. по исследованию ползучести мерзлой супеси и глины показали, что и продольная, и поперечная деформации развиваются одновременно. Увеличение объема образцов начинается уже в стадии неустановившегося течения².

В теории разрушения имеется множество различных подходов³. Например, Ш. Кулон предположил, что разрушение связано с определенным напряженным состоянием, которое называется предельным. Используются критерии максимального напряжения, максимальной деформации, максимальной энергии деформации, максимального касательного напряжения и другие.

Характерно, что каждая из этих теорий основана на экспериментальных данных или догадках и практически ни одна — на изучении внутреннего механизма разрушения⁴. В частности, в предложенной Кулоном теории максимального касательного напряжения постулируется, что в материале произойдет разрушение, когда максимальное касательное напряжение в некоторой точке материала достигает определенной величины, которая названа прочностью при сдвиге. В теории О. К. Мора принимается, что материал разрушится или будет неограниченно деформироваться, когда касательное напряжение в плоскости разрушения достигнет определенной величины, зависящей от нормального напряжения, действующего в этой плоскости, или когда наибольшее по абсолютной величине растягивающее главное напряжение достигнет предельного значения.

¹ Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов.

² Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов.

³ Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов.

⁴ Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов.

А. Гриффитс предположил, что хрупкий материал содержит случайно ориентированные трещины и что у кончиков трещин или вблизи них создается концентрация напряжений, вызывающих распространение трещин и в конечном итоге макроскопическое разрушение. Альтернативный в сравнении с Гриффитсом подход заключается, например, в том, что развитие трещины происходит при превышении напряжением в кончике трещины прочности молекулярной связи материала. Ее величину, правда, как и поверхностную энергию твердого материала, трудно измерить. В конечном счете теория Гриффитса приводит к критерию разрушения, представляемому криволинейной (параболической) огибающей Мора, что не всегда подтверждается экспериментально. Конечно, существуют модификации как теории Гриффитса, так и других подходов, приближающие теоретические кривые к экспериментальным.

Следует отметить, что теории, использующие гипотезу предельного состояния вещества, исходят в конечном счете из простой предпосылки. Она заключается в том, что для разрушения какого-либо тела необходимо разрушение его внутренних структурных связей¹.

Учитывая атомно-молекулярное строение тел, предельными можно считать критические напряжения межатомных (межмолекулярных) связей, которые вызывают их разрыв. На этом пути имеются, однако, две принципиальные трудности. Одна состоит в том, что ввиду сложного и зернистого строения всех тел, в том числе мерзлых грунтов, распределение механических напряжений неравномерно. Средние величины напряжений, действующие в образце мерзлого грунта, не соответствуют величинам, действующим в поре, заполненной льдом, на границе твердой частицы и т. д. Полученные в экспериментах данные о разрушении не могут соответствовать представлениям о разрушении атомно-молекулярных связей. Вместе с тем в связи с известной периодичностью, однотипностью строения мерзлого грунта можно говорить о средней поре или среднем структурном элементе (включающем как твердые частицы, так и лед, воду, воздух и т. д.), который периодически повторяется в образце. Для такого элемента характерно напряжение, совпадающее со средним напряжением во всем образце (для случая однородного напряженного состояния). Внутри структурного элемента для каждой точки характерна своя величина напряжений, но существует точка, где близость напряжения к предельному максимальна. Именно здесь происходит разрушение раньше всего. Другая трудность состоит в том, что изменение формы образца может происходить и без разрушения. Это наблюдается, например, при одноосном сжатии образцов мерзлых грунтов².

¹ Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов.

² Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов.

Экспериментальные исследования прочности мерзлых грунтов начинались определениями так называемой кратковременной прочности, когда быстро прикладывалась нагрузка и немедленно происходило разрушение. По мере накопления опытных данных обнаружился факт снижения прочности во времени, в процессе восприятия нагрузки. Оказалось, что мгновенная прочность может быть больше длительной более чем в 10 раз¹. Первые исследования длительной прочности грунтов были выполнены в 1930-х гг. Н. А. Цытовичем, в 1940-х гг. М. Н. Гольдштейном. Затем С. С. Вяловым в 1950-х гг. проведены комплексные исследования длительного сопротивления мерзлых грунтов нагрузкам, показано снижение прочности в процессе ползучести, установлены основные закономерности длительной прочности. Выявлена зависимость ее от температуры грунта².

Для оценки длительной прочности мерзлых грунтов по данным кратковременных испытаний широко используется полученная С. С. Вяловым зависимость

$$\int_0^{t_p} \exp\{-\beta[\theta(t)]/\sigma(\theta)\} dt = B,$$

где t_p — время до разрушения (долговечность); β и B — параметры, определяемые из опыта; $\sigma(\theta)$ — напряжение, вызывающее разрушение и зависящее от температуры; $\theta(t)$ — температура мерзлого грунта, зависящая от времени; t — время. При условии постоянной температуры это уравнение для длительной прочности σ_t упрощается:

$$\sigma_t = \frac{\beta}{\ln(t/B)}.$$

Эти уравнения оказываются справедливыми для всех прочностных показателей мерзлых грунтов (сцепления, сопротивления сжатию, сдвигу), при их выводе механизм разрушения рассматривается как результат протекающего во времени «развития дефектов структуры — микро- и макротрещин, в процессе которого увеличивается степень поврежденности структуры грунта. Критерием разрушения является достижение поврежденностью критического значения, которое для данного вида грунта и температуры постоянно. Интенсивность процесса длительного разрушения зависит от скорости роста дефектов, которая в свою очередь является функцией действующего напряжения и времени»³.

¹ Роман Л. Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Новосибирск : Наука (Сибирское отделение), 1987.

² Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов.

³ Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов.

В последнем уравнении зависимость $\sigma = f(\ln t)$ является линейной, следовательно, параметры β и B для данного вида грунта и температуры постоянны. Это и открывает возможность использовать его для расчетов длительной прочности по результатам кратковременных испытаний. С. С. Вялов отмечал (рис. 5.4), что для льда трудно назначить параметры β и B , так как развивается вязкое течение и понятие прочности теряет смысл. Л. Т. Роман было установлено, что для торфа и заторфованных грунтов графики зависимости $1/G - \ln(t)$ в диапазоне температуры интенсивных фазовых переходов нелинейны¹.

Снижение прочности с течением времени и зависимость прочности от температуры были установлены экспериментально для многих однородных твердых материалов². В результате на основе атомно-молекулярных представлений о разрушении структурных связей в веществе возникла кинетическая концепция прочности твердых тел, основоположником которой является С. Н. Журков. Достаточно полно эта теория изложена в работе В. Р. Регеля, А. И. Слуцкера и Э. Е. Томашевского³. Рассмотрим ее основные положения. Средние тепловые колебания атомов, которые происходят с частотой $10^{12}—10^{13} \text{ с}^{-1}$, вызывают «рывки» нагрузки на межатомные связи, сравнимые с прочностью на разрыв: разрывное усилие имеет величину около $1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$, а сила равна $F = 1/2 kT/h \approx 1000 \text{ кг/см}^2$ (h — деформация колебания, около 1 пм).

Поэтому, по словам автора концепции С. Н. Журкова, «рассоединение атомов осуществляется при нагрузках, меньших прочности межатомных связей, причем “дорывание” напряженных межатомных связей осуществляют тепловые флуктуации». Таким образом, внешняя сила сама не осуществляет разрыва межатомных связей, а лишь активизирует процесс разрушения. Основное уравнение этой теории имеет вид

$$t = t_0 \exp \frac{E_0 - \gamma \sigma}{kT},$$

где t — время до разрушения, с; t_0 — период свободного колебания атомов, равный $10^{-12}—10^{-13} \text{ с}$; E_0 — энергия активации; γ — структурный коэффициент (или коэффициент концентрации напряжений); σ — напряжение; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

¹ Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов.

² Горев Б. В., Банщикова И. А. К описанию процесса ползучести и разрушения упрочняющихся материалов по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности.

³ Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М. : Наука ; Физматлит, 1974.

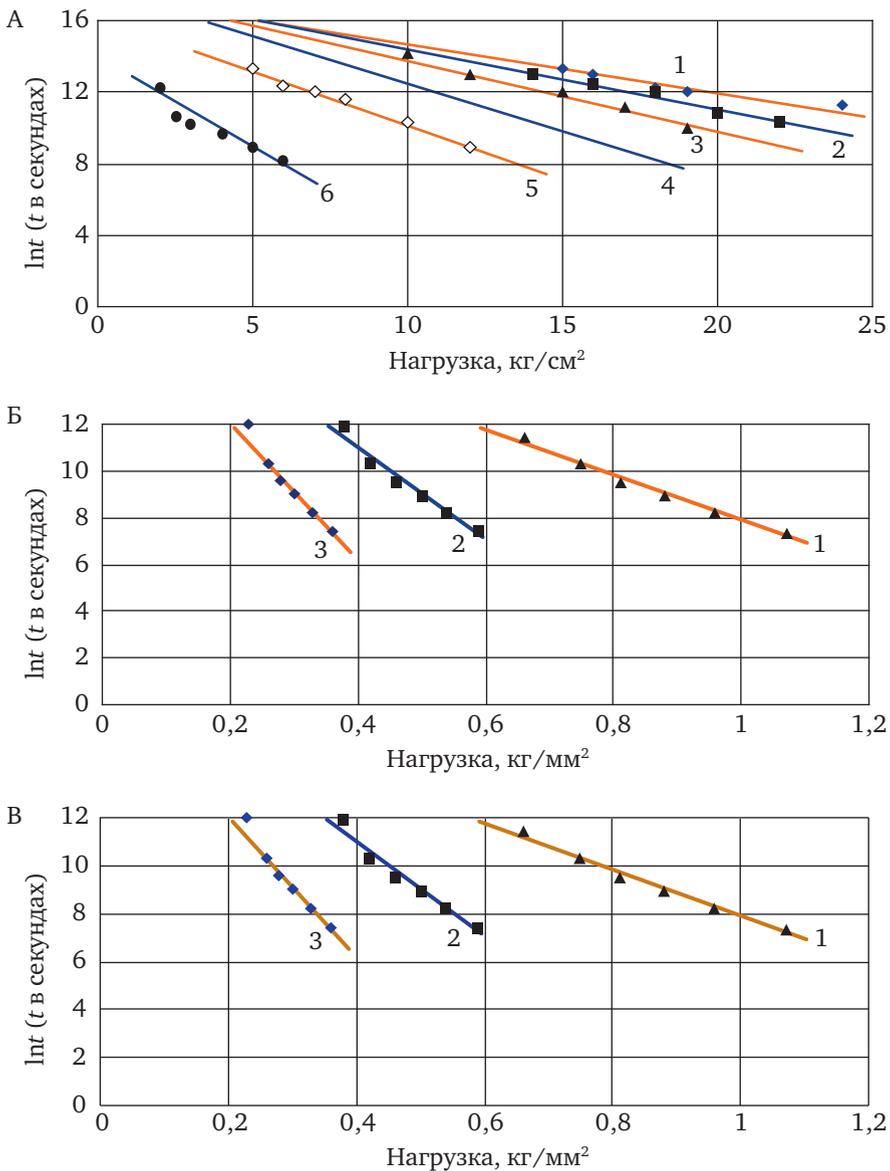


Рис. 5.4. Зависимость прочности на одноосное сжатие от времени в логарифмических координатах:

А — мерзлого пылеватого песка (река Еркута-Яха) (1 — при $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — при $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — при $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 — расчетная кривая при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 — при $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $D_{sal} = 0,1\%$; 6 — при $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $D_{sal} = 0,2\%$); Б — мерзлой келловейской супеси (1 — при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$); В — мерзлой глины бат-байосса (1 — при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Б и В построены по данным¹ С. С. Вялова).

¹ Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов.

На основе экспериментов установлен физический смысл входящих в уравнение параметров. Для металлов энергия активации процесса разрушения E_0 совпадает с величиной энергии сублимации. Легирующие добавки и степень наклона и обжига не влияют на E_0 и t_0 , а изменения прочностных свойств обусловлены изменениями γ . Для исследованных полимеров, как и для металлов, оказывается, что $t_0 = 10^{-13}$ с, а величина E_0 составляет несколько десятков ккал/моль, меняясь от полимера к полимеру, и хорошо коррелирует с величиной энергии активации процесса термодеструкции. Пластификация полимеров не затрагивает E_0 , а сказывается только на γ .

По данным Л. Т. Роман¹, обработка в соответствии с кинетической теорией опытных данных по прочности мерзлого торфа при различных видах испытаний показала, что для него характер зависимости $G - \ln(t)$ другой, чем для твердых тел: она нелинейна во всем диапазоне изменения G . Собственные данные авторов курса и данные других авторов были соответствующим образом обработаны, построены графики зависимостей $G - \ln t$ для различных типов грунтов и видов испытаний. Они представлены на рис. 5.5.

Обращают на себя внимание прямолинейность графиков и их пересечение в одной точке на оси ординат (логарифмов времени разрушения). Эта закономерность отмечается для самых различных грунтов и наиболее простым способом может быть выражена в следующем виде:

$$t_p = t_0 \exp\left(\frac{S\sigma_p}{T - T_0}\right),$$

где T_0 и S — константы; σ_p — напряжение разрушения. Подстановка данного выражения в основное уравнение кинетической теории С. Н. Журкова дает следующее выражение:

$$E_0 = cT,$$

где c — коэффициент, т. е. E_0 линейно зависит от T . Поскольку абсолютная температура в экспериментах изменяется сравнительно мало, сам характер структурных связей мало меняется в небольшом температурном диапазоне:

$$\gamma = \frac{SkT}{T_0 - T},$$

т. е. γ зависит главным образом от разности $T_0 - T$. Это объяснимо тем, что при изменении температуры изменяется именно соотношение льда и незамерзшей воды как важнейших структурных параметров, определяющих прочность. Из определений следует, что вели-

¹ Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов.

чина E_0 оказывается равной для мерзлых грунтов от 92 до 121 кДж/моль. Для льда, по оценкам скорости течения разных авторов¹, она составляет 50—75 кДж/моль. Уместно вспомнить, что теплота тепловой деструкция льда (плавление + испарение) составляет около 50 кДж/моль. Таким образом, разрушение структурного элемента мерзлого грунта обусловлено разрывом атомно-молекулярных связей, вероятно, не собственно во льду, а в контактной области, где энергия связи выше. Можно назвать эти связи льдоцементационными, энергия которых, таким образом, составляет в среднем около 25 ккал/моль.

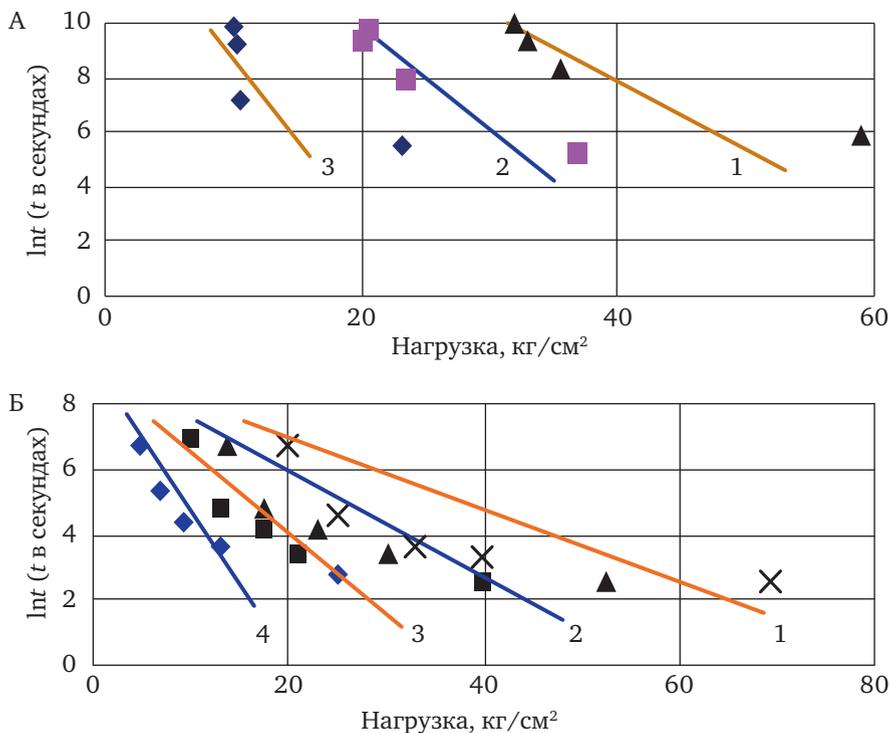


Рис. 5.5. Зависимость прочности от времени в логарифмических координатах:
 А — на одноосное сжатие мерзлой глины (1 — при -14°C ; 2 — при -8°C ; 3 — при -4°C ; данные П. М. Тютюнника); Б — на растяжение мерзлого торфа (1 — при -20°C ; 2 — при -8°C ; 3 — при $-6,5^\circ\text{C}$; 4 — при $-4,5^\circ\text{C}$; данные Л. Т. Роман)

Факт пересечения прямых может быть объясним тем, что в точке пересечения $G = 0$ и потому $t = t_0 \exp(E_0/(kT))$. Диапазон изменений абсолютных температур мерзлых грунтов в испытаниях мал — $5\text{—}10^\circ\text{C}$ ($T = \text{const}$), а зависимость энергии активации

¹ Зарецкий Ю. К., Чумичев Б. Д. Кратковременная ползучесть льда. М.: Наука, 1982.

от температуры в этой области незначительна. В частности, для льда П. А. Шумский приводит выражение

$$E_0 = 47 \text{ кДж/моль} + 0,15 \text{ ккал/моль} \cdot T.$$

Таким образом, $E_0/T = \text{const}$ в изучаемом диапазоне температур.

Изменение криогенной системы под механической нагрузкой в общем сводится к накоплению деформаций. При этом можно выделить три явные стадии: становления, зрелости, деградации (старости), и одну неявную, скрытую, в различных контекстах именуемую как инкубационный или эмбриональный период. Суммарная и пластическая деформации возрастают на всех явных стадиях. Упругая же, преобладающая на первой стадии (становление), сначала растет до максимума, а затем, на второй стадии (зрелость), уменьшается до минимума. С этого момента начинается стадия деградации, на которой преобладают разрывные деформации. На скрытой стадии цикл замыкается, старое превращается в новое. Это выражается распадом системы на части, в которых скачкообразно восстанавливаются начальные давление и температура¹.

5.2.3. Температурные деформации мерзлых грунтов

Температурные деформации мерзлых грунтов — один из самых распространенных криогенных процессов в криосфере, поэтому рассмотрим его подробно. Эти деформации связаны с объемными изменениями, происходящими при колебаниях температуры. Наиболее известным их следствием является *морозобойное растрескивание*; причиной его является температурное сокращение массива при понижении температуры.

Это явление интересно во многих отношениях. Во-первых, это процесс уменьшения объема и разрушения сплошности мерзлого массива, т. е. возникновения определенного переходного состояния с соответствующим локальным изменением структуры породы. Во-вторых, этот процесс является основным для формирования совершенно новой криогенной системы — повторно-жильного льда. В-третьих, развитие повторно-жильных льдов изменяет и дополняет структуру существующих криогенных систем. И в-четвертых, на границе формирующегося повторно-жильного ледяного образования и вмещающего его мерзлого массива развивается специфическая переходная зона с особым строением.

Возникающие в процессе роста жил напряжения снимаются несколькими способами: путем перекристаллизации льда на контактах жильного льда и вмещающего грунтового массива, течением льда с образованием режеляционной каймы вдоль боковой поверх-

¹ Коновалов А. А. О деформации и разрушении мерзлыхгрунтов // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 4. С. 54—62.

ности жилы, в результате образования системы сколов в слое грунта, примыкающего к жиле. Над растущей жилой зимой образуются горизонтальные трещины, в которых весной при замерзании талых вод в смеси со снегом, минеральным и растительным дедритом образуются ледяные тела, обеспечивающие вертикальный рост жил¹. Таким образом, формирование повторно-жильных льдов происходит и за счет ежегодного нарастания льда в вертикальных элементарных морозобойных трещинах и слоя льда в горизонтальных полостях над жилами, метаморфизма и течения льда в краевых частях жил и выдавливания грунта по системе сколов в грунтовом массиве.

Морозобойное растрескивание, или трещинообразование, представляет собой распространенный процесс как в области развития многолетнемерзлых пород, так и в области сезонного промерзания. Согласно теории Бунге — Леффингвелла морозобойные трещины вызваны напряжениями, возникающими в массиве мерзлых пород вследствие его сжатия при охлаждении.

Рассмотрим подробнее процесс температурного растрескивания, имея в виду, что выводы в определенной мере можно относить и к диагенетическому растрескиванию массивов. Температурные деформации мерзлых пород проявляются вследствие температурных деформаций компонентов породы (минералов и обломков пород, воды, льда, воздуха), фазового перехода «вода — лед» и структурных преобразований породы при изменении температуры. Коэффициент линейного расширения большинства минералов, слагающих горные породы, составляет $(2\div 12) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Лед имеет более высокие значения — $(30\div 60) \cdot 10^{-6}$, изменяющиеся в зависимости от структуры льда, угла наклона оптической оси кристаллов, интервала температуры и т. д. Изменение объема при фазовом переходе «вода — лед» определяется разностью удельных объемов воды и льда. Эта разность составляет для свободной воды 9 %, а для связанной воды она, возможно, выше. И наконец, воздух, содержащийся в мерзлых породах, обладает высокой способностью к расширению/сжатию.

Расчеты величины коэффициента линейного расширения для мерзлых грунтов, основанные на арифметическом суммировании температурных деформаций перечисленных компонентов с учетом фазовых переходов дают, однако, расходящиеся с фактическими данными результаты, особенно для тонкодисперсных пород. Это свидетельствует о большой роли структурных преобразований мерзлой породы в эффекте температурного расширения/сжатия. Так, для мерзлых дисперсных пород коэффициент расширения

¹ Попов А. И., Розенбаум Г. Э, Тумель Н. В. Криолитология. М. : Изд-во МГУ, 1985; Harris S., Brouchkov A., Cheng G. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms.

$(10 \div 1200) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в зависимости от состава пород и их влажности. С увеличением дисперсности деформации температурного расширения/сжатия возрастают. На некоторых dilatометрических кривых, например для мерзлого суглинка, выделяются не один, а два интервала температур, в которых наблюдается расширение породы: от $-0,2$ до -2 $^\circ\text{C}$ и от -20 до -45 $^\circ\text{C}$. Деформации расширения в первом интервале температур наиболее развиты при полном водонасыщении, а с уменьшением влажности и степени водонасыщения расширение суглинка проявляется в меньшей степени, прекращаясь при степени водонасыщения $0,75^1$.

Интересной особенностью температурных деформаций является эффект температурного последствия, установленный Н. И. Вотяковым для некоторых мерзлых пород. Он заключается в том, что температурные деформации развиваются в течение некоторого времени (до нескольких суток) после того, как температура в мерзлой породе стабилизируется, что связано, вероятно, с длительно протекающими структурными преобразованиями породы. Другой эффект заключается в обратном явлении, которое наблюдалось в цикле нагревания мерзлых пород от -25 до -20 $^\circ\text{C}$. При остановке изменения температуры в образце происходит его сжатие в течение нескольких десятков минут. Эффект максимально выражен в песке, где он воспроизводится от одного цикла охлаждения/нагревания к другому, уменьшаясь по амплитуде деформаций. Таким образом, изменения температуры массива пород приводят иногда к разнонаправленным деформациям в зависимости от состава пород и температурного режима.

При достаточно больших линейных размерах массива и изменениях температуры и ее градиента напряжения превысят временное сопротивление породы на разрыв и появится трещина отрыва. Трещины отрыва в целом обладают неровными и извилистыми поверхностями. В данном случае мерзлые породы рассматриваются как хрупкие упругие твердые тела. Иначе говоря, принимается, что время релаксации напряжений велико по сравнению с временем их возникновения и развития. После образования первой трещины массив распадается на две части, причем каждая часть имеет две свободные поверхности — горизонтальную и вертикальную.

Появление свободной вертикальной поверхности частично уменьшит напряжения. При однородности материала расстояния от первой трещины, на которых напряжения достигают предельных значений, будут одинаковы и вторая трещина будет параллельно первой. Таким образом, свободная вертикальная поверхность предопределяет направление следующих трещин, и поверхность однородного мас-

¹ Шушерина Е. П., Рачевский Б. С., Отрощенко О. П. Исследование температурных деформаций мерзлых горных пород // Мерзлотные исследования. Вып 10. М. : Изд-во МГУ, 1970. С. 273—283.

сива разбивается параллельными трещинами на ряд полос одинаковой толщины. Осуществление сдвига у краев полос даст возможность породе деформироваться без разрыва в направлении вдоль полос, поэтому поперечные разрывы полос наступают на расстояниях, превышающих расстояние в первом случае, и охлаждающийся массив разбивается трещинами не на квадраты, а на правильные прямоугольники, у которых короткие стороны образуются позже длинных.

Образование трещинных полигонов не снимает полностью температурных напряжений, а только уменьшает последние до значений ниже разрывающих усилий. При возрастании градиентов температур эти прямоугольные отдельности делятся последовательно пополам, образуя все более мелкие блоки. Вариациями модуля деформации, коэффициента линейного расширения и градиента температуры в охлаждающемся массиве породы обусловлена извилистость трещин, причем на извилинах создаются особо благоприятные условия для поперечных разрывов¹.

Так как коэффициенты линейной усадки при высыхании влажных глин (k) по абсолютным величинам значительно больше, чем коэффициенты линейного расширения (α) пород, а прочность меньше, то в случае диагенетических трещин образуются значительно меньшие блоки, чем температурные полигоны.

Вследствие того, что мерзлые породы отличаются друг от друга по прочности, модулю сдвига и коэффициентам линейного расширения, в каждом различающемся по составу слое пород развивается особая система температурных трещин и отдельностей. Образовавшись, эти системы трещин обычно существуют неопределенно долго. При колебаниях температуры выделившиеся блоки испытывают температурные деформации, и если градиенты температуры не повышаются, то новых температурных трещин не образуется и система трещин остается стабильной.

Первую математическую модель морозобойного растрескивания предложил в 1952 г. Б. Н. Достовалов. Она позволяла приближенно рассчитывать расстояние между трещинами и глубину их проникновения в мерзлом массиве пород в зависимости от градиента температуры в массиве, модуля упругости и коэффициента температурной деформации пород.

С. Е. Гречищевым в 1980 г. разработана модель, согласно которой трещина в первоначально сплошном массиве возникает, когда температурные напряжения (которые зависят от температуры грунта, его механических свойств и коэффициента температурного расширения) начинают превосходить прочность грунта на разрыв.

¹ Геворкян С. Г. Значения критических коэффициентов интенсивности напряжений мерзлых грунтов естественного сложения // Пространство и время. 2011. № 4. С. 157—162.

При этом учитывается релаксация напряжений (расслабление напряжений во времени), которая в пределе (при очень медленном понижении температуры) может приводить к расслаблению напряжений до уровня, не превышающего прочности грунта на разрыв. В этом случае криогенные трещины не будут образовываться даже при охлаждении до очень низких температур.

В модели рассматривается ненарушенный массив грунта в виде математического полупространства, в котором распространение тепла происходит только в одном измерении — по глубине. В этом случае решение уравнения для температурных напряжений σ в массиве известно в виде¹:

$$\sigma_x(\tau) = \frac{E_0(\tau)}{1-\nu} \left(\delta(\tau) - \int_0^\tau \delta(\xi) R(\tau, \xi) d\xi \right),$$

$$R(\tau, \xi) = \frac{E_0(\xi) - E_\infty(\xi) + \tau_p(\xi) \dot{E}_0(\xi)}{E_0(\tau) \tau_p(\xi)} \exp \left(- \int_\xi^\tau \frac{du}{\tau_p(u)} \right),$$

где τ — время; τ_p — время релаксации при растяжении; ξ , u — переменные; ν — коэффициент Пуассона; δ — температурная деформация; E_0 — начальный модуль деформации; E_∞ — модуль деформации при длительном воздействии.

Механические свойства в модели С. Е. Гречищева характеризуются модулями мгновенной и длительной деформации растяжения мерзлого грунта E_0 и E_∞ , пределом длительной прочности на разрыв $\sigma_{\infty,p}$, временем релаксации при растяжении грунта τ_p (принимается равным 25 ч). Температурные напряжения в грунте определяются прежде всего коэффициентом температурного расширения α . По С. Е. Гречищеву, колебания температуры на поверхности грунта с периодом, равным году, вызывающие медленное понижение температуры грунта, не приводят к образованию криогенных трещин из-за небольших напряжений. Трещины являются результатом более короткопериодных (6—7 сут) колебаний. В определенной степени это подтверждается данными наблюдений Дж. Р. Маккея и Е. Е. Подборного. Таким образом, упрощенно, по С. Е. Гречищеву, образование трещин происходит при выполнении следующего условия:

$$\frac{(1-\nu)\sigma_{\infty,p}}{\psi E_\infty} < \alpha t_{01},$$

где $\psi = 1 + \sqrt{\frac{\omega_2^2 \tau_p^2 + E_\infty^2 / E_0^2}{\omega_2^2 \tau_p^2 + 1}} \frac{t_{02} E_0}{t_{01} E_\infty}$; t_{01} — средняя температура поверхности породы под снегом самого холодного месяца; t_{02} — амплитуда

¹ Ржанецын А. Р. Теория ползучести. М. : Стройиздат, 1968.

короткопериодных (вторичных) температурных колебаний на поверхности породы под снегом за самый холодный месяц (вторичная амплитуда); $\omega_2 = 22 \cdot 10^{-3}$ 1/ч — частота короткопериодных (вторичных) температурных колебаний; ν — коэффициент Пуассона, принимаемый равным при растяжении 0,35.

При этом средняя температура поверхности породы под снегом самого холодного месяца t_{01} определяется по существующим методикам, например Г. В. Порхаева. Другие характеристики принимаются в основном по данным наблюдений и испытаний или могут назначаться по справочным материалам¹.

5.3. Природные факторы, влияющие на динамику и распределение криогенных переходных зон литосферы

Изменение условий теплообмена на поверхности Земли, а также глубинные тектонические процессы приводят к значительным деформациям криогенных систем литосферы и возникновению областей активизации природных процессов в криолитозоне. Рассмотрим данные явления на примере динамики ландшафтов и зон тектонической активности.

5.3.1. Ландшафтные факторы

Устойчивое существование криогенных систем определяется теплообменом с атмосферой, который осуществляется через ландшафтную составляющую природной среды. В самом широком смысле ландшафт можно рассматривать как обособленную территорию, в пределах которой компоненты природного комплекса составляют одно целое и взаимно воздействуют друг на друга². Ландшафт в пределах суши охватывает по вертикали приземный (припочвенный) слой воздуха, наземные покровы, почвенный слой и толщу подстилающих горных пород (современную кору выветривания). Жесткая связь ландшафтов с компонентами криолитозоны, в первую очередь зависящими от теплообмена (глубиной деятельного слоя и температурой ММП), определяется тем, что в них преобладает вертикальный энергообмен по сравнению с горизонтальным. В горизонтальном направлении, как правило, отмечается изотермия³.

¹ Геворкян С. Г. Значения критических коэффициентов интенсивности напряжений мерзлых грунтов естественного сложения.

² Дзагоева Е. А. Соотношение понятий «ландшафт» и «геосистема» в географическом пространстве и времени // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 357. С. 182—185.

³ Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск : Наука (Сибирское отделение), 1979.

Первостепенная роль в поддержании устойчивости геосистем принадлежит растительному покрову. Этот геокомпонент, один из наиболее мобильных, легко подвергается трансформации при внешних воздействиях. Вместе с тем растительный покров — главная стабилизирующая сила природы, противодействующая нарушению устойчивости. Существует тесная взаимосвязь растительного покрова с динамикой температурного поля криогенных толщ. Механизм этой связи определяется сильным влиянием растительности на процессы теплообмена и влагообмена почвогрунтов и атмосферы.

Для каждого региона существуют определенные зависимости фитоценотического, биоморфологического состава от мерзлотных условий. Это позволяет использовать растительный покров в качестве индикатора мерзлотных условий. При изменении растительности на поверхности Земли в первую очередь изменится мощность деятельного слоя, а затем и температура мерзлых грунтов.

К примеру, увеличение мощности мохового и лишайникового покровов приводит к уменьшению глубин сезонного протаивания, понижению температуры почв и пород. Исследования, проведенные Н. Г. Москаленко, показали, что во всех природных зонах минимальные значения глубин сезонного протаивания наблюдаются под морошково-багульниково-сфагново-кладониевым покровом, развитым на торфяниках. Максимальные глубины протаивания отмечены в тундровой зоне на песчаных дренированных участках, лишенных растительного покрова. Участки с глубоким протаиванием в северной тайге приурочены к крупным осоково-моховым мочажинам торфяника и болотам.

Устойчивость и динамика ландшафтов определяют соответствующие показатели криогенных систем литосферы. Наименее устойчивыми и, соответственно, наиболее динамичными участками ландшафтов являются пограничные (контурные) зоны, в том числе: бровка плакора, тыловой шов долины, тальвег оврага, границы природных зон, берега водоемов, края ледников, резко выраженные уступы рельефа, зоны концентрации напряжений горных пород, участки резкой смены литологического состава, различной степени дренированности, прерывистости вечной мерзлоты и др.¹

Устойчивость растительных сообществ наиболее высока и выражена наилучшим образом в их центральных частях, тогда как на границах даже незначительные изменения параметров среды нередко оказываются критическими. На периферии уже появляются признаки перехода к соседним зонам и соответственно меняются, хотя и в определенных пределах, характеристики криоген-

¹ Голубчиков Ю. Н., Зайцев В. А. Устойчивость ландшафтной структуры // Геоэкология Севера. М. : Изд-во МГУ, 1992. С. 66—72.

ных систем (температура, мощность СТС и др.). Многочисленные переходные образования выделяются как подтипы ландшафтов (лесотундровые, лесолуговые, подтаежные). В экологии переходные зоны, где происходят изменения по градиенту или соприкасаются границы двух контрастных местообитаний, получили название *эктонов*. На них обнаруживаются увеличение разнообразия и плотности живых организмов, повышение мозаичности ландшафтов, известное под названием краевого эффекта. Например, южная граница криолитозоны Евразии является планетарным экотонном.

Мозаичность распределения ландшафтов определяет аналогичное распределение характеристик криогенных толщ. Влияние широтной поясности, определяющей поступление солнечного тепла к поверхности Земли, оказывается значительно измененным. Ландшафтная составляющая является как бы поверхностным управляющим фактором развития криогенных систем при данных климатических условиях. При этом климатическая зональность создает общий фон состояния криолитозоны, но параметры криогенных систем (мощность деятельного слоя, температура мерзлых пород) будут определяться мозаичностью поверхностных условий.

При глобальных изменениях климата динамика мерзлых толщ будет определяться той же мозаичностью поверхностных условий. А. В. Павловым для района геокриологического стационара Марре-Сале (Западный Ямал), на котором в течение 1978—1995 гг. проводились наблюдения, показано, что потепление мерзлых грунтов на глубине 10 м в различных ландшафтных условиях составило от 0,1 до 1 °С. Наибольшее потепление характерно для низкотемпературных тундровых урочищ (современная температура на глубине 10 м — -7 °С), наименьшее — для относительно высокотемпературных урочищ, низких пойм и долин рек (современная температура -2,5 °С)¹. Таким образом, ландшафт становится неотъемлемой частью криогенных систем. При этом следует помнить, что такие компоненты ландшафта, как литогенная составляющая и криогенное строение ММП, являются продуктом прошлых палеогеографических условий, поэтому не будут изменяться даже при кардинальной смене растительных сообществ (см. тему 2).

5.3.2. Тектонические факторы

Переходные зоны часто приурочены к зонам повышенной геодинамической активности, располагающейся, как правило, на стыках геоструктур разного порядка. Для этих зон характерны повышенная трещиноватость горных пород, разломы, локальные структуры раз-

¹ Павлов А. В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз // Известия РАН. Серия: география. 2003. № 6. С. 39—50.

нопорядковых амплитуд новейших движений, увеличенная плотность экзодинамических процессов на единицу площади, наличие геохимических аномалий.

В подзонах дробления и милонитизации породы теряют свою прочность и подвергаются более интенсивному и глубокому выветриванию. Вертикальные поднятия ведут к активизации эрозионно-денудационных процессов. Тектоническая трещиноватость проявляется на поверхности рыхлых мерзлых отложений по тектонически ослабленным зонам: структурным швам на периферии и центральной части неоструктур. Тектоническая трещиноватость изменяет физико-механические свойства мерзлых пород, способствует лучшему проникновению воды и воздуха, что, естественно, приводит к увеличению глубины сезонного протаивания и образованию микрозападин, а также усилению термокарста¹.

Зоны геодинамической активности связаны не только с контрастностью в строении грунтовых толщ и экзогенных процессов. Для них присуще повышенное разнообразие растительных сообществ. Оно обусловлено резкорасчлененным рельефом, вариациями механического состава пород и увеличением осадков на наветренных склонах и приподнятых водоразделах. Иными словами, зону повышенной геодинамической активности можно определить как своеобразную геобиоактивную зону, в которой биотическая и биокосная компоненты в результате энергомассопереноса создают контрастные и неустойчивые в пространственно-временном отношении ландшафтные обстановки.

В целом можно отметить следующие основные черты зоны повышенной геодинамической активности:

- структурно-тектоническая и литоморфологическая контрастность;
- повышенная трещиноватость горных пород и грунтов;
- геохимические аномалии;
- интенсивный энергомассоперенос;
- фитоценотическая контрастность и видовое разнообразие флоры;
- ускоренный биологический круговорот веществ;
- ландшафтная контрастность и нестабильность природных внутриландшафтных рубежей.

Ключевым показателем при изучении переходных криогенных зон в областях повышенной геодинамической активности может являться оценка состояния биологического разнообразия. Биоразнообразие является наиболее чувствительным индикатором состояния ландшафтов; будучи связано со всеми их компонентами, оно

¹ Великоцкий М. А. Термокарст и неотектоника Яно-Омолойского междуречья : автореф. дисс. ... канд. географических наук. М., 1974.

реагирует на внешнее воздействие изменением либо видового состава, либо структуры сообществ. Универсальным индикатором состояния ландшафтов могут служить характеристики растительного покрова. Сравнительный анализ состояния фоновых и нарушенных группировок растительности на ценоотическом, видовом и популяционном уровнях дает достаточно четкое представление о динамике ландшафтов изучаемого района.

5.4. Структура переходных зон в криосфере

Подводя предварительный итог рассмотрению переходных зон криосферы, выделим их общие свойства.

1. Строение переходных зон отличаются более сложной структурой и бóльшим числом показателей свойств, чем строение смежных сред; в строении переходной зоны присутствуют элементы обеих сред.

2. Время структурных преобразований вещества в переходной зоне невелико по сравнению с временем существования структур смежных сред.

3. Параметры и строение переходной зоны значительно зависят от влияния внешних условий и меняются в пространстве.

4. Совокупность преобразований в переходной зоне определяет параметры квазистационарной криогенной системы, которые сохраняются на все время ее существования.

5. По сравнению с квазистационарными криогенными системами переходные зоны отличаются большей динамичностью (скоростью изменений).

6. Размеры переходной зоны зависят от масштаба природного объекта.

7. Преобразования в криосфере начинаются в переходных зонах. Если на каком-либо участке формируется криогенная система, то все ее элементы последовательно пройдут через этап пребывания в переходной зоне.

8. В пределах переходных зон распределение характеристик может быть дискретным, поскольку формирование и разрыв внутренних связей происходят локально, в различных точках пространства.

Сегодня не представляется возможным подробно рассмотреть основные переходные зоны криосферы. Однако это направление исследований представляется важным, потому что позволяет изучать динамику криосферы с позиции преобразования ее структуры — путем разрушения и трансформации одних квазистационарных криогенных систем и формированием других. Перечислим некоторые переходные зоны, распространенные в криосфере Земли (их выбор

прежде всего определяется профессиональной деятельностью авторов данного курса):

- 1) поверхность растущего кристалла льда (границы фазовых переходов «вода — лед», «пар — лед»);
- 2) поверхность формирующейся или разрушающейся криогенной системы (снежный и ледяной покров, промерзающие и проталивающие грунтовые массивы);
- 3) области метаморфизма при механическом, тепловом и химическом воздействии на существующие криогенные системы;
- 4) неустойчивые области земной поверхности с интенсивным развитием экзогенных процессов;
- 5) границы ландшафтов (от зональных до микроландшафтов);
- 6) границы областей распространения криогенных толщ;
- 7) области техногенных нарушений различных компонентов криосферы.

Выводы

Существование переходных зон криосферы обусловлено формированием неустойчивых динамичных областей, возникающих при преобразовании и разрушении криогенных систем. В развитии переходных зон можно выделить следующие стадии.

1. Структура и внутренние связи, хотя бы и в ослабленном состоянии, соответствуют первичным условиям.
2. Структура и связи прежней системы полностью или частично разрушены.
3. Формируются структурные связи, строение и свойства, соответствующие новым условиям.
4. После формирования новой системы некоторое время происходит достройка (последствие).

Изменение криосферы как результат глобальных изменений климата так же будет происходить путем преобразований квазистационарных систем через переходные зоны в новые состояния. При общей тенденции повышения температур мерзлых грунтов как реакции на потепление климата в некоторых районах отмечается обратный процесс. Несмотря на большое разнообразие переходных зон, в их строении немало общего, что позволяет использовать единые методические подходы в их изучении.

Тема. 6

КРИОСФЕРА КАК ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Разум должен предполагать порядок даже там, где объекты мышления вовсе не даны в их естественной связи.

Р. Декарт

6.1. Проблемы классификации

Криосфера — оболочка Земли, отличающаяся отрицательной температурой и присутствием воды в твердой фазе. Перечисленные условия реализуются во всех геосферах, где создаются соответствующие условия. Криосфера проявляется в разнообразных криогенных образованиях, представляющих собой природные системы. Время их существования разнообразно; они реализуются в виде кратковременных, сезонных и многолетних образованиях. Многочисленны формы их проявления: ледяные облака, снежный покров, сезонномерзлые почвы и горные породы, сезонный и многолетний ледяной покров водоемов, наледи, горные ледники и ледниковые покровы, многолетнемерзлые породы с подземными льдами, замёрзшие зимой растения и погребенные в вечной мерзлоте живые микроорганизмы. Даже социальные структуры подвержены влиянию криосферы. Многочисленные единичные криогенные образования в совокупности формируют многоуровневую иерархически организованную систему — криосферу.

П. А. Шумским¹ предложена схема общего строения криосферы. Эта схема базируется на закономерностях географического распространения льда и основана на выделении зон льдообразования (рекристаллизационная, рекристаллизационно-инфильтрационная, холодная инфильтрационная, теплая инфильтрационная, инфильтрационно-конжеляционная, конжеляционная, сезонно-конжеляционная). В зависимости от условий соотношение зон будет различным. Неравномерное распределение масс горных пород и воды, обладающих различными теплофизическими свойствами, предопределяет различие строения криосферы в приморских и континен-

¹ Шумский П. А. Основы структурного ледоведения.

тальных районах Земли. Криосфера, таким образом, представляет собой многослойное образование, захватывающее различные оболочки Земли. В полярных и приполярных районах она проникает в атмосферу, гидросферу и литосферу, а в экваториальных районах наблюдается только в верхних частях атмосферы.

В настоящее время разработка общей теории геосистем криосферы еще далека от своего завершения. Из всех компонентов криосферы наиболее разработана систематика криолитозоны¹, поэтому на ней и сосредоточим основное внимание.

Анализ криогенной системы должен базироваться на одновременном рассмотрении нескольких факторов, определяющих ее развитие.

1. История. Представления о формировании криогенных систем строятся на представлении об их цикличности. Криогенные системы проходят в своем развитии через стадии становления (юности), квазистационарного состояния (зрелости) и разрушения или трансформации. Мы придаем большое значение не только результату, но и особенностям пути, по которому развивается криогенная система во времени в период своего становления или трансформации.

2. Энергия. Количество тепла, получаемого Землей из атмосферы (преимущественно от Солнца), приблизительно на три порядка превосходит количество тепла, приходящего из земных недр². Зональность в распределении солнечной энергии, изменение отражательной способности земной поверхности, колебание солнечной активности, а также циркуляция атмосферы и гидросферы определяют тепловой баланс различных частей Земли и обуславливают формирование криогенных систем.

3. Среда. Как было показано в предыдущих темах, среда, в которой формируется и существует криогенная система, оказывает на нее определяющее влияние.

Криосфера в целом и отдельные ее элементы должны рассматриваться как совокупность внутренне организованных структур, развивающихся во времени и объединенных потоками энергии и вещества (основным компонентом является вода). Среда формирования, энергетические параметры, изменения во времени рассматриваются как переменные факторы, которые воздействуют на связь «процесс — криогенная система». Связи криогенных систем образуют цикл причин и следствий, проявляющихся в последовательности событий; при этом сами события не эквивалентны, они различаются по некоторым признакам, что, собственно, и воспринимается как течение времени.

¹ Хименков А. Н., Брушков А. В. Введение в структурную криологию; Хименков А. Н. и др. Очерки вероятностной геокриологии. М. : ВИНТИ, 2009; Мельников В. П. и др. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования; Хименков А. Н. Геосистемный подход в геокриологии. // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 2. С. 74–82.

² Эршов Э. Д. Общая геокриология. М. : Изд-во МГУ, 2002.

Влияние внешних факторов определяется масштабом и динамикой их взаимодействия. И если изменения во времени не имеют большого значения при изучении строения одного кристалла льда, то это значение становится решающим при объяснении строения крупной криогенной системы, пластовой залежи подземного льда, криогенного строения геологической фации или развития ледникового покрова.

Криосфера является иерархически построенной макросистемой, состоящей из квазистационарных подсистем и динамичных переходных зон. Любой компонент криосферы выполняет определенные функции по отношению к системе в целом. Каждая подсистема характеризуется определенными параметрами состояния, в частности температурой (энергетическим состоянием); своими особенностями распределения вещественного состава (структурой); определенными граничными условиями, обеспечивающими ее устойчивость; определенными пространственно-временными границами и др., которые отличаются от аналогичных параметров других подсистем и макросистемы в целом.

Воздействие на криосферу, например глобальное изменение климата, избирательно действует на ее подсистемы. Каждая из них будет реагировать на воздействия по-своему и, возможно, по иному закону, чем вся система в целом. Отдельные подсистемы, резонируя на внешнее возбуждение, за счет прямых и обратных связей будут меняться не только с разной интенсивностью, но и даже с разной направленностью.

6.2. Понятийный аппарат

Существуют несколько важных принципов теории систем, которые следует иметь в виду при рассмотрении криогенных систем.

Первый принцип — система представляет собой совокупность элементов, связанных в одно качественное целое; это не простое объединение (сложение) элементов. Вторым принципом является признание того, что свойства системы не являются суммой свойств ее элементов. Таким образом, система обладает свойствами, которые могут отсутствовать у ее элементов. Третий принцип называют принципом эффективности; для случая криогенной системы он с некоторой условностью может означать, что выделяемый объект (кристалл, горная порода, горизонт) представляет собой длительно существующий целостный качественный элемент. Четвертый принцип запрещает рассматривать систему изолированно от окружающей среды. Общая классификация систем¹ приведена в табл. 6.1.

¹ Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ. М. : Высшая школа, 1989.

Общая классификация систем

1. Характер взаимоотношений со средой	Открытые (непрерывный обмен)
	Закрытые (слабая связь)
2. Причинная обусловленность	Детерминированные
	Стохастические
3. Степень подчиненности	Простые (каждый с каждым)
	Иерархические (существует соподчиненность)
4. По отношению к времени	Статические
	Динамические
5. По степени сложности	Простые (элементов менее 10)
	Сложные
	Большие

Геосистема. Геосистема — это природно-географическое единство всех возможных категорий от планетарной геосистемы (географической оболочки или географической среды в целом) до элементарной геосистемы (физико-географической фации)¹. Геосистемы являются материальным выражением целостности географической оболочки и отдельных ее участков.

Жесткость связей между компонентами геосистемы может быть поставлена на первое место в ряду критериев ее выделения, так как характеризует их структуру. При нарушении допустимой жесткости геосистема как таковая неминуемо распадется. Это обстоятельство имеет глубокий смысл, так как, с одной стороны, определяет возможность длительного существования геосистемы как целого, а с другой — не стесняет некоторого отклонения в строении при адаптации системы к внешним возмущениям.

Возраст геосистемы. Каждый компонент геосистемы представлен подразделениями различного ранга, сформировавшимися в процессе исторического развития этого компонента при взаимодействии с другими, нередко развивающимися в другом темпе, поэтому каждый отдельный компонент геосистемы может иметь свой возраст. Часто о возрасте той или иной геосистемы судят на основе возраста одного из компонентов. Однако правильнее будет различать возраст геосистемы и отдельных ее составляющих. Возраст геосистемы определяется тем сроком, в течении которого взаимоотношение между ее компонентами продолжается более или менее постоянными. Отдельные компоненты могут быть старше (например, возраст минеральной со-

¹ Сочава Б. В. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск : Наука (Сибирское отделение), 1978.

ставляющей эпигенетических мерзлых толщ древнее возраста соответствующей ей криогенной системы). Установление возраста геосистем требует анализа связей между компонентами геосистем во времени.

Инвариант. Каждую геосистему характеризует неизменяемая часть — *инвариант*, и часть, потенциально доступная преобразованию. Для криогенной системы, например, инвариант — это пространственное соотношение льда и минеральной составляющей (криотекстура), а преобразуемая часть — соотношение между замерзшей и незамерзшей водой, температура, механические свойства. Для каждого инварианта время, прошедшее с момента его возникновения, можно считать возрастом геосистемы.

Динамика геосистемы. Необходимой предпосылкой для понимания динамической природы геосистем служит представление об их инвариантном и преобразуемом началах. Все превращения внутри неизменного инварианта рассматриваются как ее *динамика*. Наряду с тенденциями к изменению структуры геосистем им присуще и стабилизирующее начало, которое определяется процессами саморегуляции. Под саморегуляцией геосистемы понимается приведение ее в устойчивое состояние и восстановление структуры, нарушенной в процессе функционирования. Причем действенность ее тем больше, чем меньше нарушена структура¹. Таким образом, при рассмотрении динамики криогенных систем следует также учитывать и стабилизирующую динамику саморегуляции.

Устойчивость. С понятием саморегуляции геосистемы неразрывно связано понятие устойчивости. Согласно определению В. Б. Сочава², *устойчивость геосистем* определяется совокупностью переменных состояний в рамках одного инварианта, когда соотношения между компонентами геосистемы остаются более или менее подобными. Близкое к этому толкование понятия «устойчивость» дают и другие авторы. Так, под устойчивостью геосистем понимается постоянство характеристик системы во времени (К. Н. Дьяков), способность геосистем не изменяться под внешней нагрузкой и быстро восстанавливаться после ее снятия (З. В. Дашкевич).

Критерием для определения степени устойчивости геосистем к техногенным воздействиям является время релаксации³, необходимое для возвращения в состояние, близкое к исходному. Данное понятие целесообразно использовать в трех аспектах⁴:

1) устойчивость как способность территории длительное время сохранять первоначальное состояние;

¹ Сочава В. В. Введение в учение о геосистемах.

² Сочава В. В. Введение в учение о геосистемах.

³ Солнцев В. Н. Хроноорганизация географических явлений // Вопросы географии. Сб. 117 «Геофизика ландшафта». М. : Мысль, 1981. С. 40—68.

⁴ Звонкова Т. В. Географическое прогнозирование. М. : Высшая школа, 1987.

2) устойчивость как генетическая взаимосвязь между всеми типами ландшафтов, обусловленная их исторически сложившимся разнообразием;

3) устойчивость однотипных локальных геосистем и целостность структуры.

Устойчивость геологических тел различных масштабов — проявление их индивидуальности, реализация обобщенного принципа Ле Шателье — Брауна, согласно которому внешнее воздействие, выводящее систему из состояния термодинамического равновесия, порождает в системе процессы, стремящиеся ослабить эффект воздействия. Кроме того, причина общей сопротивляемости тел состоит в их невосприимчивости, определяемой отсутствием сродства с возмущающим фактором. Обращает на себя внимание также естественное различие эффектов как питающих, так и непитающих воздействий. Потоки, не обеспечивающие ядро системы веществом и энергией, сильнее рассеиваются у его поверхности. Например, дальнейшее осадконакопление слабо влияет на сформированную толщу отложений.

Основы теории устойчивости, имеющей большое значение при анализе природных процессов, разработаны в математике и механике¹. Само понятие устойчивости было введено русским математиком А. М. Ляпуновым. Им был разработан метод исследования дифференциальных уравнений, описывающих природные процессы, на устойчивость с помощью специальных функций, называемых функциями Ляпунова. Процессы, происходящие в мерзлых породах, — деформирование, изменение температуры, миграция воды и солей, фазовые переходы — являются термодинамическими процессами. Из второго начала термодинамики следует, что существует некоторая функция (энтропия), монотонно возрастающая до тех пор, пока не достигнет своего максимального значения в состоянии термодинамического равновесия:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0.$$

Рассмотрим типичный процесс установления равновесия, приводящий к функциям Ляпунова, — выравнивание концентраций солей X_i в мерзлом грунте, находящемся при постоянной температуре. Эволюцию такой системы можно задать уравнениями скоростей выравнивания концентраций:

$$\frac{dX_i}{dt} = F_i(X_i),$$

где F_i — скорость перемещения (выравнивания) компоненты X_i .

¹ Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем. М. : Мир, 1974.

При этом каждая компонента может иметь свое уравнение выравнивания. Предположим, что при $X_i = 0$ все скорости обращаются в нуль. Тогда $X_i = 0$ — точка равновесия рассматриваемой системы. Рассмотрим, что произойдет, если мы начнем с ненулевых значений концентраций X_i . Нам необходимо установить, будет ли система эволюционировать к точке равновесия X_i . Это типичный пример, когда необходимо использование функций Ляпунова. Пусть некоторая функция концентраций $v = v(X_1, \dots, X_n)$ положительна во всем интересующем нас диапазоне концентраций и обращается в нуль при $X_i = 0$. Производную функции v по времени можно представить в виде

$$\frac{dv}{dt} = \sum_i \frac{dv}{dX_i} \cdot \frac{dX_i}{dt} = \sum_i \frac{dv}{dX_i} \cdot F_i(X_i).$$

Теорема Ляпунова утверждает, что система будет эволюционировать к точке равновесия $X_i = 0$, если производная dv/dt функции v по времени имеет знак, противоположный знаку самой функции v . В нашем примере производная dv/dt должна быть отрицательной.

Другой типичный пример из области геокриологии — теплопроводность. Изменение температуры со временем для случая одной координаты описывается классическим уравнением Фурье

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2},$$

где a — температуропроводность ($a > 0$). Функция Ляпунова может быть записана в следующем виде:

$$L(T) = \int \left(\frac{dT}{dx} \right)^2 dx.$$

Можно убедиться, что функция Ляпунова $L(T)$ в самом деле убывает до своего минимального значения, когда достигается тепловое равновесие. Таким образом, начальное неоднородное распределение температуры стремится к равновесию, когда температуры распределены равномерно. Принято говорить, что равномерное распределение температуры является аттрактором для начальных неоднородных распределений температуры.

С другой стороны, строго говоря, все параметры системы носят вероятностный характер. Среди множества n сценариев развития системы после техногенного воздействия пусть каждый имеет вероятность своего осуществления p_i . Величина

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

характеризует энтропию системы. Она максимальна при равновероятности всех сценариев, и наступает в случае полного разрушения вну-

тренних связей и хаоса в системе¹. Следовательно, значение $1/N$ может выступать в качестве наиболее общего коэффициента устойчивости.

Стабильность, чувствительность. Под *стабильностью геосистемы* следует понимать ее способность гасить возмущающие воздействия. Обладающие такой способностью геосистемы обычно называются стабильными и отличаются нечувствительностью к внешним воздействиям. В то же время существуют геосистемы, чрезвычайно чувствительные к изменениям внешней среды, причем часто незначительные воздействия на такие геосистемы приводят к необратимым последствиям². Таким образом, понятие «чувствительность» отражает степень стабильности или лабильности геосистем, или способность геосистем адаптироваться при непрерывно изменяющихся внешних условиях.

Переходные состояния. Выше рассмотренные понятия относятся к устойчивым, т. е. существующим достаточно долго криогенным системам. В криосфере существуют также определенные состояния, определяемые как переходные, при которых структурные связи еще не стабилизированы. Этим состояниям соответствуют этапы формирования криогенных систем, их перестройки и разрушения. Динамика переходных состояний определяется тем обстоятельством, что в них отсутствуют четко выраженные инварианты.

Степень устойчивости криогенных систем неодинакова. Изменение какого-либо из параметров внешней среды влечет за собой соответствующую перестройку структуры криогенной системы (ее температурного режима, взаиморасположения ледяных элементов, мощности, содержания незамерзшей воды, льдистости). Строение и свойства устойчивых криогенных систем изучены довольно хорошо. Однако пограничные состояния, когда криогенные системы только формируются или, наоборот, изменяются после достижения критических возмущений, исследованы гораздо слабее.

В самом общем виде устойчивость криогенных систем обуславливается возможностью сохранять отрицательную температуру и лед. Устойчивость криогенной системы утрачивается после того, когда ее температура поднимается до значений интенсивных фазовых переходов и в ней начинают разрушаться связи, обусловленные наличием льда. Для некоторых условий (переохлаждение воды, повышенные давления, минерализация растворов, изменение структуры воды) температуры могут быть заметно ниже 0 °С. Степень устойчивости криогенных систем неодинакова; например, более крупные системы обладают большей инерционностью.

¹ Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. М. : Книга по Требованию, 2014.

² Чигир В. Г., Зайцев В. А., Голубчиков Ю. Н. Основные вопросы устойчивости геосистем // Геоэкология Севера. М. : Изд-во МГУ, 1992. С. 63—66.

6.3. Некоторые методические требования к исследованиям криогенных систем

Вольное обращение с понятием «геосистема» весьма распространено¹. Часто этот термин применяют и для обозначения любого природного объекта исследования, и для территориальной привязки без генетической или ландшафтной приуроченности. Такое использование понятия «геосистема» дискредитирует саму суть геосистемного подхода и позволяет трактовать его как термин свободного пользования, не несущий никакого конкретного содержания.

Общие принципы проведения исследований в рамках геосистемного подхода изложены П. К. Анохиным. Наиболее характерной чертой системного подхода является то, что в исследовательской работе не может быть аналитического изучения какого-то частного объекта без точной идентификации этого частного в большой системе. Таким образом, со стратегической и практической точек зрения исследователь должен иметь прежде всего конкретную концепцию системы, которая должна удовлетворять основным требованиям самого понятия системы, и лишь после этого формулировать тот пункт системы, который подлежит конкретному исследованию.

Каждую криогенную геосистему, какой бы сложной она не была, можно рассматривать как совокупность нескольких более простых подсистем. Выделив и охарактеризовав строение подсистем и их взаимодействие, можно понять последовательность процессов, сформировавших изучаемую систему (мерзлую фацию, ледяную жилу, мерзлую толщу, тектоническую структуру с залегающими в ее пределах многолетнемерзлыми породами или территорию с распределенными на ней полигенетическими комплексами). При этом главное — правильно выделить предмет изучения, охарактеризовать свойства, выявить внутренние и внешние связи, определить пространственно-временные особенности развития. К частным, прикладным требованиям проведения исследований криогенных геосистем относятся следующие²:

- выявление элементов, составляющих данную систему;
- выяснение внутренних связей и зависимостей между элементами данной системы, что позволяет получить представление о внутренней организации (строении) исследуемой системы;
- определение морфологии рассматриваемой системы и внешних границ системы;

¹ Сочава Б. В. Введение в учение о геосистемах; Голубчик М. М. и др. Теория и методология географической науки : учеб. пособие для вузов. М. : ВЛАДОС, 2005.

² Голубчик М. М. и др. Теория и методология географической науки.

— выявление иерархического уровня системы (в какую систему она входит в качестве подсистемы и какие подсистемы ее составляют);

— выяснение условий, необходимых для формирования и функционирования системы (литогенной и криогенной подсистем);

— выявление внешних связей системы с окружающей средой;

— определение этапов ее формирования, ее современное состояние, а также возможные перспективы развития.

1. Высшим уровнем, куда входят составной частью все частные классификации, является криосферный уровень. Данный уровень включает зональные и палеогеографические факторы. На нем выделяются природные зоны (являющиеся подсистемами криосферы), связанные с взаимодействием Земли и Солнца, и палеогеографические параметры, связанные с распределением геосфер (литосферы, гидросферы, атмосферы), климата. Согласно зональным и палеогеографическим границам выделяются соответствующие криогенные системы, охватывающие криосферу для некоторого временного рубежа. Двигаясь по хронологической шкале, можно рассматривать изменение криосферы во времени.

Для литосферы наиболее высоким уровнем формирования криогенных систем является криолитозона. Она охватывает все криогенные образования в литосфере Земли, от эфемерных, существующих несколько часов, с мощностью в несколько сантиметров, до многолетнемерзлых горизонтов, существующих сотни тысяч и миллионы лет, мощностью в несколько сот метров. Структура криолитозоны отражает локальные, зональные и глобальные особенности теплообмена между различными компонентами Земли, а также Земли и Солнца. Криолитозона, сама являясь подсистемой криосферы Земли, в свою очередь состоит из нескольких подсистем.

2. В подсистемы криолитозоны входят криогенные системы, объединенные по генетическому признаку; такие группы существуют для всех геосфер (типы облаков для атмосферы, видовые различия для биологических и ботанических объектов, особенности структурной организации хозяйственных объектов, учитывающих криогенную составляющую, генетические типы отложений для мерзлых пород, типы льдов водоемов, снегов, ледников). На структурно-генетическом уровне рассматриваются природные образования единого генезиса на фоне их существования в области отрицательных температур. В строении криогенной системы отражены ее генетические и криогенные особенности. При исследовании на этом уровне рассматривается история формирования криогенных систем, выделяются границы существования, фиксируются общие структурно-текстурные параметры.

3. Структурно-текстурный уровень соответствует не естественно-историческим природным комплексам, а их отдельным струк-

турным элементам, в которых отражается влияние криогенного фактора (строение отдельного ледника, конкретной наледи, единичного биологического объекта, структурно-текстурные особенности отдельной фации).

4. Первичному уровню криогенной системы соответствует элементарный компонент, в котором проявляется воздействие криогенного фактора (клетка живого организма, в структуру которой заложен механизм противодействия разрушающему действию льдообразования, кристалл льда, единичный объект геотехнической системы, в котором учитывается криогенное воздействие.

6.4. Мерзлые породы как геосистемы

Применительно к криогенным объектам в воде или воздухе, или к объектам, формирующимся на контактах сред (ледники, наледи, снежный покров, водные льды), а также к биологическим, ботаническим (клеточный, организм, сообщество) или социально-криологическим структурам (природно-технические системы (ПТС) различного уровня) понятия системы очевидны и исходят из их предметной определенности. Для мерзлых пород, несмотря на долгую историю их изучения, общепринятого подхода в выделении базовых объектов исследования, систематики и иерархической организации пока не разработано.

Первое определение мерзлой породы, данное М. И. Сумгиным в 1934 г., базировалось на температурном факторе. В основание самого понятия вечной мерзлоты кладется температура почвы. С. Г. Пархоменко определяет мерзлые породы как криофильные горные породы, в состав которых входят лед и другие криофильные минералы. Это противоречие впоследствии было снято. Мерзлыми почвами, породами, грунтами называются почвы, породы, грунты, коренными признаками которых являются:

- 1) нулевая или отрицательная температура;
- 2) наличие в них H_2O — льда, заключающегося в порах, трещинах и других полостях, свойственных почвам и горным породам¹

В этом случае объект мерзловедения, по образному выражению П. Ф. Швецова, «предстал во всей своей материальной первородности». Им оказались мерзлые почвы и горные породы, мерзлые грунты и зоны мерзлых почв и горных пород — весьма сложные по составу, строению и свойствам физико-механические и физико-химические системы, развивающиеся в процессе тепло- и массообмена с окружающими их качественно иными системами. Здесь впервые понятия «мерзлая порода» и «система» объединены.

¹ Швецов П. Ф. Вводные главы к основам геокриологии // Материалы к основам учения о мерзлых зонах земной коры. М. : Изд-во АН СССР, 1956. Вып. 1.

С 1980-х гг. понятие «геосистема» по отношению к мерзлым породам в геокриологии стало общеупотребляемым, хотя четкого определения, принятого научным сообществом, так и не было предложено. В результате содержание данного понятия все время расширяется. Приведем некоторые примеры.

1. По уточненному определению П. Ф. Швецова¹, основным объектом геокриологии являются физико-геологические системы, включающие интенсивно обменивающиеся теплом промерзающие, мерзлые, протаивающие и талые слои и толщи земной коры, обладающие криогенными особенностями состава, строения, сложения, а также морфогенеза (микро- и мезорельефа поверхности). Данное определение не содержит геологических и генетических признаков и не позволяет выявить целостность геосистем, их морфологию, структуру и внутренние связи, что не дает возможности продемонстрировать их иерархическую организацию. Утверждение автора, что объектом региональной геокриологии являются типы, классы, роды и виды геокриологических систем, не сопровождается выделением системообразующих признаков и не иллюстрируется соответствующей классификацией.

2. Согласно Э. Д. Ершову³, изучение многолетнемерзлых пород можно разложить на ряд задач, связанных с изучением отдельных характеристик, таких как состав, строение, свойства, мощность, температурный режим и др. Каждая из геокриологических характеристик отражает определенное качество объекта и его связь с другими характеристиками (свойствами, проявлениями). В целом все характеристики природной среды образуют единый природный комплекс — геосистему. В утверждении, что соединение полученных частных характеристик есть система, по нашему мнению, содержится серьезная методологическая ошибка. Целое при своем становлении приобретает собственные и особые принципы организации, не переводимые на принципы и свойства тех компонентов и процессов, из которых они формируются. Системы, и геосистемы в том числе, эмерджентны, т. е. обладают свойствами, которых нет у их составляющих в отдельности. При этом важным обстоятельством является то, что эмерджентность обычно проявляется только тогда, когда система начинает функционировать. Поэтому недостаточно просто знать те элементы, из которых состоит система, и связи между элементами, необходимо понимать, как они, взаимодействуя между собой, функционируют как целое.

3. По А. И. Попову², мерзлые породы являются многофазными и многокомпонентными системами. По агрегатному состоянию в мерзлых породах следует выделить твердую, жидкую и газообраз-

¹ Основы геокриологии (мерзлотоведения) Ч. 1. Общая геокриология / отв.ред. П. Ф. Швецов, Б. Н. Доставалов. М. : Изд-во АН СССР, 1959.

² Попов А. И., Розенбаум Г. Э., Тумель Н. В. Криолитология.

ную составляющие. Твердая составляющая включает главным образом скелет мерзлых горных пород и лед. В этом случае системой называется общий состав, присущий любому объекту криолитозоны, без генетической, пространственной, структурной и морфологических характеристик.

4. Согласно В. И. Соломатину¹, под криогеосистемой подразумевается любой по масштабу, физическим свойствам, внутренней структуре естественно-исторически сложившийся комплекс криолитозоны, имеющий в своем составе временно, периодически или постоянно мерзлый субстрат. Важнейшими составляющими мерзлотных геосистем являются подземные льды и вмещающие их мерзлые породы, мерзлотный рельеф, деятельный слой, почвенно-растительный и снежный покровы, поверхностные и грунтовые воды. В данном определении утрачивается целостность объекта, поскольку механически объединяются разнородные объекты, например современные компоненты ландшафта (снег, обводненность, растительность, рельеф и др.), с криогенной составляющей многолетне-мерзлых пород, сформированной в других условиях.

5. По определению Д. С. Дроздова², природные геосистемы (комплексы) криолитозоны — это саморегулируемые и самовосстанавливающиеся материальные системы взаимосвязанных элементов (горных пород, подземных и поверхностных вод, биоты) и компонентов (природных геосистем более низких рангов), между которыми происходит массо- и энергообмен под воздействием тех или иных ведущих факторов. Данный подход перенесен в геокриологию из ландшафтоведения и не отражает некоторых свойств мерзлых пород. Например, в мерзлых породах энергообмен осуществляется в полной мере, а массообмен весьма затруднен, кроме того, в этом определении совершенно не отражена криогенная составляющая.

Приведенные примеры являются типичными и охватывают большинство вариантов применения понятия «геосистема» в геокриологии. В данных определениях отсутствуют важные критерии выделения геосистем как целостных, локализованных в пространстве природных объектов с присущими им границами, внутренним строением, связями между отдельными элементами, свойствами, иерархической организацией, историей и др. Геосистемный подход в том виде, в каком он используется в настоящее время, является неполным и внутренне противоречивым. Это осложняет его применение в теоретических построениях, ограничивает использование в практике геокриологических исследований.

¹ Геоэкология Севера (введение в геокриоэкологию) / под ред. В. И. Соломатина. М. : Изд-во МГУ, 1992.

² Дроздов Д. С. Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии : Автореф. дисс. ... доктора геолого-минералогических наук. Тюмень, 2004.

Всю совокупность факторов, определяющих формирование мерзлых пород, можно условно разделить на две группы: определяющие структуру и свойства вещества, включенного в зону криогенеза, и определяющие теплообменные процессы фазового перехода воды в лед. Основная трудность дифференциации криолитозоны состоит в выделении, группировке и ранжировании этих факторов. Задача упрощается, если исходить из того, что мы имеем дело с целостными сформировавшимися объектами, сохраняющими структуру и морфологию на всем протяжении своего существования. При этом закономерности строения, морфологии и пространственного распределения обуславливаются литогенной историей, т. е. генезисом этих объектов и последующим преобразованием. Закономерности распределения ледяных элементов определяются криогенной историей, проявляющейся в последовательной смене комплексов парагенетических криогенных процессов, обусловленной геологическим строением и особенностями тепло- и массообмена. Таким образом, взаимодействие двух отмеченных групп факторов реализуется в виде формирования мерзлой породы.

И. Д. Данилов¹ предложил соединить генетический подход, при котором рассматривается способ образования пород (морские, аллювиальные и т. д.), и геокриологический, учитывающий прежде всего способ промерзания. Он выделяет криолитогенетические комплексы — естественноисторические сообщества горных пород, сформированных или преобразованных в определенных природно-климатических (и мерзлотных), неотектонических и структурно-геоморфологических обстановках: синкриогенно-континентальный, эпикриогенно-маринный и эпикриогенно-континентальный.

В соответствии с этим подходом в качестве объекта геокриологии выделяется *криогенная геосистема* — геологическое образование, соответствующее определенному уровню структурной организации геологической среды (геологическое тело, совокупность геологических тел) вместе с соответствующей ему совокупностью ледяных включений (криогенное строение), распределение, морфология и строение которых отражают историю перехода геологического объекта из немерзлого состояния в мерзлое². В определение не включен температурный показатель, поскольку одним из основных элементов криогенной геосистемы является лед, что уже отражает условия ее существования.

Формирование и функционирование криогенных геосистем определяется взаимодействием двух основных составляющих их подсистем. Литогенной, включающей геологическое тело или совокуп-

¹ Данилов И. Д. Криолитогенетический подход к выделению криогенных формаций // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 1998.

² Хименков А. Н. и др. Очерки вероятностной геокриологии.

ность иерархически организованных геологических тел, и криогенной, включающей ледяные элементы. распределение, морфология и структура которых отражает историю перехода геологического тела из немерзлого состояния в мерзлое.

Литогенная подсистема. Литогенная составляющая является основой криогенных геосистем, поскольку все криогенные явления и процессы представляют собой наложенные или сопутствующие литогенным¹. Именно литогенная основа является системообразующим фактором, который через закономерные изменения вещественного состава определяет особенности процессов криогенеза и в конечном счете пространственное распределение и морфологию ледяных элементов. Выбор литогенной составляющей в качестве базового структурного элемента позволяет выделять границы криогенных геосистем различных иерархических уровней. Общая последовательность операций по разделению геосистем включает несколько функциональных этапов. Геосистема более высокого уровня разбивается на множество элементов (элементарных областей дискретизации геологической среды). Последовательность разбиения зависит от принятых гипотез о строении геологической среды и об ее взаимодействии с другими средами и полями. Наиболее показательными являются последовательное разделение геологической среды на все более однородные части и их характеристика.

Иерархический уровень изучаемых геосистем зависит от масштаба исследований. По мере перехода от таксонов низкого ранга к таксонам более высокого ранга проводится типизация частных показателей в виде обобщенных характеристик с указанием средних значений и диапазона их изменений. Таким образом, описание криогенной геосистемы представляет собой модель, в которой некоторому устойчивому блоку — литогенной основе — соответствуют параметры криогенных элементов. На каждом структурном уровне характер взаимосвязи между криогенными параметрами и литогенной основой для однотипных систем будет сходен².

Криогенная подсистема. Криогенная подсистема представлена ледяными включениями или целиком состоит из льда. Морфология и строение криогенной подсистемы содержат информацию о состоянии литогенной основы к моменту промерзания, а также о совокупности и стадийности процессов, связанных с льдообразованием. Формирование криогенного строения обуславливается следующими факторами: составом породы отдельных геологических тел, чередованием пород, преобразованием породы (диагенез, метаморфизм, выветривание, деформации), криогенной историей

¹ Гасанов Ш. Ш. Криолитологический анализ. М. : Наука, 1981.

² Хименков А. Н. и др. Очерки вероятностной геокриологии; Мельников В. П. др. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования.

(темпы промерзания, неоднородности температурного поля, чередование комплексов парагенетических процессов). Обзор строения различных компонентов криосферы показывает, что она состоит из иерархически организованных устойчивых криогенных подсистем, имеющих различные размеры, время существования, положение в пространстве, динамики развития, причем каждому геологическому уровню должен соответствовать уровень организации криогенных подсистем (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Уровни организации криогенных геосистем

Иерархический уровень криогенных геосистем	Структурные характеристики подсистем	
	Параметры литогенных подсистем	Параметры криогенных подсистем
Глобальный (криолитозона)	Вся совокупность мерзлых, охлажденных и морозных пород литосферы	Выделение общих параметров (положение верхней и нижней границ, мощность) и тенденций их изменения
Региональный (геоструктура)	Формации (парагенетические комплексы пород в пределах геоструктуры)	Выделение усредненных характеристик распределения, морфологии ледяных элементов для различных генетических типов в пределах геоструктур. Выделение общих параметров (положение верхней и нижней границ, мощность, сплошность)
Территориальный (неоднородности внутри геоструктуры)	Субформации (парагенетические комплексы пород в пределах территориальных неоднородностей геоструктуры)	Выделение усредненных характеристик распределения, морфологии ледяных элементов для различных генетических типов в пределах территориальных неоднородностей геоструктур. Выделение общих параметров (положение верхней и нижней границ, мощность, сплошность)
Генетический тип	Совокупность фаций одного генетического типа	Выделение типичных характеристик в распределении, морфологии и структуре ледяных элементов для различных фаций генетического типа
Геологическая фация	Фация (монопородное геологическое тело)	Характеристика структуры и морфологии отдельных кристаллов льда, совокупности кристаллов в ледяных образованиях; характеристика морфологии и структуры распределения ледяных образований (криогенных текстур) в пределах фации

Если учесть, что формирование криогенной подсистемы обусловлено поэтапным переходом грунтового массива через состояние термодинамической неустойчивости, связанной с фазовыми переходами, то должно было бы наблюдаться большое разнообразие типов криогенных образований. Однако это не так, в природе отмечается небольшое количество видов криогенных текстур: массивная, слоистая, сетчатая и массивы мономинерального льда.

Небольшое разнообразие видов распределения ледяных элементов при большом количестве воздействующих факторов обуславливается ограничениями, налагаемыми составом и состоянием породы, количеством и составом внутригрунтовых вод и динамикой тепловых потоков в зоне льдообразования. Именно эти факторы определяют литогенную и криогенную историю криогенной геосистемы.

При всей обусловленности видов строения криогенных геосистем наблюдается значительный разброс параметров их строения, связанный с наличием многочисленных неоднородностей природной среды. Неоднородности криогенного строения являются источником важной информации о криогенной истории рассматриваемого объекта. Сформировавшись, криогенная подсистема сохраняется практически неизменной на протяжении всего жизненного цикла криогенной системы, обеспечивая ее идентичность, пространственные связи и устойчивость. Криогенная подсистема формирует структурные уровни, проявляющиеся на низших уровнях организации криогенных геосистем (фации и генетические типы).

6.5. Уровни организации криогенных геосистем

6.5.1. Иерархия

Формирование криогенных геосистем криолитозоны являются результатом естественно-исторического процесса развития геологической среды и достижения ею такого энергетического состояния, при котором происходит изменения фазового состояния воды. В результате образуется новый геологический объект — мерзлая (криогенная) горная порода. Морфология, литологические и структурно-текстурные особенности залегания геологического тела обусловлены его литогенной историей, а распределение и строение льда отражают этап криогенной истории. Для системы жесткость связей между отдельными компонентами является первоочередной в ряду критериев ее выделения. О каких связях может идти речь в случае криогенных геосистем?

Во-первых, закономерное распределение вещества в геологическом теле или распределение геологических тел в генетическом типе. Эти связи определяются конкретными параметрами природ-

ных факторов, обеспечивающих формирование и преобразование различных генетических типов пород.

Во-вторых, зависимость распределения ледяных элементов и их строения от вещественного состава и свойств литогенной составляющей. Эта зависимость характеризуется тем, что льдообразование и связанные с ним процессы (миграция связанной воды, криогенное отжатие свободной воды и возникновение криогенных напоров, криогенная сепарация грунтовых вод, криогенное уплотнение грунтов и др.) во многом определяются параметрами и структурой литогенной составляющей (гранулометрический и минералогический состав, плотность, монолитность, минерализация, влажность, содержание органики, трещиноватость, слоистость и др.).

В-третьих, устойчивость структуры криогенных геосистем при изменении внешней среды. С момента возникновения и на всем протяжении своего существования криогенные геосистемы подвергаются значительным температурным колебаниям, которые не выходят за границы значений, необходимых для протекания фазовых переходов. Это обеспечивает постоянство строения и внутренних связей криогенных геосистем.

Рассмотрим теперь иерархическую организацию криогенных геосистем.

Первый уровень — криосферный. Соответствует области пространства отрицательных температур и природных образований, содержащих лед в твердой фазе. Данный уровень определяется энергетическими параметрами, палеогеографическими условиями и отражается в зональности распределения солнечного излучения (космические факторы) и палеогеографическими условиями. Он охватывает все оболочки Земли и включает в себя всю совокупность криогенных образований.

Второй уровень — геосферный. Данный уровень отражает особенности строения криосферы в определенных геосферах Земли (атмосфере, гидросфере, литосфере, биосфере, социосфере) и на их границах.

Третий уровень — структурно-генетический. Соответствует криогенным системам, формирование которых обусловлено единством происхождения (морской, аллювиальный озерно-аллювиальный, озерно-ледниковый, ледниковый, эоловый, озерно-болотный, делювиальный, элювиальный, солифлюкционный, оползневой, пролювиальный). Выделяются особенности распространения: многолетнемерзлые породы (ММП) сплошного распространения (талики занимают до 10 %), прерывистого распространения (талики до 50 %), островного распространения (талики свыше 50 %), редкоостровного распространения (ММП составляют менее 10 % площади).

Четвертый уровень — структурно-морфологический. Соответствует определенным однородным морфологическим элементам

внутри генетического типа — фациям (состав: крупнодисперсный, мелкодисперсный, биогенный, слоистость, содержание органического материала, засоленность, влажность) Реконструируется тип промерзания: эпигенетический, сингенетический; дается общая характеристика криогенного строения. Определяется температура грунтов: переходные ММП со среднегодовой температурой t_{cp} от 0 до -1 °С; высокотемпературные ММП с t_{cp} от -1 до -3 °С; низкотемпературные ММП с t_{cp} от -3 до -7 °С и ниже. Мощность ММП: незначительной мощности (до 20 м), малой мощности (20—50 м), средней мощности (50—100 м), большой мощности (более 100 м).

Пятый уровень — криотестурный. Соответствует особенностям распределения льда в криогенных системах четвертого уровня. Выделяются следующие основные виды криогенных текстур в грунтах: массивная, базальная, корковая, порфировидная, линзовидная, сетчатая, слоистая. Фактически это уровень формирования льда в реальных условиях. Здесь фиксируются процессы, обеспечивающие возникновение и развитие ледяных образований, выявляются факторы, обеспечивающие развитие данных процессов (энергетические, вещественные, структурные), фиксируются контакты. На криотекстурном уровне рассматривается стадии развития элементарных криогенных систем в отдельных точках естественно-исторических криогенных образований в небольшие отрезки времени (по сравнению с временем формирования самих образований).

Шестой уровень — криоструктурный. Охватывает микростроение мерзлой минеральной породы и отдельных ледяных образований, формирующих текстуру криогенных фаций. Для минеральной составляющей криоструктурному уровню соответствует лед-цемент (базальный, поровый, пленочный, контактный, смешанный), для отдельных ледяных элементов — ориентировка и морфология формирующих их кристаллов. Выделяют следующие основные виды структуры льда в грунте¹:

1) аллотриоморфнозернистую (неправильнозернистую) — кристаллы льда неправильные, деформированные под воздействием других зерен; кристаллографическая ориентировка беспорядочная;

2) панидиоморфнозернистую (призматическую) — кристаллы имеют правильную форму и упорядоченную линейную ориентировку;

3) гипидиоморфнозернистую, занимающую промежуточное положение между двумя первыми. Кристаллы льда или пластинчатые (сплюснутые по главной оси), или столбчатые (вытянутые по главной оси).

Седьмой уровень — первичная криогенная система. Соответствует единичному кристаллу льда (представляющему единичное образование или входящему в состав ледяного элементы мерзлого

¹ Шумский П. А. Основы структурного ледоведения.

грунта). Данный уровень соответствует первичному материальному объекту криосферы. Он присутствует (хотя бы потенциально) во всем пространстве криосферы и обеспечивает единство свойств и строения всех криогенных образований.

Изучение криогенных систем иногда представляется ошеломляюще трудным. Однако при этом трудности могут быть преодолены правильным проведением исследования. Единичную криогенную систему, какой бы сложной она не была, можно рассматривать как совокупность нескольких простых подсистем. Здесь напрашивается сравнение со сложным механизмом. На первый взгляд, невозможно понять, как он функционирует. Но он состоит из подогнанных подсистем, обеспечивающих согласованную работу. Выделив и охарактеризовав строение подсистем и их взаимодействие, можно понять последовательность процессов, сформировавших исследуемую криогенную систему (ледник, ледяную жилу, мерзлую толщу, снежный покров, ледяной массив). Наука располагает современными методами изучения природы, позволяющими изучить состав, строение, свойства, возраст объекта и процессы формирования. При этом главное — правильно выделить предмет изучения, проследить его внутренние и внешние связи, определить путь развития во времени, охарактеризовать свойства.

6.5.2. Состояния криогенных систем

Криогенная система в рамках границ существования претерпевает изменения, связанные с энергообменом, и в течение определенного времени пребывает в следующих состояниях:

- 1) становление;
- 2) зрелая фаза (квазистационарное состояние), представляет собой серию устойчивых состояний в пределах выделенного инварианта;
- 3) фаза деструкции (переход к другому инварианту криогенной системы или полное его разрушение).

При рассмотрении изменений следует помнить, что выделение направления их развития еще не свидетельствует о смене состояния. Если при изменении температуры мерзлые породы сохраняют в определенных пределах характерные для них строение и свойства, такой грунтовый массив можно выделять как квазистационарную криогенную систему¹.

Рассмотрим особенности трансформации криогенных систем при смене инварианта и переходе в новое состояние. Переход в новое состояние влечет за собой перестройку внутренней структуры и параметров криогенной системы (ее криогенного строения, по-

¹ Основы геокриологии. Ч. 4. Динамическая геокриология. М. : Изд-во МГУ, 2001.

ложения в пространстве, температурного режима), а система стремится к равновесию с изменившимися условиями.

Траектория, по которой эволюционирует система при увеличении управляющего параметра, характеризуется чередованием устойчивых областей, где доминируют детерминистические законы, и неустойчивых областей вблизи точек бифуркаций, где перед системой открывается возможность выбора одного из нескольких вариантов будущего. Эта смесь необходимости и случайности и составляет «историю» системы¹.

В динамичных переходных зонах наблюдается наибольший разброс параметров показателей, характерных для соседствующих квазиустойчивых областей. Причины, обуславливающие дискретность изменения различных криогенных характеристик, связаны с увеличением внутренних границ в пределах геосистемы и внешних граничных условий (граница кристалла или различных совокупностей кристаллов, гранулометрический и минералогический состав, засоленность, границы ландшафтов, береговая зона между акваторией и сушей, фациальная неоднородность, форма рельефа, глубина бассейна, экспозиция склона). Изменение различных характеристик вследствие большого количества точек бифуркации на границах происходит дискретно. Интерес к неравномерному развитию природных систем имеет давнюю историю. Дж. К. Максвелл, анализируя взрыв ружейного пороха, заметил²:

«Во всех этих случаях имеется одно общее обстоятельство: система обладает некоторым количеством потенциальной энергии, способным трансформироваться в движение, но не трансформирующимся до тех пор, пока система не достигнет определенной конфигурации, для перехода в которую требуется совершить работу, в одних случаях бесконечно малую, но, вообще говоря, не находящуюся в определенной пропорции к энергии, выделяемой вследствие перехода. Примерами могут служить скала, отделившаяся от основания в результате выветривания и балансирующая на выступе горного склона, небольшая искра, поджигающая огромный лес, слово, ввергающее мир в пучину войны, крупица вещества, лишаящая человека воли, крохотная спора, заражающая посевы картофеля, гемулла, превращающая нас в философов или идиотов. У каждого существования выше определенного ранга имеются свои особые точки; чем выше ранг, тем их больше. В этих точках воздействия, физическая величина которых слишком мала для того, чтобы существо конечных размеров принимало их во внимание, могут приводить к необычайно важным последствиям. Всеми великими результатами человеческой деятельности мы обязаны искусному использованию таких особых состояний, когда такая возможность предоставляется».

¹ Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М. : URSS, 2003.

² Maxwell J. C. Science and free will // Campbell L., Garnet W. The life of James Clerk Maxwell. London : Macmillan, 1882.

Стационарное состояние системы зависит от значений управляющих параметров. В случае криогенных систем основным управляющим параметром является температура мерзлых пород. Увеличение температуры уводит криогенную систему все дальше и дальше от равновесия. При некотором критическом значении температуры система достигает порога устойчивости, которое называется точкой бифуркации. В точке бифуркации система становится неустойчивой относительно флуктуаций. В этом случае появляется минимум два пути дальнейшего развития.

Встает очевидный вопрос о достоверности прогнозирования поведения криогенных систем. В геокриологии, например, выявляется, «что для статистически неоднородных сред попытки неограниченного повышения точности прогноза принципиально обречены на неудачу, так как в силу самой природы среды существует некоторая предельная минимальная величина, меньше которой погрешность быть не может»¹.

Степень инерционности мерзлотных геосистем и отдельных их параметров неодинакова. Необходимо понять, какое изменение состояния криогеосистем следует считать выходом из равновесия. Очевидно, что устойчивость криогенных систем может обеспечить только способность при данных воздействиях сохранять отрицательную температуру и мерзлый субстрат (содержать лед). Если именно так понимать предел устойчивости криогеосистемы, то он, следовательно, определяется количеством энергии, необходимой для повышения температуры систем до указанных значений фазовых переходов «лед — вода». Такое количество энергии можно считать мерой кратковременной предельно допустимой нагрузки на систему. Следует учитывать, что в реальных условиях для длиннопериодной деградации криогеосистемы требуется значительно меньше энергии. Это связано с физикой прямых и обратных связей в мерзлотной геосистеме, когда одни процессы способны инициировать другие.

Внешнее воздействие на макросистему посредством определенных воздействий (температурных, механических) может привести к преимущественному возбуждению отдельных ее подсистем и давать, при определенных условиях, эффект резонанса. При этом они будут релаксировать быстрее и, возможно, по иному закону, чем система в целом. Еще одной отличительной особенностью переходных состояний является обратимость вектора развития. Если в квазистационарных системах развитие имеет определенную направленность, которая поддерживается самой структурой системы, то в переходных зонах, где структурированность уменьшается, раз-

¹ Гречищев С. Е., Чистотинов Л. В., Шур Ю. Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М. : Недра, 1980.

витие приобретает более вероятностный характер и может резко изменять направление развития вплоть до обратного.

В переходной зоне подсистемы криогенные системы получают большую свободу и самостоятельность. Воздействующий фактор (или группа факторов) избирательно влияет на отдельные подсистемы. Это определяет тенденцию, динамику и конечный результат преобразования структуры и свойств криогенной системы. В каком-то смысле структуру переходных криогенных зон можно считать определенным образом закодированной информацией о направленности, интенсивности и стадии развития изменений.

6.5.3. Динамика криогенных геосистем

Важным разделом учения о геосистемах, и в частности о криогенных геосистемах, является изучение динамики их как целостных природных образований. Это имеет большое теоретическое и практическое значение, поскольку аналитический подход ориентирован на фиксацию изменений отдельных разрозненных показателей среды и не отражает изменения изучаемого объекта в целом. В зависимости от рассматриваемого показателя следует выделять несколько видов динамики криогенных геосистем:

— динамика формирования (разрушения), когда фиксируются структурные и морфологические изменения, связанные с формированием или разрушением (частичным или полным) криогенных геосистем;

— динамика изменения температурного поля, когда фиксируется пространственная морфология температурного поля криогенных геосистем (криогенные геосистемы сохраняют при этом устойчивое положение и первичные границы, но температуры и свойства отдельных участков могут изменяться в широких диапазонах);

— динамика рекомбинации (фиксируются структурные изменения криогенных подсистем в пределах сложных территориальных геосистем). Изменения климата, тектонического режима и др. приводят к изменению экзогенных процессов и соответствующему изменению соотношения в распределении криогенных подсистем в пределах более крупной системы;

— динамика замещения, связанная с направленной сменой криогенных геосистем определенного генетического типа, системами иного генезиса (фиксируется соотношение вновь сформировавшихся систем). В качестве примера можно привести направленное разрушение морских равнин севера Ямала или едомы севера Якутии экзогенными процессами с последующим формированием на их месте комплекса вторичных криогенных геосистем различного генезиса¹.

¹ Хименков А. Н. Геосистемный подход в геокриологии // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 2. С. 74—82.

6.5.4. Гетерохронность развития криогенных геосистем

Использование системного подхода связано с обязательным учетом структурности времени. Во-первых, для каждого уровня организации на порядки различается время жизненного цикла. Во-вторых, многочисленность и стадийность комплексов процессов, наличие прямых и обратных связей обуславливают неоднородность времени. Один и тот же отрезок времени даже для близких по генезису систем может иметь разное наполнение. В-третьих, возможна разнонаправленность развития во времени различных частей геосистем. На одних участках криогенная составляющая может стабилизироваться, а на других продолжает формироваться, при этом некоторые части в область криогенеза могут быть вовлечены позднее или вообще не вовлечены.

Следует помнить, что единые в настоящее время мерзлые толщи представляют собой разновозрастные образования. История многолетнемерзлых толщ любого генезиса является историей развития и взаимодействия отдельных разновозрастных и часто полигенетичных криогенных геосистем, их формирования, встраивания в совокупность других, трансформации и разрушения. Эта история двойственна; с одной стороны, она, несомненно, отражает глобальные или территориальные изменения природной среды, с другой — значительную автономность происходящих событий на локальном уровне.

Весьма продуктивными при рассмотрении формирования криогенных геосистем различного иерархического уровня могут оказаться идеи о темпоральности природных процессов, впервые предложенные Я. И. Икскулем и Д. Д. Фрейзером. Темпомир — это автономный фрагмент мира со своим внутренним временем, идущим независимо от остальных частей мира — других темпомиров, по причине ограниченности или отсутствия взаимодействия с ними. В разных темпомирах темпы времени могут радикально различаться. По Д. Д. Фрейзеру, каждый структурный уровень организации материи обнаруживает собственную темпоральность, и иерархии уровней организации материи соответствует иерархия связанных с ними темпоральностей. Понятие темпомира неразрывно связано с иерархической организацией систем. Объекты одного системного уровня соизмеримы по масштабу и взаимосвязаны единым комплексом причинно-следственных отношений на макроуровне. Поэтому они подчинены соизмеримому темпу изменений и образуют единый темпомир¹.

Практически любая рассматриваемая территория криолитозоны представляет собой совокупность локальных участков, внутренний распорядок которых определяется своим темпом развития и структурой причинно-следственных пространственных взаимодействий

¹ Fraser J. T. The genesis and the evolution of time. Brighton : Harvester Press, 1982.

на уровне горизонтальных связей; внешний распорядок определяется иерархией масштабов «микро, макро, мега» на уровне вертикальных связей. В результате возникает множество локальных криогенных геосистем, обуславливая своего рода мозаичность, которая не является статичной, а последовательно эволюционирует.

Происходит общее закономерное и направленное постепенное изменение параметров геосистем: температуры, сплошности, криогенного строения, внешних границ и др. При направленном формировании локальные геосистемы объединяются, формируя криогенные геосистемы более высокого уровня, становясь для них подсистемами. При тепловом разрушении в криогенных геосистемах нарастает локальная дифференциация температур в пределах отрицательных значений, затем уменьшается сплошность. В последующем геосистема распадается на фрагменты.

Таким образом, развитие геосистемного подхода невозможно без учета различий в темпах происходящих событий даже на близкорасположенных участках. Здесь же остро встает проблема гетерохронности. Различные участки криогенных геосистем могут формироваться в разное время. И чем выше ранг рассматриваемой геосистемы, тем гетерохронность и гетерогенность отдельных частей будет больше. В геокриологии изучение гетерохронности и гетерогенности ледяных образований успешно осуществляет Ю. К. Васильчук. Ему удалось, используя анализ изотопного состава повторно-жильного льда, пластовых льдов бугров пучения, доказать разновременность и гетерогенность формирования различных структурных элементов криогенных геосистем уровня фаций и генетических типов¹.

6.5.5. Временные аспекты формирования криогенных систем

При исследовании криогенных систем фактор времени, несмотря на его важность, обычно не рассматривается. Проводя анализ криогенного строения или делая палеогеографические реконструкции на основании изучения ледяных образований (на поверхности или внутри литосферы или гидросферы), основываются на существующих представлениях о процессах. Однако фактор времени, наряду с тепловым и вещественным состояниями среды, в которой формируется и существует криогенная система, влияет на формирование ее строения и свойства. По мнению П. Вильямса², «плотность

¹ Васильчук Ю. К. и др. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М. : Изд-во МГУ, 2008; Васильчук Ю. К. Рубеж плейстоцена-голоцена около 10 тысяч лет назад — время коренной смены типичных геокриологических образований // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 29—38.

² Williams P. J. Climatic factors controlling the distribution of certain frozen ground phenomena // *Annaler Geografiska*. 1943. P. 339—347.

распределения характерных палеомерзлотных образований в грунтах отражает не столько климатические условия, сколько период времени, в течении которого они могли возникнуть». Это утверждение является справедливым по отношению к любой криогенной системе.

Существование криогенных систем определяется естественными природными циклами колебаний, меняющих тепловое состояние различных компонентов Земли. Суточные, годовые, многолетние и тысячелетние колебания температуры формируют в определенных оболочках и географических зонах Земли области отрицательных температур. Они отражаются на времени существования криогенных систем, на их распространенности и выраженности.

Суточный цикл определяет развитие криогенных образований, формирующихся за счет суточного понижения температуры ниже 0 °С (изморозь, иней, лед на водной или земной поверхности). Здесь для определенного промежутка времени можно выделить интервал начала развития (переходная зона), существование устойчивой криогенной системы и этап разрушения (переходная зона).

Годовой цикл определяет развитие криогенных образований, формирующихся за счет годового понижения температуры ниже 0 °С (снег, покровный лед водоемов, слой отрицательных температур в морских водоемах, сезонномерзлый горизонт). Здесь можно проследить те же стадии развития криогенных систем, как и при суточном цикле.

Долговременное существование криогенных систем определяется особенностями тепловых процессов. Там, где годовое соотношение прихода и расхода тепла определяют существование отрицательных температур, получают развитие криогенные системы, которые существуют сотни, тысячи и миллионы лет (снежники, ледники, многолетнемерзлые породы, слой отрицательнотемпературных вод в полярных морских бассейнах). За время их существования происходит неоднократное изменение внешних условий, поэтому система может перестраиваться, распадаться и снова образовывать новые криогенные системы. Все это может происходить при отрицательных температурах.

Для каждой криогенной системы существует минимальное время формирования, т. е. для одних и тех же условий (гранулометрический состав, температура, влажность, засоленность, плотность) криогенное строение различно только из-за разных скоростей льдообразования. Сходное криогенное строение в различных породах может быть результатом различного времени промерзания. Например, для формирования залежи пластового льда при погребении требуется быстрое поступление перекрывающих осадков, а для развития внутригрунтовой залежи сегрегационного генезиса необ-

ходимо длительное сохранение соотношения между промерзанием и потоком поровой влаги к его фронту.

Использование абсолютного времени при этом малоэффективно. Но если берется за основу время функционирования и существования объекта в естественных условиях, выделяются этапы жизни криогенной системы. И в самом, казалось бы, мимолетном состоянии можно выделить фазу роста, фазу стабильного существования и фазу разрушения.

Развитие криогенных систем в переходных зонах идет быстрее, чем в квазистационарных состояниях. Это связано с тем, что элементарные процессы более интенсивны; в переходной зоне наблюдаются большие градиенты температуры или действующей силы и большее разнообразие влияющих факторов.

Существует два подхода к понятию времени:

1) время есть нечто однородное, постоянное и внешнее по отношению к событиям;

2) время неотделимо от природных процессов.

Сегодня развиваются представления, по которым материя характеризуется неоднородным (квантовым) характером эволюции, при котором состояния относительного покоя разделены кратковременными состояниями перестройки. Чтобы обеспечить количественные оценки неоднородного времени, следует рассматривать время не как последовательность событий (моментов), а как последовательность разнокачественных состояний (интервалов), разделенных событиями-моментами¹.

В стратиграфии понятие изохронности (одновременности) имеет отношение только к интервалам (объемам), но не к границам. Этот принцип характеризует реальное время макропроцессов, состоящее из интервалов, в отличие от условного физического «времени», состоящего из моментов. Последовательность интервалов исторического времени есть последовательность состояний.

Изменения, происходящие при формировании, деформировании и разрушении криогенных систем, группируются крайне неравномерно. В короткие пространственно-временные интервалы, соответствующие переходным зонам-состояниям, происходит формирование основных свойств криогенных систем, затем наступает продолжительный этап покоя. Так продолжается до тех пор, пока внешние воздействия не выведут систему из устойчивого состояния. Опять наступает непродолжительная фаза, в которой резко произойдет перестройка структуры и система перейдет в устойчивое состояние в соответствии с новыми условиями. Схема алгорит-

¹ Лазарев С. С. Понятие «время» и геологическая летопись земной коры // Вопросы философии. 2002. № 1. С. 77—89.

ма, который моделирует развитие криогенной системы, представлена на рис. 6.1. При этом интервал, который для одной системы будет соответствовать переходному состоянию, для другой будет превосходить время ее существования.



Рис. 6.1. Алгоритм, моделирующий развитие криогенной системы

6.5.6. Криогенные процессы

В широком смысле криогенными процессами являются любые преобразования природной среды, связанные с проявлением фазовых переходов «вода (водяной пар) — лед» и обусловленных ими физических, химических, биохимических и других процессов¹. Они реализуются во всем объеме криосферы и сопровождаются формированием и разрушением льда.

Криогенные процессы являются отдельными элементарными проявлениями нарушения устойчивости и отражают пространственную структуру, строение, состав криогенной системы. Если криогенная система находится в устойчивом квазистационарном состоянии, то криогенные процессы выражены незначительно, часто имеют обратимый характер и не приводят к разрушению системы в целом. В переходных зонах криогенные процессы выражены гораздо сильнее. Они импульсами изменяют систему (формируют,

¹ Гляциологический словарь. Л. : Гидрометеоиздат, 1984.

перестраивают или разрушают ее), но не являются основой самих изменений. Сначала создаются внешние условия формирования или изменения криогенных систем. Затем по мере накопления энергетических или механических изменений меняется состояние системы в целом или ее отдельных частей. И лишь потом развивается парагенетическая совокупность криогенных процессов, трансформирующих или разрушающих криогенные системы, обеспечивая их переход в состояние, соответствующее новым термодинамическим условиям.

Таким образом, отдельные криогенные процессы являются низшим звеном криогенеза, его элементарной, но самой динамичной составляющей, обеспечивающей изменения отдельных частей криосферы вслед за изменившимися внутренними или внешними условиями.

Криогенные процессы никогда не наблюдаются в единичных проявлениях. Криогенной системе (любого ранга) или переходному состоянию соответствует парагенетический комплекс процессов, отражающих их пространственно-временные и структурные особенности. Такие комплексы процессов наблюдаются уже при формировании кристаллов льда. У растущей поверхности ледяного кристалла образуются промежуточные структуры (кластеры). Они присоединяются к растущей поверхности кристалла и транспортируются до определенного участка, где встраиваются в кристаллическую решетку. Одновременно происходит вытеснение или включение примесей в структуру кристалла. После формирования первичного строения кристалла происходит его достройка. Мы наблюдаем систему процессов, каждый из которых обеспечивает выполнение определенной операции.

То же самое происходит при вытаивании залежи подземного льда. На начальном этапе начинается интенсивное развитие оползне-потоков по пластовому льду. Оползни потоки сносят перекрывающий материал и обнажают ледяную поверхность. В результате солнечной радиации происходят интенсивное вытаивание льда, образование крутого уступа и стекание образующейся воды вниз по склону. Образующийся водный поток образует промоины, и начинает развиваться термоэрозия. Образование уступа приводит к обрушению перекрывающего грунта. Оттаявший грунт в нижней части уступа удаляется стекающими водами. Здесь так же каждый процесс выполняет свою роль, а в целом комплекс системно организованных криогенных процессов переводит неустойчивый массив мерзлых пород в другое, более устойчивое состояние. Парагенетические комплексы криогенных процессов меняют свою структуру на разных стадиях формирования, трансформации или разрушения криогенных систем в соответствии с внутренними неоднородностями системы или изменении внешних условий.

Выводы

В строении криогенной системы любого ранга отражены история ее развития, условия тепломассообмена и особенности среды, в которой она образуется.

Развитие криогенных систем происходит неравномерно; состояния относительного покоя разделены кратковременными состояниями неустойчивости, в которых происходит формирование основных параметров новой системы.

Факторы, влияющие на развитие квазистационарной криогенной системы, имеют вероятностный характер.

Парагенетические процессы развития криогенных систем отражают строение и состав последних.

Тема 7

КРИОСФЕРА И ЧЕЛОВЕК

Мерзлота, как тройной символ — природы, народа и личности, таит в себе силы разрушительные и творческие. Выходя наружу, они могут стать губительными. Золото, таящееся в мерзлоте, обращается в золотой пожар, губящий достояние ороченов — тайгу, мох, (пожар), разгоняющий дичь — источник их жизни. Пожары производят золотопромышленники — их погоня за золотом — источник бедствий, а потому и вырождения ороченов. Вечная мерзлота разрушается, когда ее начинают «обживать» и «освоять». Отсюда — «не трогай мерзлоты» ороченов. Но то же — о душе. Прикрытые мерзлотой, таятся в ней горечи, обиды и печальные наблюдения прошлого. Не надо копаться в ее недрах. Мерзлотная бодрость дает силу справиться с разрушающими силами хаоса. Мерзлота — это эллинство.

о. Павел Флоренский

7.1. Криосфера как социально-экономический фактор

Рассматривая криогенные системы различного уровня, нельзя оставить без внимания тему взаимосвязи криосферы и социосферы. Образует ли взаимодействие человеческого общества с криосферой системы с внутренними связями и определенным типом взаимодействия? Частично мы на этот вопрос отвечаем, рассматривая криогенные ПТС.

Но в случае ПТС мы обычно сталкиваемся с крупными инженерными сооружениями или поселениями, значительно трансформирующими криосферу (в основном криолитозону). При этом тип хозяйствования и отношение к окружающей среде переносится из более южных районов и направлен на противоборство человека и криосферы. Еще недавно на слуху были лозунги «покорения Арктики» и «освоения Севера». Сейчас подходы более прагматичны, но не ме-

нее, если не более, разрушительны для криосферы. В то же время тысячелетний опыт обитания человека в холодных регионах дает немало примеров гармоничного сосуществования человека и криосферы.

Взятые для эпиграфа слова П. А. Флоренского, профессионально изучавшего мерзлоту, заключают в себе древнеэллинское понимание жизни — трагический оптимизм, гармонию с окружающим: «Жизнь — вовсе не сплошной праздник и развлечение, в жизни много уродливого, злого, печального и грязного. Но, зная все это, надо иметь пред внутренним взором гармонию и стараться осуществить ее»¹.

Многолетнемерзлые породы на земном шаре в настоящее время занимают около 25 % суши и почти 50 % территории бывшего СССР. С учетом сезонномерзлых пород площадь, занятая мерзлыми породами, достигает 50 % всей суши и практически 100 % территории России (рис. 7.1). Если учесть, что наиболее активная хозяйственная деятельность на Земле приурочена к этим территориям, то становится очевидным влияние криосферы на развитие человечества.



Рис. 7.1. Карта-схема современного распространения мерзлых горных пород²: Многолетнемерзлые породы: — ледникового, — ледового, — горного, — равнинного типов. Сезонномерзлые породы: — гумидного, — аридного типов.

По современным представлениям человек формируется в результате взаимодействия его генотипа с другими людьми и с внешней средой. Поэтому и культура народа, его традиции, особенности хо-

¹ Флоренский П. А. (священник). Сочинения. В 4 т. Т 4 : Письма с Дальнего Востока и Соловков / сост. и общ. ред. игумена Андроника (А. С. Трубачева), П. В. Флоренского, М. С. Трубачевой. М. : Мысль, 1998.

² Гольдберг В. М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л. : Гидрометеиздат, 1987.

зайственной деятельности во многом представляют собой не что иное, как продукт взаимодействия с внешней средой обитания¹.

Место и обстоятельства появления современного *Homo sapiens* до сих пор предсталяют собой некоторую загадку. Следы его существования были обнаружены в разных точках Европы. Самым древним представителем вида считается *Homo sapiens steinheimensis* из Германии и *Swanscombe* в Англии². По неизвестным, а для нашего рассмотрения весьма любопытным причинам он был обнаружен в странах, находившихся в непосредственной близости от ледников.

Человек современного физического типа в целом формируется примерно около 40 тыс. лет назад в эпоху верхнего палеолита. Важно, что это время огромные территории Северного полушария были покрыты ледниками. Обычная географическая зональность стиралась, и на многие тысячи километров — почти через всю Евразию — тянулся обширный пояс приледниковой единой зоны с монотонными природными условиями. У основания ледника простиралась тундра, за ней следовала холодная и сухая степь с зарослями карликовой березы, полярной ивы и других полярных форм.

Казалось бы, что суровым климатическим условиям должны соответствовать какие-то примитивные формы жизнеобитания человека. Между тем данные археологии свидетельствуют, что на огромных плоских заледенелых пространствах сформировалась организация общества, просуществовавшая десятки тысяч лет вплоть до наших дней. Проиллюстрировать это можно на примере хорошо изученной палеолитической стоянки Сунгирь, расположенной недалеко от Владимира. Ее радиоуглеродный возраст установлен в 24—25 тыс. лет. Там были открыты несколько погребений, густо покрытых охрой. Реконструкция показала, как одевались люди той эпохи. И мужчины, и женщины носили просторные меховые или кожаные рубахи, кожаные штаны, соединенные с легкой обувью типа мокасинов, затем что-то вроде унтов или пимов выше колен и меховые шапки. Сверху надевался плащ или просто выделанная шкура, которая застегивалась спереди длинной костяной булавкой. Одежда была покрыта тысячами костяных бус, были найдены костяные перстни, и оружия составные кинжалы, копья, дротики, проколки, резцы. Судя по богатому убранству, в Сунгире были похоронены члены родовой знати. Жилье представляло собой неглубокие ямы, перекрытые кольями и обтянутые шкурами. Внутри были найдены следы костяных.

Характерно, что для верхнего палеолита отмечается расцвет искусства. В обширной области от Сибири до Западной Европы в эпоху

¹ Голубчиков С. Н., Ерохин С. В. Российский Север на переломе эпох. М. : Пасьва, 2003.

² *Stringer C. The origin of our species. Penguin / Allen Lane, 2011.*

ориньякской эпохи (18—25 тыс. лет до н. э.) были распространены женские статуэтки из слоновой кости (Венеры), фигурки животных, прекрасная по своей художественной выразительности живопись на стенах пещер. Основным источником существования была загонная охота, что подразумевает слаженные действия целых коллективов на обширной территории. В настоящее время на местах загонов (крутые обрывы, болотистые низины) находят сотни и тысячи останков животных. В Северной Моравии на становище Пржедмост были обнаружены останки не менее чем тысячи мамонтов¹. Большую роль в рационе древних людей играли северные олени. Северный олень зимой живет на юге, в окраинной полосе лесов, летом откочевывает на сотни километров на север. Верхнепалеолитические охотники, кочуя вслед за оленями, осваивали огромные пространства.

Важнейшим достижением человеческой культуры является появление искусства. Основываясь на исследованиях А. Леруа-Гурхана², можно заключить, что графическое искусство, например, появилось приблизительно 33 000—40 000 лет назад, в течение последнего ледникового периода (эпоха вюрм), в верхнем палеолите (ориньяк и мадлен в Европе), и достигает своего апогея в течение солютре и мадлен (22 000—10 500 лет назад). Оно состоит из множества образов, вырезанных или выцарапанных на камне и кости. Миниатюрная графика при этом несколько более широко распространена, чем наскальная, найденная в пещерах, особенно на территории департаментов Дордонь и Ариез во Франции и в провинции Кантабрия в Испании.

Такая графическая деятельность исключительно связана с современным *Homo sapiens* в различных районах в Африке, Австралии, на Ближнем Востоке, в Восточной и Западной Европе. Появление графической культуры, по-видимому, исторически, а возможно, и не только исторически, совпадает с появлением языка. Однако самым удивительным является совпадение этих важнейших событий с похолоданиями.

На рис. 7.2 и 7.3 представлены изменения температуры и временная шкала развития культур. Поражает воображение то, что расцвет палеолитической культуры и появление гениальных по своей выразительности и эстетическому значению рисунков в эпоху мадлен, свидетельствующее о появлении на Земле разума, близкого к современному, приходится приблизительно на время максимального развития ледников, наиболее холодный период в человеческой истории. Возможно, появление искусства среди отчаянного холода эпохи вюрм произошло впервые не только на Земле, но и вообще во Вселенной. Едва ли этот странный факт может быть объяснен од-

¹ Археология Западной Европы. М. : Наука, 1973.

² Leroi-Gourhan A. The hunters of prehistory. Atheneum, 1989.

ной необходимостью выживания в суровое время; представляется, что настоящее объяснение требует обстоятельного исследования.

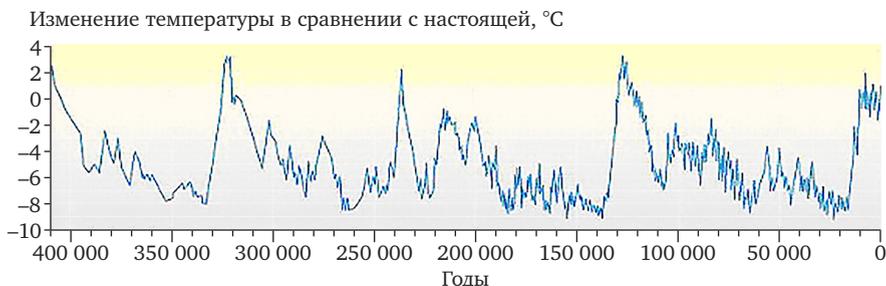


Рис. 7.2. Температуры прошлого; реконструкция по данным изотопного состава кислорода в антарктическом льду на станции «Восток»¹

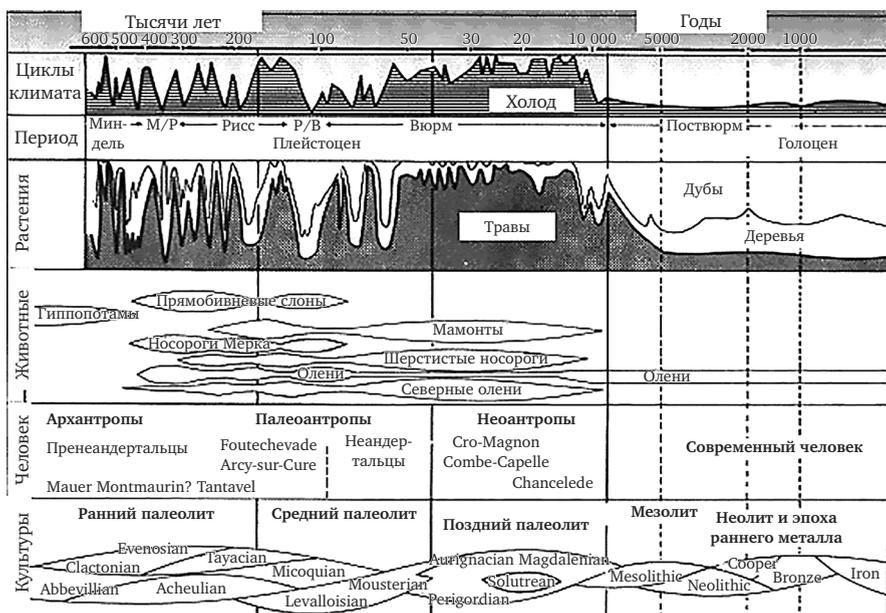


Рис. 7.3. Временная (годы, сверху) шкала изменений сверху вниз: температуры, растительности, развития животного мира и человеческих культур²

Интересно, что свои шедевры они создавали вдали от постороннего влияния, в глубинах пещер, под многотонной защитой камня. Как те ранние люди работали в таких условиях? Эти и другие вопросы пока остаются неясными.

¹ Petit J. R. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. 1999. Vol. 399. P. 429—436.

² Leroi-Gourhan A. The hunters of prehistory. Atheneum, 1989.

В целом можно сделать вывод, что в верхнем палеолите складывается особый тип природопользования, целиком обусловленный соответствующей природной средой, а именно сильнейшим влиянием криосферы на жизнедеятельность человека. Эти же суровые условия сформировали элементы технологий, социальной организации, искусства, мировоззрения, которые стали основой всего последующего развития человечества. Именно суровые условия заставили людей придумать одежду, обеспечившую им выживание при сильных морозах (она практически не изменилась у северных народов). Особенности загонной охоты, а также необходимость постоянных кочевков обусловили соответствующую социальную организацию — родовую общину, не превышающую 30—40 человек¹. Постоянные перемещения в суровых условиях способствовали появлению соответствующего жилья, создаваемого из костей крупных животных или деревянных шестов, покрытых шкурами. Данный тип жилья и сейчас с успехом используют северные народы. Было освоено получение огня, что позволило выживать в экстремальных условиях. В это время уже существовали представления о загробном мире. Погребения сопровождались сложными ритуалами: людей хоронили в щедро украшенной одежде, с различными предметами. Мертвых засыпали минеральной краской, часто в определенных позах (скорченное или сидячее положение), что может быть связано с трудностями захоронения в мерзлом грунте.

Верхнепалеолитическое общество было хорошо адаптировано в существующую природную среду. Именно поэтому соответствующие этому периоду стоянки найдены на огромных пространствах. Самая северная в мире палеолитическая стоянка Берелех² в низовьях Индигирки (около 71° с. ш.) датируется возрастом около 32 тыс. лет. Можно только представлять, какие жестокие холода были в то время в этом районе Сибири, если даже в наше сравнительно теплое время недалеко от тех мест находится Полюс холода в Евразии. В предгорьях Полярного Урала (деревня Бызовая) возраст стоянки 20—21 тыс. лет³.

В целом можно констатировать, что под непосредственным влиянием криосферы сформировалась социальная структура, обусловленная особым типом природопользования. И определяющим в этом случае был именно природный фактор. В расовом отношении палеолитическое население, проживающее в зоне распространения мерзлых пород, отличалось разнообразием, встречаются европеоидные, монголоидные и даже негроидные типы⁴.

¹ Археология Западной Европы. М. : Наука, 1973.

² Мочанов Ю. А., Федосеева С. А. Археология, палеолит Северо-Восточной Азии, внутритропическая прародина человечества и древнейшие этапы заселения человеком Америки. Якутск, 2002.

³ Голубчиков Ю. Н. География горных и полярных стран. М. : Изд-во МГУ, 1996.

⁴ Мартынов А. И. Археология. М. : Высшая школа, 1996.

Новые и скорее всего избыточные методы ведения хозяйства, несомненно, оказывали серьезную нагрузку на природную среду. Но пока стабильное существование огромных площадей мерзлых пород обеспечивало условия существования для бесчисленных стад крупных млекопитающих, палеолитическое общество динамично развивалось.

Около 10—11 тыс. лет назад наступило потепление, ледник стал интенсивно разрушаться, мерзлые породы таяли, их ареал распространения переместился к северу¹. Сменились ландшафты. На месте тундры и холодных степей сформировались непроходимые леса (рис. 7.4).

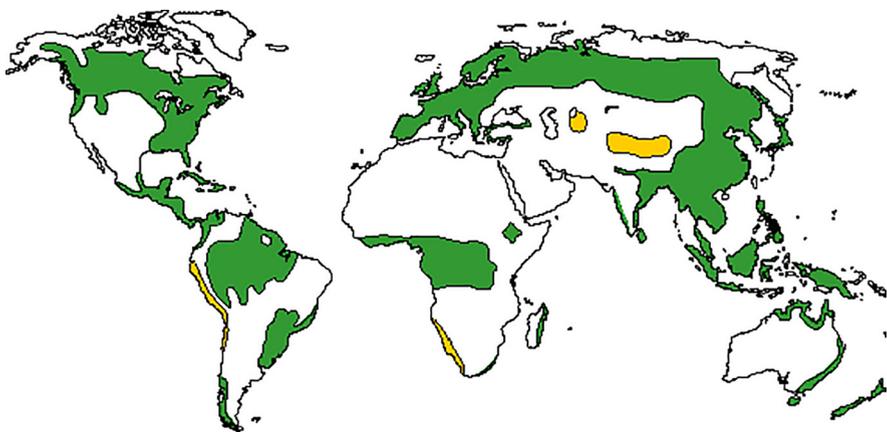


Рис. 7.4. Изменение ландшафтных условий в голоцене (около 5000 лет назад)²;

■ — леса; ■ — пустыни.

Пространства стали не соединять, а разделять. Из природной среды выпал основной элемент, поддерживающий ее, — криолитозона. И наступил кризис, не только природный, но и социальный. Этот период получил название *неолитической революции производящего хозяйства*. Природа уже больше не могла обеспечить кормовую базу и условия обитания для крупных млекопитающих. В то же время человек продолжал так же, как прежде, интенсивно уничтожать их.

Здесь впервые произошло то, что потом будет происходить постоянно. Человек, гордо назвавший сам себя разумным, накапливает знания и умения по добыванию себе благ, всегда неосмысленно направляет их на природу и всегда берет лишнее. Так произошло в конце палеолита — произошел переход от присваивающего общества к производящему. Прежние формы хозяйствования, да и то в сильно измененном виде, остались только в районах распространения

¹ Roberts N. The Holocene: an environmental history. John Wiley & Sons, 2013.

² URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Aridity_ice_age_vs_early_holocene_vs_modern.jpg (дата обращения: 17.11.2020).

полярной тундры. Основой для жизни стали оленеводство, добыча морского зверя и рыболовство. Технологии, искусство в значительной степени законсервировались и деградировали.

Новый тип хозяйства базировался уже на новых технологиях, земледелии и животноводстве. Люди стали менее подвижны. Сельскохозяйственные угодья, домашний скот, строительство жилья из дерева сделали их более независимыми от изменения природы. Нас интересуют прежде всего взаимоотношения нового типа природопользования с криосферой. Основа прежнего типа хозяйствования — охота давала все сразу: и пищу, и одежду, и жилье, и орудия, и динамичность перемещения в пространстве. В отличие от прежнего постоянного взаимодействия влияние криосферы на человека, становится эпизодическим, сезонным, но от этого не менее значимым. Именно периодическое наступление криосферы в виде суровых зим стало организующим для всей хозяйственной деятельности. Заготовка продуктов, дров, строительство домов и теплых помещений для скота, добыча мехов для одежды и многое другое было направлено, чтобы пережить зиму. Весной все начиналось по-новому. Криосфера как бы отступила, но продолжала регулировать хозяйственную деятельность. В тропических и субтропических областях влияние криосферы очень слабо и реализуется через небольшие сезонные изменения климата. Для европейских народов необходимость постоянного напряжения для поддержания и развития своего хозяйства привело к значительному технологическому прогрессу, который реализуется в современном мире как «европейская цивилизация».

Именно динамика криосферы (развитие наземных ледников, а главное, перигляциальных условий) послужила основой резкого развития человеческого общества и его быстрого распространения в пространстве.

В целом можно выделить несколько типов особенностей взаимодействия человека и криосферы.

Палеолитическое общество в средних и северных широтах Евразии можно назвать криодетерминированным, поскольку и структура среды обитания, и вся жизнь человека на огромных пространствах Евразии в это время целиком определялись именно состоянием криосферы. Современные народы Арктики сохраняют, хотя и в упрощенном виде, традиции того времени. Идентичны с верхнепалеолитическими аналогами одежда (анорак, парка, унты), разборные, легко перемещаемые и отлично сохраняющие тепло жилища (чумы). Такой же упор есть на максимальном использовании животных как ресурса жизнеобеспечения. Например, современные оленеводы, как и верхнепалеолитические охотники, практически все необходимое получают от оленя (одежда, питание, транспорт, жилье). Но сам олень, как и мамонт прежде, зависит

от тундровых полярных ландшафтов, обеспечивающих ему кормовую базу, т. е. само существование оленеводческих народов Арктики целиком зависит от состояния криосферы. Причем зависит постоянно, круглый год.

Земледельческое общество средних широт можно определить как криоциклическое. Здесь влияние криосферы выражается не постоянно, а циклически при смене сезонов. Ежегодный цикл воздействия криосферы фактически определяет весь уклад жизни человека (для кочевых народов сезоны связаны только с миграцией, а не с изменением хозяйственной деятельности). В XX в. за счет создания мирового рынка наблюдается тенденция преодоления этой цикличности. В любое время года в любую точку Земли могут быть доставлены любые продукты и материалы. Даже в самой северной стране создается среда обитания, не зависящая от внешних условий. Такое нарушение цикличности хозяйствования (своего рода наступление на криосферу) приводит к дополнительному расходованию энергии и природных ресурсов. Это, несомненно, ускоряет их истощение и приближает очередной экологический кризис. *Homo sapiens* настойчиво, но неразумно стремится преодолеть влияние создавшей его и обеспечившей ему динамичное развитие гармонизирующей среды — криосферы. В последние десятилетия человек даже смог повлиять на нее. И сразу получил ответ — глобальное потепление климата и реакцию криосферы на него (таяние ледников, деградация мерзлоты, уменьшение ледяных покровов на морях).

В XX в. промышленно развитые страны стали интенсивно осваивать полярные регионы для добычи биоресурсов, минерального и органического сырья. И вновь, какой уже раз человек разумный поступает совершенно неразумно. Не принимая в расчет даже уже имеющиеся знания о функционировании криогенных систем в биосфере, гидросфере, атмосфере, литосфере, используя техническую мощь и технологии, разрабатываемые для южных регионов, человек в который уже раз готовит очередной системный экологический кризис. Он заключается прежде всего в том, что полярные ландшафты, поскольку их основой являются льдистые породы, очень чувствительны к тепловым воздействиям. Строительство тепловыделяющих сооружений, нарушение растительного и почвенного покрова повышают температуру пород, усиливают их таяние и разрушение. Соответственно, возникает цепь нарушений растительных сообществ и биоценозов.

Условия жизни в холодных районах определяют многие культурные традиции. Например, обилие различных праздников у народов Севера не случайно. Суровая жизнь толкает людей на более тесное, обогащающее общение. У современных северян, однако, как правило, нет настоящей сложной религии, которая укрепляла бы их. Но они верят в загробную жизнь и в существование духов, в особен-

ности злых. Они в своей повседневной суровой и скудной жизни противостоят и природе, и своей темной шайке духов. Стужа, разбухшие от снега тучи, ледяной ветер: казалось бы, люди должны быть хмуры, как небо над ними. Наоборот, они приветливы и улыбчивы — часто больше, чем обеспеченные всем, но стремящиеся получить еще представители так называемой развитой западной цивилизации.

Сегодня на Севере сохраняются многие традиции язычества. Праздники, появившиеся в последние десятилетия, по сути, являются адаптированными к местным условиям. Например, популярный в населенных пунктах Заполярья праздник под названием Тиркыкэмэт (так его называют на Чукотке) проводится в начале — середине февраля, когда после полярной ночи появляется солнце, и посвящен его встрече. К сожалению, сегодня северяне молодого и среднего возрастов забывают родной язык, перенимают чуждые им, худшие традиции пришельцев другой культуры. Вместо того чтобы развивать присущие многим представителям северных народов удивительные способности к живописи и музыке, они получали, да и получают сейчас, стандартное образование, ориентированное на развитую промышленную индустрию. Они воспитывались в интернатах, где преподавались только русский и иностранный языки, а книги на родном языке отсутствовали. В современных национальных селах также практически нет родной языковой среды.

Культура, созданная в суровой тундре, несет в себе черты, которые еще предстоит выработать в себе представителям культур, которые считаются высокоразвитыми (например, самоограничение в потреблении природных ресурсов, минимизация энергопотребления и воздействия на окружающую среду). Постороннему человеку, пришедшему в тундру, иногда невозможно отыскать в ней следы жизнедеятельности оленеводов — настолько слабым являются их воздействие на природу. Растительность, водоемы, почва остаются практически незагрязненными, несущими первозданные черты. Будущее Земли, страдающей от перенаселения и истощения ресурсов, возможно, будет определяться способностью человечества к такому самоограничению; эти особенности являются принадлежностью не прошлого, а, скорее, будущего. Исследование и распространение удивительной культуры Севера имеет перспективу, которая скоро может стать направлением развития всего человечества.

7.2. Природно-технические системы криосферы

Хозяйственная деятельность оказывает прямое или опосредованное воздействие на природную среду, приводя к изменению поверхностных условий, температуры и свойств горных пород, а также вызывая развития целого комплекса экзогенных процессов.

В результате взаимодействия хозяйственного объекта с литосферой, гидросферой, атмосферой, биосферой возникают структуры, состоящие из сочетания природных и привнесенных человеком (техногенных) компонентов, которые объединены для выполнения социально-экономической функции. Они получили название природно-технических систем (ПТС). В географии концепция ПТС получила развитие в работах А. Ю. Ретеюма, К. И. Дьяконова, Л. Ф. Куницына, В. С. Преображенского и других авторов¹.

Особенностью ПТС криосферы является их зависимость от температурного фактора, поскольку их литогенной основой являются мерзлые породы или льды. Возникающие в процессе хозяйственной деятельности нарушения поверхности отражаются на параметрах деятельного слоя, температурном режиме многолетнемерзлых грунтов, интенсивности денудационных или аккумулятивных процессов. Однако вслед за этим могут изменяться другие элементы мерзлотной геосистемы: смена фитоценозов, режим поверхностного и подземного стока, активизация мерзлотных рельефообразующих процессов и т. д. Таким образом, возникает цепь взаимосвязанных процессов изменения параметров геосистемы, причем в зависимости от интенсивности внешнего импульса и внутренних особенностей геосистемы изменения могут постепенно затухать или приобретать резонансное развитие, вплоть до полного разрушения геосистемы².

ПТС как система характеризуется определенными пространственными и временными границами, структурой, свойствами, состоянием.

Характеристика структуры системы сводится к выделению подсистем, элементарных систем, элементов систем, а также выявлению их взаимоотношений. Традиционно в ПТС обособляют две подсистемы — техническую и природную, иногда добавляется подсистема управления.

По вопросу выделения пространственных границ ПТС существуют две принципиально различные точки зрения. Согласно первой границы ПТС совпадают с той частью территории, где располагаются технические сооружения или осуществляется какая-либо хозяйственная деятельность. Согласно второй контур ПТС должен проводиться по границе зоны влияния техники (хозяйственной деятельности) на природный компонент. При этом, как отмечает В. К. Епишин, речь может идти о границе зоны актуального (на не-

¹ *Исаев С. В.* Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 105—113; *Бондарик Г. К., Ярг Л. А.* Инженерно-геологические изыскания : учеб. пособие. М. : КДУ ; Добросвет, 2018.

² *Дроздов Д. С.* Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии.

который фиксированный момент) влияния либо границе зоны потенциального влияния. По-видимому, можно говорить и о третьем подходе к выделению границ ПТС — по границе сферы взаимодействия. Г. К. Бондарик сферу взаимодействия определяет как область геологической среды, внутри которой в результате взаимодействия с подсистемой «сооружение» изменяется течение природных процессов и развиваются инженерно-геологические процессы¹. Стратегия управления и прогнозирование изменений ПТС различного масштаба должны базироваться на знании динамики естественной и техногенной составляющих и обеспечивать их оптимальное соотношение в природных условиях.

В развитии ПТС в криолитозоне можно выделить несколько стадий. На начальной стадии (с момента возведения первых инженерных сооружений) происходит резкое расширение пространственных границ ПТС на поверхности ландшафтов и внутри толщ пород. Этот временной интервал характеризуется нестационарными термовлажностными полями в грунтах².

Завершение начальной стадии развития ПТС Г. К. Бондарик предлагает фиксировать по времени относительной стабилизации инженерно-геологических процессов. Например, для ПТС «наземное сооружение — геологическая среда» это момент завершения консолидации среды в основании сооружения, затухание осадки и т. д. В более сложных системах определить время смены режимов, конечно, намного труднее. Возникает проблема критериев оценки состояния ПТС. В самом общем виде неустановившийся режим характеризуется большими скоростями изменения среды под действием технических сооружений и средств, в то время как на стадии установившегося режима определяющее влияние на взаимодействие техники и среды оказывают природные процессы. Управляющие взаимодействия становятся стационарными или периодическими.

Зрелая стадия ПТС соответствует установившемуся состоянию или трендовому (однонаправленному с постоянной скоростью) изменению физических полей в грунтах, когда природная среда в целом и массивы горных пород находятся в устойчивом динамическом равновесии со сложившейся инфраструктурой инженерных сооружений. Одновременно стабилизируются или даже сужаются пространственные границы ПТС (по простиранию), но продолжается их продвижение вглубь грунтовых массивов с постоянной скоростью³.

¹ Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М. : Недра, 1981.

² Попков О. Н. Развитие природно-технических систем нефтяного месторождения в криолитозоне // Материалы Первой конференции геокриологов России (МГУ имени М. В. Ломоносова, 1996 г.). Т. 4. Инженерная геокриология. М. : Изд-во МГУ, 1996.

³ Попков О. Н. Развитие природно-технических систем нефтяного месторождения в криолитозоне.

Изменения геокриологических условий могут быть слабыми, сильными или коренными в зависимости от их влияния на инженерно-геокриологические условия территории. Слабые изменения мерзлотных условий связаны с такими изменениями различных (одной или нескольких) характеристик многолетнемерзлых толщ (ММТ), величина которых не приводит к качественному изменению инженерно-геологических свойств пород и не вызывает активизацию мерзлотных процессов или развитие новых. Сильные изменения геокриологических условий определяются изменениями одной или нескольких характеристик ММТ, приводящими к ухудшению инженерно-геологических свойств пород (например, повышение среднегодовой температуры грунтов t_{cp} , увеличение амплитуды колебаний температур A_n и глубины сезонного оттаивания пород), активизации существующих и развитию новых мерзлотно-геологических процессов (пучения и осадки грунтов, термокарста, термоэрозии и др.). При этом сохраняется многолетнемерзлое состояние пород, хотя в отдельных случаях может происходить либо разобщение ММТ с промерзающим зимой слоем пород, либо ее частичное оттаивание снизу.

Коренные изменения геокриологических условий определяются сменой знака среднегодовой температуры ММТ и ее многолетним оттаиванием, что приводит не только к изменению всех инженерно-геологических свойств пород в связи с их оттаиванием, интенсивному развитию мерзлотных процессов (прогрессивному и необратимому развитию некоторых из них), но и к изменению гидрогеологических условий и рельефа.

Ранняя (начальная) стадия развития ПТС продолжается в среднем 60 лет. В этот период формируются параметры распределения температур в грунтах (вплоть до оттаивания под тепловыделяющими сооружениями), заканчиваются активные проявления инженерно-геологических процессов, деформации существующих объектов обустройства. При дальнейшей эволюции (зрелая стадия развития) ПТС происходит медленное, с постоянной скоростью, продвижение фазовых и температурных фронтов вглубь криолитозоны в местах размещения наземных тепловыделяющих сооружений¹.

Под состоянием ПТС чаще всего понимают ее способность к функционированию. Традиционно выделяются два вида состояний: равновесное и неравновесное. Равновесие между природной и техногенной составляющими ПТС сохраняется лишь в случаях, когда степень техногенного воздействия не превышает пределов устойчивости первой из них. Разрушение ПТС связано с разрывом и преобразованием связей, структуры и функций природной, при-

¹ Попков О. Н. Развитие природно-технических систем нефтяного месторождения в криолитозоне.

родно-антропогенной или антропогенной системы, в результате чего происходят потеря устойчивости, деградация и полное или частичное ее разрушение.

Разрушению предшествует период накопления внешних воздействий. В это время происходит накопление деформаций, которые постепенно достигают пороговых значений. Для области распространения ММП основным отрицательным фактором устойчивости ПТС является повышение температуры пород до значений интенсивных фазовых переходов (около 0 °С). Ключевым моментом в решении проблемы выявления критических тепловых нагрузок на многолетнемерзлые породы является количественное определение пороговых и критических уровней воздействия. под пороговым понимается уровень воздействия, вызывающий значительные изменения основных параметров ММП (температура, механические свойства), которые все же остаются в пределах устойчивости¹. Под критическими же понимаются воздействия, выводящие параметры ММП за границу устойчивости. Критические нагрузки приводят к локальному или полному разрушению мерзлых пород, что соответствует состоянию экологического бедствия и проявляется в развитии или активизации комплекса опасных геокриологических процессов. Для установления критерия допустимого воздействия Ю. А. Израэль использует понятие обобщенной функции состояния экосистемы².

Различие между предельно допустимым и фактическим состоянием характеризует экологический резерв системы. Для криогенных геосистем в качестве показателя экологического резерва можно выбрать температуру мерзлых пород на подошве слоя годовых колебаний (за критическое значение принимается 0 °С) или глубину сезонного оттаивания. Общей классификации криогенных ПТС в настоящее время еще не создано, но интенсивность проводимых в этом направлении работ показывает, что проблема будет решена в ближайшее время.

В зависимости от масштабов рассмотрения можно выделить несколько уровней ПТС:

- 1) элементарная ПТС, связанная с взаимодействием отдельного сооружения с мерзлыми породами;
- 2) хозяйственный комплекс, включающий совокупность сооружений, объединенных для выполнения определенных хозяйственных задач (предприятие, населенный пункт и т. д.);
- 3) отраслевой уровень; каждой отрасли хозяйства соответствуют свои особенности взаимодействия техногенной и природной состав-

¹ Грива Г. И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений Ямала. Томск : Томский гос. ун-т, 2005.

² Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. М. : Гидрометеоиздат, 1984.

ляющих, поэтому следует выделять отраслевые особенности природно-технических систем. Выделяются следующие их типы: жилищный, промышленный, горнодобывающий, транспортный¹. Каждый тип включает определенный набор основных сооружений (и соответствующий им набор техногенных воздействий на криолитозону):

- жилищный — жилые здания, улицы, санитарно-технические сети, вытяжные и напорные башни складские и озелененные площадки, зоны рекреации;
- промышленный — промышленные сооружения, градирни, резервуары, дымовые трубы, эстакады, отдельно стоящие опоры, складские площадки, закрома, проезды, санитарно-технические сети;
- горнодобывающий — промышленные здания, шахты, карьеры, скважины, резервуары, водонапорные башни, копры, отдельно стоящие опоры, эстакады, проезды, складские и хозяйственные площадки;
- транспортный — транспортные здания, автомобильные и железные дороги, водоводы, газо-, нефте- и продуктопроводы, взлетно-посадочные полосы, мосты, водонапорные башни, отдельно стоящие опоры, складские и хозяйственные площадки.

Отдельно можно выделить газодобывающие комплексы — транспортные сооружения, газопромысловые сооружения, технологические карьеры, водозаборы и гидротехнические сооружения, свалки промышленных и бытовых отходов, а также техногенно-измененные породы зон влияния вышеперечисленных объектов.

Каждая техническая система характеризуется своим набором и масштабом нарушений в окружающей природной среде, которые в разных природных зонах приводят к различным последствиям. Особенность криолитозоны отражается в последствиях воздействий на геологическую среду, различающихся специфической реакцией теплового поля горных пород (это имеет значение для механических свойств грунтов оснований сооружений) и реакцией интенсивности и экстенсивности проявлений экзогенных геологических процессов, обусловленных многолетнемерзлым состоянием горных пород.

Наиболее сильные нарушения естественных геокриологических условий обуславливаются снятием растительного покрова, изменением условий снегонакопления, созданием площадных подсыпок в основаниях сооружений, изменением условий поверхностного и грунтового стока при строительстве линейных сооружений, а также комплексом воздействий в результате строительства и эксплуатации нефте-газодобывающих скважин². Растительные, особенно

¹ Природные опасности России. Геокриологические опасности / Л. С. Гарагуля и др. ; общ. ред. В. И. Осипова, С. К. Шойгу. М., 2000.

² Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М. : Геоинфо, 2016.

мощные моховые покровы оказывают, как правило, охлаждающее влияние на подстилающие грунты. Поэтому нарушение их сплошности приводит к увеличению глубин сезонного оттаивания грунтов, повышению среднегодовой температуры ММП. В южной геокриологической зоне, где среднегодовые температуры ММП близки к 0 °С, удаление моховых покровов может привести к переходу среднегодовой температуры пород через 0 °С и многолетнему оттаиванию отложений.

Севернее широты примерно 68° удаление растительного покрова обычно не сопровождается многолетним протаиванием ММП, даже на участках с избыточным снегонакоплением. Однако на участках, где после удаления растительности формируется зеркало свободной воды, возможна резкая активизация термокарста. Южнее, вплоть до широты примерно 65° на западе Севера Западной Сибири и примерно 63° на ее восточной оконечности, удаление растительного покрова может привести к многолетнему оттаиванию грунтов на участках с избыточным снегонакоплением (небольшие залесенные участки, опушки лесов, ложбины стока, межбугровые понижения и др.).

Еще южнее — вплоть до южных границ распространения многолетнемерзлых пород — многолетнее оттаивание грунтов возможно на участках с нормальным снегонакоплением (возвышенные залесенные поверхности). Здесь удаление растительного покрова приведет к многолетнему оттаиванию на всех участках, где распространены многолетнемерзлые грунты (торфяники, бугры пучения и др.).

Термические свойства снежного покрова являются одним из самых значимых факторов геокриологических условий¹. Изменение снегонакопления при освоении территории в условиях метелевого снегопереноса, характерного для северных районов Западной Сибири, происходит в основном за счет создания ветровых преград — насыпей железных и автомобильных дорог, прокладки трубопроводов наземным способом в насыпи и т. д. При мощности снежного покрова, большей критической (т. е. такой, при которой среднегодовая температура грунтов на глубине сезонного оттаивания равна 0 °С), среднегодовая температура грунта переходит в положительные значения и начинается многолетнее оттаивание мерзлых грунтов. В связи этим определение критической мощности снежного покрова является важной задачей геокриологического прогноза. Критическая мощность снежного покрова зависит от температурного режима воздуха, состава и свойств грунтов слоя сезонного оттаивания, теплофизических свойств снежного и напочвенного растительного покрова.

¹ Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях.

Изменения рельефа земной поверхности и соответственные нарушения температурного режима пород связаны как с планировочными работами под наземные сооружения, так и с добычей полезных ископаемых. При этом создаются искусственные формы микро- и мезорельефа (карьеры, отвалы, выемки, насыпи, терриконы), а также происходят новообразование и (или) активизация природных экзогенных геологических процессов. В результате наблюдается перестройка рельефа: увеличиваются протяженность и глубина вреза оврагов, неустойчивыми становятся склоны (происходят ополывы грунтовых масс, обрушение блоков породы и др.), формируются бугры пучения пород, термокарстовые просадки поверхности и др.

В процессе освоения территории — строительстве дорог, шлейфовых трубопроводов и трубопроводов коллекторов, сооружений на подсыпках и др. — за счет изменения поверхностного стока формируются мелководные водоемы. В зависимости от глубины таких поверхностных водоемов либо донные отложения могут находиться в многолетнемерзлом состоянии, либо породы могут оттаивать и этот процесс приведет к развитию термокарста. Критическая глубина водоемов зависит от условий формирования ледяного покрова, мощность которого зависит от зимних температур воздуха и характера снегонакопления на поверхности льда, состава и свойств донных отложений. Неблагоприятные ситуации, связанные с развитием термокарста под мелководными водоемами, отмечаются на многих месторождениях Западной Сибири — Юбилейном, Заплярном, Бованенковском и др.¹

Техногенные системы в каждом районе существуют в определенном диапазоне параметров, обуславливающих устойчивое состояние их и окружающей среды. Глобальное потепление климата изменяет устойчивость природно-технических систем (потеря устойчивости грунтов, изменение воздействия техногенной составляющей на природную среду, усиление воздействия криогенных процессов на техногенные и природные компоненты). Следовательно, для каждой территории отраслевые особенности оценки геокриологических опасностей для устойчивого состояния природно-технических систем будут несколько различаться.

Наиболее сильные нарушения естественных геокриологических условий обуславливаются снятием растительного покрова, изменением условий снегонакопления, созданием площадных подсыпок в основаниях сооружений, изменением условий поверхностного и грунтового стока при строительстве линейных сооружений, а также комплексом воздействий в результате строительства и эксплуатации нефтегазодобывающих скважин.

¹ Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях.

По трассам линейных сооружений и в зоне их влияния факторами отрицательного воздействия на окружающую среду являются:

— подрезка природных склонов, устройство дорожных насыпей и выемок, которые полностью изменяют естественные ландшафты в полосе отвода дорог и вдоль трасс трубопроводов;

— активизация криогенного пучения грунтов и других мерзлотных процессов, требующая постоянного ремонта дорожного полотна;

— нарушение условий поверхностного стока, ведущее к подтоплению территорий вдоль дорог, развитию термокарста и заболачиванию местности;

— возникновение наледей в местах выходов подземных вод в основании искусственно подрезанных склонов, сброса дренажных вод из тоннелей и подземных дренажных систем.

Нефтегазовый техногенез на Севере Западной Сибири отличается линейно-очаговым территориальным развитием. С точки зрения влияния техногенеза на геокриологические условия наиболее сильные их нарушения обуславливаются снятием растительного покрова при строительстве, изменением условий снегонакопления, созданием площадных подсыпок в качестве основания сооружений на газовых и газоконденсатных месторождениях; изменением условий поверхностного и грунтового стока при строительстве линейных сооружений (магистральных трубопроводов, трубопроводов коллекторов и шлейфовых трубопроводов в пределах месторождений, железных и автомобильных дорог), а также комплексом воздействий в результате строительства и эксплуатации нефтегазодобывающих скважин.

Бурение разведочных и эксплуатационных газодобывающих скважин приводит к растеплению окружающего скважину грунта и его оттаиванию. Экологические нарушения при разработке нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений, несмотря на линейно-очаговый характер самого источника техногенеза, проявляются на больших площадях и распространяются на глубину до 5—10 км. В криолитозоне вдоль стволов скважин происходят значительное изменение температуры горных пород, формирование ореола оттаивания. В околоскважинном пространстве развиваются суффозионные процессы, сопровождаемые образованием воронок, диаметр которых может достигать 40 м. при этом нарушается устойчивость скважин и на промыслах возникают аварийные ситуации. Температура газа в залежах варьируется от 15 до 40 градусов и более, а дебит скважин составляет сотни тысяч кубометров в сутки.

Если не принять необходимых мер при сооружении скважин, то вокруг скважин формируются ореолы оттаивания грунта. На участках распространения льдистых и сильнольдистых грунтов образуются просадочные приустьевые воронки, повышаются нагрузки на обсадные колонны. На месте первичных приустьевых воронок активизируется процесс термокарста. Интенсивность процесса тер-

мокарста определяется двумя основными факторами: во-первых, криогенным строением верхней части ММП и, во-вторых, мощностью тепловых потоков от ствола скважины в толщу мерзлых пород.

Оценку устойчивости мерзлых пород, обеспечивающих безопасное функционирование техногенной составляющей ПТС, следует проводить посредством установления причинно-следственных связей в цепочке «воздействие — изменение — следствие». Подобный анализ позволяет установить максимальную и минимальную величину воздействия, за пределами которых лежит либо возможность устойчивого существования ПТС, либо опасность возникновения необратимых последствий. При определении параметров существования криолитогенной компоненты большое значение имеет выбор репрезентативных показателей. Наиболее информативными параметрами, характеризующими прочностные и деформационные свойства мерзлых пород, являются температура на уровне нулевых годовых амплитуд и мощность деятельного слоя. Представительность данных показателей определяется тем, что при нарушении природных условий динамика их изменений выражает направленность развития и интенсивность криогенных процессов, последствия которых сказываются на устойчивости инженерных сооружений и естественной стабильности природных геосистем.

7.3. Искусственные криогенные системы

Существует большая группа криогенных образований, формирование которых, а следовательно, строение и свойства определяются не природными факторами, а целенаправленной хозяйственной деятельностью человека. Основным элементом данных образований является лед, что сближает их с рассмотренными выше естественными криогенными геосистемами, однако строение, условия распространения, свойства задаются хозяйственными задачами и технологическими решениями. В последние десятилетия использование искусственных льдов и льдосодержащих материалов с заданными свойствами резко возросло в различных областях народного хозяйства. Развитие криогенной технологии резко раздвинуло границы криосферы, включив в них тех регионы, где природные факторы не позволяют формироваться льду в естественных условиях. На наш взгляд, данные материалы следует выделить в особую группу криогенных образований — *искусственные криогенные системы*¹. Искусственными криогенными системами (ИКС) являются созданные и поддерживаемые с помощью определенных техноло-

¹ Хименков А. Н., Гагарин В. Е. Искусственные криогенные системы // Материалы третьей конференции геокриологов России (МГУ имени М. В. Ломоносова, 1—3 июня 2005 г.). Т. 1. М. : Изд-во МГУ, 2005. С. 119—125.

гий льды и льдосодержащие материалы, обладающие заданными морфологией, структурой и свойствами. Местоположение и время существования ИКС определяются хозяйственной необходимостью.

При получении искусственных материалов, будь то льды или мерзлые грунты, применяются различные методы: подбор искусственных охладителей, создающих заданный температурный режим, формирование необходимого температурного поля, подача дозированных порций воды или грунта в зону промерзания, подготовка грунтовой массы с подобранным гранулометрическим составом, использование наполнителей, изменение химического состава грунтовой воды, формирование заданных форм и размеров создаваемых объектов. Каждый отдельный структурный элемент полученных материалов аналогичен природному, но сочетание этих элементов и свойства отличаются от естественных. Режимы их формирования также отличны от природных, то же можно сказать и о расположении в пространстве (достаточно рассмотреть насыпи транспортных коммуникаций, секущих все элементы рельефа). Соответственно, и взаимодействие полученных материалов и созданных объектов с окружающей средой отличается от природных аналогов. Именно поэтому все ИКС можно объединить в единый генетический тип благодаря общим основным закономерностям их образования, анализ которых может быть ключом к целенаправленному воздействию на формирование, существование и разрушение ИКС.

Искусственные льды обладают своеобразной, отличной от естественной географией распространения на Земле. Человек определяет формирование того или иного типа льда с заданными свойствами в тех регионах, где природные факторы не позволяют формироваться льду в естественных условиях. После создания холодильников и хладагентов искусственные ледяные образования (криогенные системы) стали создаваться за пределами криосферы. Изучение динамики криогенных систем, созданных искусственно, имеет не менее важное значение, чем изучение естественных систем. Например, замораживание биологических объектов должно происходить с очень большой скоростью, для того чтобы не формировались крупные кристаллы льда, разрушающие клетки. Понимание особенностей развития искусственных криогенных систем дает возможность оптимизировать процесс их изготовления и при необходимости быстрого разрушения.

Функции и время существования ИКС определяются хозяйственной необходимостью и поддерживаются заданием необходимых структурных параметров и температурных режимов за счет технических средств.

В настоящее время общей систематизации ИКС не существует. Не разработана теория их формирования. Публикации на эту тему рассеяны по множеству ведомственных изданий.

Рассмотрим некоторые общие вопросы создания ИКС.

В последние десятилетия значительно возросли объемы строительства в труднодоступных районах Крайнего Севера, где применение традиционных строительных материалов связано с большими материальными затратами. В связи с этим повышенное внимание уделяется поиску наиболее дешевых способов возведения инженерных сооружений. Одним из направлений исследований в этой области является разработка методов использования в качестве строительного материала искусственного льда. Вопросами формирования различных видов искусственных льдов и их использования в строительстве в нашей стране занимались Б. А. Савельев, К. Ф. Войтковский, Р. М. Каменский, В. Р. Алексеев, Г. И. Сморгин, А. А. Бубырь, Г. А. Каган, В. Е. Гагарин и другие исследователи. За рубежом этими вопросами занимались М. Накава, Р. Р. Левин, Л. С. Тьен, С. В. Черчил, В. Кеворкян, Д. Чен и другие.

В условиях полярных районов с устойчивыми низкими зимними температурами лед является одним из самых дешевых строительных материалов. Используя различные методы его приготовления, а также различного рода добавки и наполнители, можно получать льдосодержащие материалы с широким диапазоном свойств. Искусственно приготовленный лед уже нашел свое применение для строительства холодильников, дамб, временных дорог, переправ, причалов, пандусов, искусственных платформ, оснований для инженерных сооружений; создания теплоизолирующих покрытий, защитных конструкций на морских нефтегазодобывающих платформах. Промораживание применяется при закреплении хвостохранилищ, для создания льдопородных закладок в горных выработках, для криогенной сепарации растворов.

Строительство в странах с низкими зимними температурами сопряжено с определенными трудностями. Бетонирование при отрицательных температурах приводит к образованию большого количества льда, что вызывает нарушения структуры бетона и уменьшение его прочности. Это объясняется тем, что практически вся вода быстро замерзает при температуре от -2 до -4 °С, при этом не успевают завершиться химические процессы твердения бетона, в самом бетоне создаются крупные поры. Создавая ИКС, путем введения в состав пластификаторов — органических и неорганических соединений — добиваются постепенного льдообразования, по мере понижения температуры в массиве бетона. Кроме того, лед в бетоне с модификаторами менее прочный и плотный, чем в обычном бетоне, и водные растворы солей замерзают с меньшим увеличением объема, чем вода.

Применение различных композитных материалов и полимерных добавок может значительно укреплять искусственные льды и льдосодержащие материалы, что существенно повышает эффективность

их применения. С 1970-х гг. в США построены десятки ледяных буровых платформ, с которых были открыты крупные месторождения нефти на шельфе. В России имеются лишь единичные попытки создания ледяных платформ на шельфе.

Для всех криогенных материалов основным элементом является лед — недорогой и легко получаемый материал. Подбором различных технологий можно получать льды и льдосодержащие материалы с самыми разнообразными свойствами. Еще одной особенностью рассматриваемых материалов является то, что при их создании заранее учитывается срок их существования; если естественные условия не позволяют материалам сохраняться в течении данного срока, принимаются дополнительные меры воздействия для их сохранения. Все вышеперечисленное позволяет выделить искусственные льды и льдосодержащие материалы (в том числе и грунты) как искусственные криогенные системы, имеющие определенную структуру, внутренние связи, параметры устойчивости и взаимодействия с окружающей средой.

По информации Гринпис, потери нефтяного сырья при добыче и транспортировке в России составляют около 1%, а по данным НП «Центр экологии ТЭК» - все 3,5-4,5%. Соответственно при уровне добычи около 510 млн т в год потери составляют от 18 до 23 млн т ежегодно, в денежном выражении - от 14,2 млрд до 17,2 млрд долл., по данным РБК¹. Создание ИКС с использованием загрязненных грунтов для промышленного строительства (например, в качестве земляного полотна) дало бы большой экологический и экономический эффект, поскольку сейчас эти грунты просто сгребаются в огромные бурты. В связи с этим необходимо подробное исследование свойств криогенных систем, в состав которых входят тяжелые углеводороды.

Вовлечение в эксплуатацию рудных месторождений со значительными объемами отвалов вскрышных пород способствует формированию особых техногенных геологических тел. Например, на месторождении Кубака в Магаданской области с 1994 по 2004 г. были сформированы террасированные отвалы вскрышных пород массой более 30 млн т и объемом более 20 млн м³. Мощность отдельных отвалов достигает 60 м, линейные размеры — до нескольких сотен метров². В условиях криолитозоны при промерзании крупно-

¹ *Медведев С. А., Шешина О. Н.* Эколого-геохимические особенности криолитозоны Севера Западной Сибири // *Материалы Второй конференции геокриологов России (МГУ имени М. В. Ломоносова, 6—8 июня 2001 г.)*. Т. 4. Инженерная геокриология. М. : Изд-во МГУ, 2001.

² *Моторов О. В.* Состав, строение, температурный режим промерзающих отвалов горных пород и возможность их эволюции в каменные глетчеры: на примере Омолонского массива, Магаданская область : автореферат дисс. ... канд. геолого-минералогических наук. Якутск, 2008.

глыбовых отвалов формируются высокольдистые образования, ближайшим природным аналогом которых являются каменные глетчеры. Объемная льдистость данных ИКС может превышать 50 %. При льдистости более 30 % обломки горных пород приходят во взвешенное состояние, и ледово-каменные массивы приобретают свойство вязкопластического течения.

Особые ИКС формируются при физико-химических способах борьбы с обледенением (например, на дорогах). Химические добавки вызывают плавление льда при отрицательной температуре. При этом формируются криосистемы, состоящие из жидкого раствора и кристаллов льда. В то же время подбор смеси льда и определенных химических элементов позволяет создавать в условиях среды с положительными температурами охлаждающие элементы с низкими отрицательными температурами.

Другая группа ИКС приурочена в основном к теплым регионам Земли, где криосфера отсутствует или проявляется эпизодически. В этих регионах искусственные криогенные системы создаются техническими средствами.

Вот далеко не полный перечень направлений их использования:

- в строительстве широко применяется искусственное промораживание слабых, водонасыщенных грунтов;
- повсеместно, вплоть до экватора, создаются искусственные катки и снежные площадки для проведения спортивных мероприятий;
- осуществляется криоконсервация продуктов питания;
- изготавливаются ледяные охладители;
- осуществляется криоконсервация генетического материала;
- изготавливаются образцы при изучении свойств мерзлых грунтов.

Важной проблемой является создание искусственных криогенных систем в биологии. Сформировалось целое научное направление — криобиология (см. тему 4). Изучение искусственных криогенных биосистем позволило добиться значительных успехов в репродуктивной медицине, криоконсервации живых тканей, криохирургии.

При создании ИКС весьма эффективны физико-химические способы целенаправленного изменения свойств искусственных льдов и мерзлых грунтов. Например, небольшие добавки поливинилового спирта (ПВС) значительно упрочняют полученные льды и мерзлые грунты. Кратковременная прочность образцов льда, приготовленных различными способами, увеличилась от 3 до 8 раз, временная прочность смерзания у суглинка возросла на 30—50 %, а длительная прочность — на 560 %. После оттаивания в образцах с добавками ПВС резко возрастает сопротивляемость грунтов размыву (до 20 раз). Такие значительные изменения свойств обуславливают

ся особым взаимодействием структуры ПВС с растущим кристаллом льда. В результате промораживания формируется сложная композитная система. Полимер, проникая в структуру ледяных кристаллов, армирует их и увеличивает прочность.

Изменение свойств криогенных систем физико-химическими методами — чрезвычайно плодотворное направление. Несомненно, что кроме ПВС имеется еще множество веществ, не менее эффективно изменяющих свойства криогенных систем. Физико-химические методы воздействия на искусственные криогенные системы позволяют управлять процессами миграции влаги, пучения, криогенного структурообразования, их можно эффективно использовать для уменьшения повреждения корневой системы растений при промерзании, получать материалы с определенными структурными свойствами, например фильтры и сорбенты. Диапазон применения физико-химических методов воздействия на криогенные системы чрезвычайно широк. В настоящее время исследования в данном направлении находятся в начальной стадии. Необходимо создание общей теории взаимодействия растущего или разрушающегося кристалла льда с различными веществами.

В проводимых экспериментах в качестве дополнительных факторов воздействия на создаваемые ИКС использовались различные температуры охлаждения и различные объемы субстрата в зоне льдообразования, являющиеся аналогами природных процессов. Искусственные льды можно создавать методами объемного промораживания (аналог формирования льдов водоемов), послойного налива (аналог намораживания наледей) или капельного промораживания (аналог формирования снежного покрова). Эксперименты показали возможность путем направленного воздействия на условия льдообразования (температурный режим, объемы воды, вносимые примеси) получать льды с необходимыми свойствами.

Разработка общей концепции создания ИКС должна базироваться на теоретических данных, которые наиболее успешно объясняют процессы, происходящие при льдообразовании в различных средах, что позволит подбирать эффективные механизмы управления формированием криогенных систем с заданными свойствами. На наш взгляд, этому соответствует теория кристаллизации воды как структурированной жидкости, молекулы которой объединяются в ассоциации-кластеры. В жидкости вблизи растущего кристалла формируются ассоциации молекул с «ледяной решеткой». Рост кристаллов льда происходит не непрерывно вследствие отложения на их гранях отдельных молекул, а скачками за счет присоединения ассоциатов¹. При фиксированных термодинамических усло-

¹ Голубев В. Н. Структурное ледоведение. Теоретические основы конжеляционного льдообразования.

виях существует определенный статистический пространственный каркас ассоциатов, имеющих статистическое распределение по размерам.

Представляет интерес прогноз изменения структуры воды под воздействием внешних факторов, таких как поверхности разделов, давление, температура, сольватация. Свойства и структурные особенности строения межфазной области ответственны практически за все процессы формирования и существования ИКС. Обычно выделяют несколько типов межфазных границ: «твердое тело — жидкость», «твердое тело — газ», «жидкость — жидкость» и «жидкость — газ». Во всех случаях имеется некая пограничная область между объемными фазами, где возникает градиент свойств. Для каждого из этих случаев характерно изменение свободной энергии, связанное с образованием поверхности.

Границу раздела фаз следует представлять как промежуточную фазу, обладающую свободной избыточной энергией, которая сопряжена с силами, участвующими в формировании границы раздела. При этом возмущения, возникающие в момент образования пограничного слоя, сказываются на структуре и строении жидкости в межфазной области.

Научные публикации, посвященные исследованиям поверхностных свойств жидкости, в основном сводятся к анализу одного из фундаментальных свойств — поверхностному натяжению и связанному с ним значению свободной межфазной энергии системы. Гораздо менее изучены другие важные свойства поверхностей жидких систем — межфазный потенциал, межфазная вязкость и т. д. Однако анализ такой характеристики, как величина поверхностного потенциала, которая является отражением структурных особенностей жидкости на границе раздела фаз, позволяет делать выводы о строении и свойствах межфазной границы на молекулярном уровне. Например, структура и свойства воды, находящейся в межфазной области на границе «жидкость — газ», отличаются от аналогичных параметров воды в объемной фазе. Это объясняется преимущественной ориентацией молекул воды, расположенных на границе, отрицательным полюсом в сторону газовой фазы, что обуславливает положительное значение поверхностного потенциала воды. Анализу значений поверхностных потенциалов воды следует уделять особое внимание, поскольку именно эта величина является фактором, знание которого позволяет качественно и корректно решать проблемы формирования ИКС в определенных термодинамических условиях.

Получение ИКС с заданными свойствами возможно различными путями:

— воздействие на формирование определенных размеров ассоциатов у растущей поверхности льда;

— обеспечение необходимых соотношений между растущей поверхностью кристалла, подводом необходимого количества ледяных ассоциатов и разнообразных примесей, включая грунтовый массив.

— обеспечение проникновения определенного количества используемых примесей в структуру кристаллов льда.

Воздействия осуществляются подбором определенного температурного режима промораживания, концентрации примесей в воде или влажности в грунте, а также применением определенных добавок химических элементов, минеральных примесей или органических соединений.

Установлено, что при кристаллизации воды происходит разделение зарядов. Например, при замораживании чистой бидистиллированной воды разность потенциалов между льдом и водой достигает 60—80 В. Лед имеет по отношению к воде положительный потенциал¹. Добавление различных солей в раствор, различные их концентрации и изменение скорости кристаллизации приводят к изменению величины разности потенциалов между льдом и водой. Разделение электрических зарядов на фронте кристаллизации оказывает значительное влияние на структуру кристаллов формирующегося льда.

Таким образом, влияя искусственным электромагнитным полем на зону льдообразования, можно целенаправленно менять строение и свойства ИКС. Возможно, перспективным окажется при формировании искусственных криогенных систем комбинирование различных сочетаний тепловых и электромагнитных полей с подобранными химическими веществами и высокомолекулярными соединениями.

Чрезвычайно интересным является обнаружение эффекта ускорения некоторых химических реакций при кристаллизации водных растворов. Обнаружено, что в замороженных водных растворах в моменты фазовых переходов, связанных с образованием кристаллической фазы, химические реакции могут ускоряться в сотни тысяч раз по сравнению с темпом реакции при отсутствии фазового перехода при той же температуре². Единой общепринятой модели химических реакций в промораживаемых растворах пока не существует. Для понимания причин каталитической активности необходимы всесторонние исследования физических и химических процессов, протекающих на фронте кристаллизации.

При создании ИКС, будь то льды или мерзлые грунты, применяются различные методы:

— подбор искусственных охладителей, создающих заданный температурный режим;

— формирование необходимого температурного поля;

¹ Шавлов А. В. Лед при структурных превращениях.

² Шавлов А. В. Лед при структурных превращениях.

- подача дозированных порций воды или грунта в зону промерзания;
- подготовка грунтовой массы с подобранным грансоставом;
- использование наполнителей;
- изменение химического состава грунтовой воды;
- формирование заданных форм и размеров создаваемых объектов.

Искусственные криогенные материалы и конструкции играют всё большую роль при формировании природно-технических систем. ИКС выполняют в ПТС самые разнообразные функции:

- формируют литогенную основу сооружений с заданными свойствами (насыпи, основания фундаментов);
- обеспечивают возможность проведения работ в неблагоприятных условиях (замораживание грунтовых массивов при прокладке подземных коммуникаций в водонасыщенных грунтах);
- являются конструктивными элементами (дамбы, ледовые причалы, подземные холодильники);
- служат изолирующими материалами и др.

Заданные свойства криогенных элементов ПТС искусственно поддерживаются в течении необходимого времени даже в том случае, если окружающая среда имеет высокие положительные температуры.

В настоящее время не существует какой-либо общей систематизации и классификации ИКС, хотя даже далеко не полный перечень, приведенный выше, показывает их большое разнообразие. Возникла необходимость разработки общей теории формирования ИКС. Это обусловлено необходимостью оптимизации технологий создания искусственных льдов и льдосодержащих материалов с заданными строением и свойствами с учетом климатических условий. Целью этого является получение новых, сравнительно дешевых, экологических криогенных материалов и создание эффективных криотехнологий, используемых в различных отраслях народного хозяйства. Уже формируется новая комплексная отрасль знания, объектом которой являются искусственные льды и льдосодержащие материалы, она стихийно развивается в рамках различных отраслей науки и производства.

В последнее десятилетие в России остро встала проблема адаптации науки к условиям рыночной экономики. Искусственные криогенные системы являются не только результатом передовых научных исследований, но и востребованным в экономике высокотехнологичным продуктом. Несомненно, в рамках новых экономических реальностей для российской науки необходимо более активное продвижение своих достижений непосредственно потребителю. Геокриология имеет значительный потенциал не только в области изучения льдообразования в различных средах, но и в области управления

данными процессами. Именно геокриология могла бы стать базой для фундаментальных работ в области разработки теории и технологии формирования, а также эффективного практического применения ИКС в различных отраслях народного хозяйства.

Выводы

Криосфера во многом способствовала появлению современного человека, постоянно влияла на развитие человеческого общества и контролировала его. В результате формируются не только определенные криогенные ПТС, но и определенные устойчивые структурные связи внутри социума (традиции, культура, мировоззрение, хозяйственные связи и др.). Их можно определить как криосоциальные системы. Они отражают связь определенного социума с криосферой и позволяют оценить его изменения при различных преобразованиях природной или общественной среды. Данный подход является междисциплинарным (составными частями являются этнография, экология, культурология, история и др.), он еще не реализовался в определенном научном направлении, но, несомненно, имеет большие перспективы.

Формирование современного человека как биологического вида происходило при значительном воздействии криогенного фактора.

Прослеживается значительное влияние криосферы на общественную организацию, культуру, религию, технологии у социумов, подвергающихся ее воздействию. Особенно это влияние заметно на ранних стадиях развития человеческого общества. Возможно даже выделение криосоциального фактора, обуславливающего устойчивые особые черты развития определенных сообществ.

В последние десятилетия возросло воздействие человека на криосферу не только на локальном, но и глобальном уровне. Оно проявляется:

- в виде нарушения поверхностных условий литосферы и гидросферы, изменяющих условия теплообмена;
- в загрязнении атмосферы, уменьшающем прозрачность атмосферы;
- выбросами углекислого газа, усиливающими парниковый эффект.

Возрастает значение криогенных материалов с заданными свойствами, спроектированных и созданных человеком.

Тема 8

КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ В КОСМОСЕ

Сегодняшнее состояние Вселенной можно сравнить с окончившимся праздником: вспышки фейерверка остались в прошлом, по выражению Жоржа Леметра, искры в виде звезд пока горят, но все пространство уже наполнил холод с температурой, близкой к абсолютному нулю, и лишь близость к звездам позволяет некоторым планетам иметь такую роскошь, как морской прибой или просто жидкая вода. Мерзлые горные породы — не исключение, а, скорее, правило в космосе. Их существование подтверждено на других планетах Солнечной системы и их спутниках. Таким образом, космические тела в большинстве являются криогенными системами, свойства которых близки к тем, что встречаются на Земле.

8.1. Типы криолитогенеза

Ту роль, которую играет на Земле вода, на других планетах могут исполнять углекислота, метан, аммиак и некоторые другие соединения, одновременно существуя в трех фазовых состояниях: твердом, жидком и газообразном. Такое вещество можно назвать активным компонентом геологической среды; его фазовые переходы при этом не только составляют важнейшую часть энергетического баланса планеты, но и определяют разнообразие экзогенных процессов. Температуры и химический состав определяют особенности таких криогенных систем. Например, для планет Солнечной системы по мере удаления от Солнца сначала преобладают вода и углекислота, а затем аммиак и метан. В определенном смысле процессы фазовых переходов ответственны не только за процессы на поверхности планет, но и за само их рождение. Для газового облака, из которого была сформирована Солнечная система, в какой-то момент для области вблизи орбиты Земли только силикаты могли стать твердыми, и температура была все еще слишком высока для метана и аммиака, чтобы они могли замерзнуть. По этой причине планеты вблизи Солнца — Земля, Меркурий, Венера и Марс — оказались скалистыми и плотными.

Криолитогенез водного типа¹ обусловлен фазовыми переходами «вода ↔ пар H₂O ↔ лед H₂O» и развит на Земле, Марсе, спутниках

¹ Ершов Э. Д. Общая геокриология.

Юпитера (Европе, Ганимеди и Каллисто) и Сатурна (Мимасе, Энцеладе, Тефии, Дионе, Рее, Япете) и на Уране¹. Продукты водного криолитогенеза характеризуются следующими чертами: выветриванием силикатных пород, ледяными конгломератами, характерными слоистыми и сетчатыми шлировыми криогенными текстурами осадочных пород и типичным комплексом минералов. Наблюдается также ряд рельефообразующих процессов (криогенное выветривание, термоэрозия и термоабразия, солифлюкция, морозобойное растрескивание, пучение, термокарст, наледи). Эти процессы являются, по-видимому, универсальными для планетных тел, где происходит водный криолитогенез. Так, на Марсе обнаружены аналоги земных криогенных явлений: термоэрозионные и термокарстовые образования, полигональные формы, каменные глетчеры. Интересно, что при этом в условиях более низких температур размеры этих земных аналогов на Марсе значительно крупнее².

Криолитогенез углекислотного типа наблюдается в полярных районах Марса, где накапливаются стратифицированные отложения, насыщенные твердой углекислотой, газогидратами и пылеватым силикатным материалом³. Криолитогенезом аммиачного типа, по-видимому, характеризуются спутники Сатурна Титан и Энцелад, а также спутник Нептуна Тритон. Криолитогенез метанового типа можно ожидать на Нептуне, Титане, Тритоне, Плутоне и Хароне.

Величина получаемой от Солнца энергии Q_{sun} определяется из соотношения

$$Q_{sun} = \pi r^2 F_{sun} (1 - \alpha),$$

где r — радиус планеты; F_{sun} — солнечное излучение; α — альbedo поверхности (например, для Земли в среднем $\alpha = 0,33$). По закону Больцмана поверхность планеты излучает тепло Q_r в соответствии с ее эффективной температурой T_e . Для многих планет выполняется равенство

$$Q_{sun} \approx Q_r \approx \pi r^2 F_{sun} (1 - \alpha) \approx \sigma T_e^4 4\pi r^2.$$

Оказывается, нашей планете, имеющей температуру около $+15^\circ\text{C}$, следовало быть холодной, и только парниковый эффект, словно заманивающий радиацию в ловушку, сделал возможным существование жидкой воды на поверхности Земли (табл. 8.1). Этот эффект особенно велик на Венере (более 400°C), но проявляется и на других планетах (табл. 8.2).

В период ранней истории Земля была холоднее, возможно, на $15\text{—}40^\circ\text{C}$, в зависимости от величины альbedo. Э. Д. Ершов пред-

¹ Маэно Н. Наука о льде. М. : Мир, 1988.

² Маров М. Я. Планеты солнечной системы. М. : Наука, 1986.

³ Кузьмин А. И. Криолитосфера Марса. М. : Наука, 1983.

лагают выделять планетные тела по условиям существования мерзлых пород, сравнивая поток тепла из недр к поверхности космического тела q и поток извне $Q = Q_{sun} - Q_r$. В зависимости от состояния ядра планеты (холодное или горячее) можно выделить планеты с $q = 0$ или $q > 0$. В зависимости от поступления к космическому телу тепла от звезды (коротковолновая радиация) или от другого космического тела (за счет длинноволнового излучения) можно выделить планеты с $Q = 0$ и $Q > 0$ или даже $Q \gg 0$, при близком расположении от планеты внешних источников тепла.

Таблица 8.1

Эффективные температуры планет

Планета	Альбедо	Эффективная температура, °C
Меркурий	0,059	169
Венера	0,71	-29
Земля	0,33	-20
Марс	0,17	-57

Таблица 8.2

Характеристики тел Солнечной системы

Тело	Диаметр, км	Расстояние от Солнца, млн км	Температура поверхности, °C	Плотность г/см ³	Состав атмосферы
Солнце	$1392 \cdot 10^3$	—	5800	—	—
Меркурий	4880	58	260	5,4 (силикаты)	—
Венера	12 112	108	480	5,3 (силикаты)	CO ₂
Земля	12 742	150	15	5,5 (силикаты)	N ₂ , O ₂
Марс	6800	228	-60	3,9 (силикаты)	CO ₂
Юпитер	143 000	778	-110	1,3 (лед)	H ₂ , He
Сатурн	121 000	1427	-190	0,7 (лед)	H ₂ , He
Уран	52 800	2869	-215	1,3 (лед)	H ₂ , CH ₄
Нептун	49 000	4498	-225	1,7 (лед)	H ₂ , CH ₄

По условиям существования и развития мерзлых пород и по размещению их на твердых космических телах можно выделить ряд сообществ, классов, групп и разновидностей планет, их спутников, малых планет (астероидов) и других космических тел — комет, метеороидов, скоплений космической пыли. Первостепенное зна-

чение при таком классифицировании имеет поток тепла из недр к поверхности космического тела q и поступление к нему потока тепла извне Q . Тепловой баланс определяет разнообразие существования мерзлых пород и типа литогенеза (табл. 8.3). Если учитывать и периоды вращения $\tau_{вр}$ и обращения вокруг Солнца $\tau_{обр}$, то можно выделить классы планет с симметричным ($\tau_{вр} > \tau_{обр}$) или квазисимметричным ($\tau_{вр} < \tau_{обр}$) размещением мерзлых пород и асимметричным размещением ($\tau_{вр} = \tau_{обр}$), если мерзлые породы располагаются только на ночной стороне планеты или спутника. Они, естественно, будут различаться по температурному режиму. Важное значение имеет атмосфера, которая определяет механизм и характеристики тепло- и массообмена на поверхности. В зависимости от преобладания той или иной фазы активного компонента преобладают ледниковый или ледовый, влажный или аридный и морозный или сухой вид литогенеза. Различное сочетание параметров теплового баланса приводит к формированию разнообразных вариантов размещения мерзлых пород и криогенного типа литогенеза на планетах и космических телах. При этом обособляется полностью криогенное, неполно-криогенное, глубинно-криогенное, непрерывно-поверхностно-криогенное, прерывисто-поверхностно-криогенное, частично криогенное (с поверхности) и полностью некриогенное сообщество планет космических тел (табл. 8.3).

Устойчивость мерзлых пород и типа литогенеза на планетах, по Э. Д. Ершову¹, в значительной мере определяется характером их орбиты и удаленностью от источника излучения. В случае круговой орбиты тело будет отличаться устойчивым, а при сильно вытянутой эллиптической орбите — периодически устойчивым криогенным типом. Периодически устойчивый режим мерзлых пород должен существовать, например, на таких астероидах, как Адонис и Аполлон, которые приближаются к Солнцу за орбитой Венеры и удаляются в афелии до орбиты Юпитера, а также на кометах (табл. 8.4).

Крайне недостаточно изучены свойства мерзлых пород при низких температурах, которые характерны для Солнечной системы, а эти свойства определяют существование и развитие многих экзогенных процессов. Так, исследования температурных деформаций мерзлых дисперсных льдонасыщенных пород при температурах до -200 °С показывают, что коэффициент температурного расширения в песчаных и особенно в глинистых породах резко изменяется при температурах около -70 °С, что связано, вероятно, с появлением жидкой фазы воды. Был также установлен эффект, обратный температурному последствию: породы продолжали деформироваться после стабилизации температуры, причем в противоположном направлении.

¹ Ершов В. Д., Ершов Э. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел // Основы геофизиологии. Т. 3. М. : Изд-во МГУ, 1998.

Классификационная схема планет и других твердых космических тел криогенного типа¹

Условия развития и размещения мерзлых пород		По характеру теплового и водного баланса		По криогенной устойчивости и наличию сезонного промерзания-оттаивания пород	
Сообщество	Класс	Группа	Разновидность		
$q = 0, Q \rightarrow 0$ Полностью криогенное	Симметричный 	Каждый класс подразделяется на атмосферную и безатмосферную группы с учетом особенностей водного, углекислотного и других типов баланса	Каждая группа планет и космических тел подразделяется на криогенно устойчивую (при круговой орбите движения около источника тепла) и криогенно неустойчивую (при сильно вытянутой эллиптической орбите) разновидность	Сезонное промерзание-проотаивание (нагревание-охлаждение) пород отсутствует или выражено слабо	
	Асимметричный 			Каждая группа подразделяется на криогенные разновидности с наличием (при величине угла между осью вращения планеты и плоскостью ее орбиты $\alpha \neq 90^\circ$) и отсутствием (при $\alpha = 90^\circ$) сезонного промерзания-проотаивания или охлаждения-нагрева	
$q > 0, Q \rightarrow 0$ Непрерывно-поверхностно-криогенное	Симметричный 				
$q = 0, Q > 0$ Неполное криогенное	Асимметричный 				
	Симметричный 				

¹ Еришов В. Д., Еришов Э. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел // Основы геоэриологии. Т. 3. М.: Изд-во МГУ, 1998.

По характеру теплового и водного баланса		Условия развития и размещения мерзлых пород		По криогенной устойчивости и наличию сезонного промерзания-оттаивания пород	
Сообщество	Класс	Группа	Разновидность		
$q = 0, Q > 0$ Глубинно-криогенное	Асимметричный 	Каждый класс подразделяется на атмосферную и безатмосферную группы с учетом особенностей водного, углекислотного и других типов баланса	Каждая группа планет и космических тел подразделяется на криогенно устойчивую (при круговой орбите движения около источника тепла) и криогенно неустойчивую (при периодически устойчивую (при сильно вытянутой эллиптической орбите) разновидность	Каждая группа подразделяется на криогенные разновидности с наличием (при величине угла между осью вращения планеты и плоскостью ее орбиты $\alpha \neq 90^\circ$) и отсутствием (при $\alpha = 90^\circ$) сезонного промерзания-оттаивания или охлаждения-нагрева	
	Симметричный 				
$q > 0, Q > 0$ Прерывно-поверхностно-криогенное	Асимметричный 				
	Симметричный 				
$q = 0, Q > 0$ Некриогенное	Асимметричный 				
	Симметричный 				

Предполагаемые примеры космических тел криогенного типа¹

Сообщество	Планеты и другие космические тела
Полностью криогенное	Кольца Сатурна. Спутники Урана: Миранда, Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон (лед H ₂ O); Плутон и Харон (лед CH ₄); Кольца Урана (частички льда CH ₄ , покрытые углеродом); Спутники Марса: Фобос и Деймос (морозные коренные породы и реголит); Спутники Юпитера: Амальтея, Метида, Адрастея, Теба (морозные породы)
Непрерывно-поверхностно-криогенное	Спутник Нептуна: Тритон (лед CH ₄ , лед H ₂ O и лед N ₂ (?)); Спутники Юпитера: Европа, Ганимед, Каллисто (лед H ₂ O); Спутники Сатурна: Мимас, Тефия, Дион, Рея, Япет (лед H ₂ O); Марс (лед H ₂ O и лед CO ₂); Спутник Сатурна Титан (лед NH ₃ , лед CH ₄ ; лед H ₂ O); Спутник Сатурна Энцелад (лед H ₂ O, аморфный?) клатратные гидраты? Спутник Юпитера Ио (лед SO ₂)
Неполно-криогенное и глубинно-криогенное	В момент нахождения в перигелии к этим криогенным сообществам можно условно относить периодически устойчивые разновидности комет и астероидов (с сильно вытянутой эллиптической орбитой) и метеороиды (близко проходящие около Солнца)
Непрерывно-поверхностно-криогенное	Земля (лед H ₂ O); Луна (морозные коренные породы и реголит)
Планеты некриогенного (теплого) типа	Меркурий и Венера

8.2. Мерзлые породы в Солнечной системе

Меркурий и Венера — самые близкие к Солнцу планеты, поэтому самые теплые. Так, на Меркурии в дневные часы температура поднимается до 420 °С, на Венере — до 500 °С. При этом на Меркурии температуры могут опускаться до –170 °С на темной стороне и вызывать появление морозных пород.

Криосфера **Земли** рассматривается подробно в других темах курса.

¹ Ершов В. Д., Ершов Э. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел // Основы геокриологии. Т. 3. М. : Изд-во МГУ, 1998.

В криогенном отношении **Луна** отличается от Земли. Она, как известно, обращена к Земле одной стороной, а атмосфера и гидросфера на ней отсутствуют. В течение дня, длящегося 14,5 земных суток, ее поверхность нагревается до +110 °С. Затем наступает такая же длинная ночь, когда температура падает до –120 °С. Большую часть поверхности Луны (до 40 %) занимают равнинные территории (лунные моря), остальная (более светлая на снимках) покрыта многочисленными кратерами, хребтами и бороздами. Мелкие кратеры (диаметром 15—20 км) имеют чашевидную форму, более крупные (до 200 км) характеризуются округлым валом и плоским дном. Вулканизм здесь прекратился, хотя иногда отмечают выделение углеродсодержащих газов в некоторых кратерах.

В недрах Луны присутствует вода, однако вблизи поверхности она быстро испаряется. Поэтому горные породы находятся в немерзлом и в морозном состоянии. Большие, более 100 °С, суточные колебания температур проникают всего на несколько десятков сантиметров из-за слабой теплопроводности. Породы, однако, интенсивно выветриваются до песчаных и пылеватых фракций, а сохранившиеся обломки скальных пород на поверхности имеют небольшую прочность и легко раскалываются. Гравитационное смещение и крип (сползание грунтовой массы по склону под влиянием периодического изменения ее объема) приводят к перемещению мелкозема в пониженные участки, где мощность реголита (слагающего верхнюю часть осадочного чехла) составляет в среднем 3—5 м. Реголит представляет собой высокопористую (до 50 %) породу с плотностью 0,5—0,6 г/см³ у поверхности, увеличивающуюся до 1 г/см³ на глубине 3—4 м¹. Реголит из равнинных областей содержит больше пылеватых частиц, чем реголит горных районов; его минеральный состав представлен плагиоклазами, пироксеном, ильменитом, оливином, полевым шпатом и кварцем. Подтверждено существование водного льда на поверхности².

Марс, в отличие от Земли, имеет тонкую углекислотную (90 %) атмосферу, а его масса заметно меньше (0,38 земной). Он представляет собой планету переходного типа от непрерывно-поверхностного к прерывно-поверхностному криогенному сообществу³. Марсианские сутки и наклон оси вращения почти не отличаются от земных, поэтому смена времен года на Марсе происходит так же, как и на Земле, только продолжительность их едва ли не вдвое больше. Атмосфера также содержит небольшое количество водяных паров, образующих редкие облака.

¹ Черкасов И. И., Шварев В. В. Грунт Луны. М. : Наука, 1975.

² Li S. et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. Vol. 115 (36). P. 8907—8912.

³ Ершов В. Д., Ершов Э. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел.

Марс получает в 2,25 раза меньше солнечной энергии, поэтому его средняя температура ниже: от $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ на экваторе до $-93\text{ }^{\circ}\text{C}$ на полюсе. Минимальная температура поверхности зимой составляет $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальная $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹. Планета покрыта обломочным материалом (реголитом) мощностью от сотен метров до километров, при этом частицы в интервале $0,01\text{—}0,1\text{ мм}$ составляют 60 % и наблюдается дефицит частиц с размерами от 2 мм до 1 см, что связано, по-видимому, с криогенным выветриванием. Суточные и годовые колебания температур проникают соответственно на $0,5\text{—}1$ и $6\text{—}12\text{ м}$, а слой сезонного оттаивания, вероятно, очень мал. По данным расчетов Р. О. Кузьмина, мощность криолитозоны на Марсе изменяется от 1,5 км на экваторе до 5 км на полюсах. Л. Россбахер и Ш. Джадсон оценивают ее на экваторе в 1,1 км, и в 3 км на северном полюсе. Марс намного суше и холоднее Земли, и его поверхность выглядит как каменная пустыня (рис. 8.1).



Рис. 8.1. Снимок поверхности Марса, переданный с аппарата «Викинг-2»²

¹ Кузьмин А. И. Криолитосфера Марса.

² URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1162903> (дата обращения 17.11.2020).

Предполагается, что вода на Марсе сосредоточена в слое вечной мерзлоты, например в крупных равнинных бассейнах типа Эллады. На существование мерзлоты указывают долины с обнажением на их склонах внутренних пустот типа карстовых и формы выбросов на внешних склонах, напоминающие большие потоки грязевого материала или снежные лавины. В экваториальной области и в средних широтах мерзлота представлена, вероятно, водным льдом, глубже сменяется газогидратами и углекислотой. В полярных областях верхняя часть состоит из твердой углекислоты, а ниже сменяется жидкой углекислотой и газогидратом.

Предположительно, сублимация льда в широтном поясе 50° с. ш. — 50° ю. ш. привела к формированию поверхностного слоя морозных пород, ниже которого залегает толща мерзлых пород. Ее верхняя граница изменяется с широтой и в экваториальной зоне находится на глубине около 350 м, а к полюсам поднимается до глубины около 100 м. Некоторые расчеты показывают, что возможная сублимация льда не проникает глубже нескольких метров, так что многолетнемерзлые льдонасыщенные породы могут существовать там длительное время. Средняя мощность осадочного вещества на Марсе колеблется от десятков — сотен метров на экваторе до 1 км в приполярных областях, а в отдельных районах — до нескольких километров. Высказывается предположение, что эти отложения являются синкриогенными¹. В истории планеты, по-видимому, были ледниковые эпохи и периоды увлажнения, потому что присутствуют черты водной эрозии, достигающие огромных масштабов — до сотен километров длиной и десятков километров шириной. Они, вероятно, были результатом таяния льдистых горизонтов литосферы в районах сильной тектонической активности и высвобождения больших масс воды; на Земле подобные процессы наблюдаются в Исландии вблизи вулканов.

Собственно термокарстовые формы на Марсе не описаны; однако провальное-просадочные явления, возможно термокарстового происхождения, наблюдаются в приэкваториальной зоне Марса и представлены обширными депрессиями рельефа (до сотен километров). Резкие колебания температур заставляют предположить возможное развитие процесса морозобойного растрескивания на Марсе. Элементы полигональных форм рельефа наблюдаются в месте посадки аппарата «Викинг-2». Три типа форм рельефа: покровы из обломочного материала типа каменных глетчеров, концентрические аккумулятивные образования в кратерах, и участки рельефа сглаженных очертаний, обусловлены, возможно, крипом². В отличие от лунных

¹ Ершов В. Д., Ершов Э. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел.

² Squyres S. W. et al. Geomorphic evidence for the distribution of ground ice on Mars // Science. 1986. Vol. 231. №. 4735. P. 249—252.

и меркурианских кратеров свежие кратеры на Марсе окружены языками струйчатых потоков с лопастевидными краями, форма которых свидетельствует о течении материала выбросов. Для этих потоков характерно даже обтекание ими препятствий¹.

Характерные формы рельефа, образованные массовым перемещением материала на склонах, встречаются не только на стенках кратеров. Этот процесс медленного течения льдистого материала при низких отрицательных температурах без участия воды, вероятно, имеет широкое распространение не только на Марсе, но и на ледяных спутниках других планет и даже на Земле в обрывах льдистых грунтов. Такой процесс можно назвать *криофлюкцией* и рассматривать как один из основных криогенных процессов, распространенных в Солнечной системе. Он обусловлен текучими свойствами льдистых грунтов, наблюдающимися при превышении механическими напряжениями предела текучести. Употребление некоторыми авторами, например Р. О. Кузьминым, термина «оползни» для ряда марсианских форм, как и вообще в криолитозоне, неудачно, из-за того что настоящие земные оползни формируются при участии жидкой воды.

На Марсе существуют постоянные и сезонные полярные шапки (рис. 8.2).



Рис. 8.2. Ледники на Марсе²

Последние образуются из льда CO_2 , вымерзающего из атмосферы зимой. При этом, возможно, южная полярная шапка состоит

¹ Кузьмин А. И. Криолитосфера Марса.

² URL: <http://rulife.ru/20919-uchenie-nashli-na-marse-mnogochislennye-ledniki-pod-sloem-pili.html> (дата обращения 17.11.2020).

из льда CO_2 (с H_2O), а северная представлена запыленным льдом H_2O мощностью до 1 км. Рост полярных шапок Марса происходит с начала осени до весны за счет конденсации из атмосферы углекислоты; образуется слой сухого льда всего в несколько сантиметров. Летом водный лед слишком нагрет (до температуры около -70°C), чтобы могла существовать твердая углекислота. Возможно также, что шапки содержат газовые гидраты. Иногда в областях планеты вне полярных шапок по утрам появляются яркие белые пятна, которые затем исчезают; предполагается, что эти пятна — иней.

Вода, если бы она могла течь по поверхности Марса в наше время, будет кипеть из-за ничтожного давления и замерзать одновременно. Однако в появившихся недавно сообщениях Лаборатории реактивного движения в Калифорнии говорилось об обнаружении свежих оврагов на склонах долин и кратеров, которые, возможно, были прорыты водой, выходящей на поверхность, — по аналогии с земными ключами (рис. 8.3)



Рис. 8.3. Водно-эрозионные формы на поверхности Марса
(NASA/MSSS/Release MOC2-73 Nanedi)

Спутники Марса Фобос и Деймос, а также малые планеты — астероиды отличаются низкой теплопроводностью и альбедо (0,03—0,16). Это самые темные тела Солнечной системы, но они слишком далеки от Солнца, чтобы достаточно нагреться, и сложены, вероятно, морозными породами — силикатами с большим содержанием углерода. Однако обнаруженные там линейчатые структуры типа борозд или желобов могут оказаться следами древней эрозии.

Планеты-гиганты **Юпитер** и **Сатурн** скрыты мощной атмосферой и состоят преимущественно из газа. У Юпитера, а также Сатурна, возможно, имеется ядро, состоящее из тяжелой и ледяной компонент. Кольца Сатурна, очевидно, образуют частицы льда H_2O с примесью скальных пород.

Спутники Юпитера Европа, Ганимед, Каллисто и спутники Сатурна Титан, Мимас, Тефия, Диона, Рея, Энцелад и Япет содержат

значительное количество льда¹. Возможно, на Титане существует океан (этан-метановый), создающий возможность развития флювиальных и даже плювиальных процессов². Предполагается, что Европа, Ганимед и Каллисто покрыты ледяной корой, толщина которой на Европе около 70 км, а на Ганимеде 100 км.

Европа — единственный из спутников, для которого состав поверхности хорошо известен; очень высокое альbedo (0,64) и данные поляризации не оставляют сомнений в то, что спутник покрыт льдом. На поверхности Европы видны трещины длиной в тысячи километров, а кратеры отсутствуют вовсе. Последние, вероятно, уничтожены активностью ледяного моря планеты.

Средняя плотность Ганимеда — около 1,93 г/см³; при этом считается, что он состоит преимущественно из льда H₂O. По расчетам, толщина ледяного покрова — около 100 км, а ниже может существовать водный океан глубиной 400—800 км. Его поверхность представляет собой участки льда и каменистого вещества неизвестного состава; интересно, что лед и темное вещество не смешаны. Возможно, у Ганимеда есть атмосфера. Ганимед можно отнести к сообществам планет с развитием криолитогеоза водного типа, для пород которого характерны пылеватость, различные криогенные текстуры мерзлых пород, присутствие разновидностей льда с различными модификациями кристаллической решетки и аморфного льда в полярных шапках.

Процессы энерго- и массообмена, определяющие фазовые переходы при замерзании, оттаивании, сублимации и абликации, составляют физическую сущность криогенного процесса водного типа. Однако в условиях Ганимеда не следует недооценивать и процессы морозного выветривания мерзлых пород, течения льда, метеоритной бомбардировки и морозобойного растрескивания, которые, очевидно, формируют особенности ледяных кратеров и полигональность трещиноватости этого спутника. Одной из возможных причин трещинообразования на поверхности Ганимеда являются температурные деформации.

Значение коэффициента линейного расширения для льдистых дисперсных отложений и льда при низких температурах, по экспериментальным данным, $(15 \div 30) \cdot 10^{-6}$ 1/°C. Считая, что температурные колебания обусловлены солнечным нагревом и последующим остыванием поверхности спутника в тени, оценочный расчет показывает, что при этом глубина проникновения температурных колебаний составит около 2 м, а средний температурный градиент — 0,15 °C/см.

¹ Маэно Н. Наука о льде.

² Ершов В. Д., Ершов Э. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел.

Для расчета расстояний между трещинами воспользуемся формулой Б. Н. Достовалова¹:

$$x = \frac{2\tau}{\alpha G \frac{\Delta t}{\Delta z}},$$

где x — расстояние между трещинами; τ — прочность материна разрыв; α — коэффициент линейного расширения; G — модуль упругости при сдвиге ($\sim 1/3$ модуля упругости при сжатии); $\Delta t/\Delta z$ — градиент температуры. Временная прочность льда и дисперсных пород на сжатие при таких температурах может составить, по экспериментальным данным, около 35 МПа. При обычном соотношении прочности на сжатие и на растяжение 1 : 2 — 1 : 6 временная прочность на растяжение может достигнуть 5—10 МПа. Модуль деформации на сжатие в экспериментах при низких температурах составлял в среднем 300 МПа.

Проведенные расчеты показывают, что размер полигонов (ортогональных и гексагональных) морозобойных трещин в условиях Ганимеда может достигать 1—2 км. В ослабленных зонах этот размер может значительно уменьшаться. В то же время в экспериментах исходили из максимальных дистанционно измеренных температур поверхности Ганимеда. Вероятно, что в приполярных областях колебания температур могут быть ниже, по крайней мере на порядок, и, соответственно, могут увеличиться размеры полигонов. Однако они едва ли могут достигнуть 30 км и более за счет только изменений температуры. Таким образом, такие трещины, если и существуют, на анализируемом монтаже поверхности Ганимеда не выявляются.

В то же время достаточно давно установлены циклы колебания солнечной активности, в частности 11-летний цикл. Эти колебания надежно установлены для численности пятен на Солнце, так называемых чисел Вольфа. Связь между числами Вольфа и интенсивностью солнечной активности еще требует исследования, коэффициенты корреляции не очень высоки. Среднее изменение интенсивности прямой солнечной радиации, зафиксированное при безоблачном небе по 13 станциям Северного полушария Земли за последние сто лет, составляет по 11-летним циклам до 3—4 %². Если принять для оценки, что так же изменяется тепловой поток от Солнца, колебания равновесной (при равенстве теплового потока на спутник и его излучения) температуры могут составить около 1—2 °С, что близко к некоторым земным данным по изменению температур воздуха. Глубина проникновения таких колебаний может составить око-

¹ Общее мерзлотоведение (геокриология).

² Пивоварова З. И. Радиационные характеристики климата СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1977.

ло 50 м и более. При этом на поверхности Ганимеда температурные трещины будут формироваться с частотой около 250 км и более. При оценке трещинных структур на Ганимеде с точки зрения их происхождения необходимо, вероятно, помимо тектонических и температурных причин принять во внимание возможность трещинообразования за счет сублимации (испарения) льда.

Энцелад, спутник Сатурна, так же как и Титан, покрыт ледяной корой, под которой, по-видимому, находится океан жидкой воды, возможно, распространенный по всей поверхности. Похоже, через трещины во льду вода способна подниматься. На Энцеладе присутствуют гейзеры. Анализ показал, что они больше чем на 90 % состоят из воды с растворенными в ней солями; найдены также небольшие количества низкомолекулярных органических веществ — метана, ацетилена, пропана¹. Считается, что в океане Энцелада возможна жизнь².

В целом поверхность спутников Юпитера удивительно сглаженная, отметки рельефа изменяются в пределах 1 км. Температура поверхности спутников $-110...-140$ °С, как раз в том интервале, где давление водяных паров сильно зависит от температуры. Время жизни льда на поверхности определяется температурой и, соответственно, альбедо. Расчеты показывают, что при таких температурах за все время существования Солнечной системы могло бы быть потеряно менее 1 м слоя льда. Но когда температура поднимается выше -120 °С, что бывает вблизи экваторов при обращении, то всего за несколько миллионов лет могут быть потеряны многие метры льда.

Каллисто по размерам близок к Меркурию, но, вероятно, состоит в основном из воды; его поверхность в значительной степени покрыта темными минералами, вероятно, реголитом с некоторым количеством H_2O .

При температуре поверхности Ио стабильность льда проблематична; спектральные данные это подтверждают. Предполагается, что слой льда в сотни метров здесь мог испариться, оставив на поверхности соли. Во всяком случае полярные шапки на Ио темно-красные, а не белые, каким должен быть лед H_2O .

Предполагается, что у **Урана** и **Нептуна** каменное ядро с грязевой оболочкой, состоящей из воды и метана. Поверхности спутников Урана отличаются низким альбедо и состоят из водного льда; при этом Миранда имеет, возможно, водно-ледяную поверхность³. Поверхность Тритона, спутника Нептуна, вероятно, состоит из жидкого азота и нескольких островов твердого метана. Глубокие озера

¹ *Verbiscer A. et al. Cosmic graffiti artist caught in the act // Science. 2007. Vol. 315. № 5813. P. 815.*

² *McKay C. P. et al. The possible origin and persistence of life on Enceladus and detection of biomarkers in the plume // Astrobiology. 2008. Vol. 8 (5). P. 909—919.*

³ *Маров М. Я. Планеты Солнечной системы.*

темной жидкости и океаны жидкой грязи свидетельствуют о вулканической активности на нем при температуре, близкой к абсолютному нулю, — $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹. Считается, что метановый лед присутствует на Плуtone, а также на его спутнике — Хароне; однако он, вероятно, неустойчив.

Одним из самых интресных проявлений криогенных процессов на космических объектах являются выбросы газообразного и жидкого вещества, получившие название *криовулканизма*. Впервые криовулканы были обнаружены космическим аппаратом «Вояджер-2» на спутнике Нептуна Тритоне в 1989 г. В районах южной и северной полярных шапок были зафиксированы темные пятна. При детальном изучении ими оказались газо-жидкие струи азота, истекающие из жерл криовулканов. На высоте 8 км струи изгибаются на 90° и вытягиваются в широкие горизонтальные шлейфы, тянущиеся на 150 км и более.

Криовулканизм — широко распространенное явление в космосе, он обнаружен на различных планетах: Плуtone (который ходе 26-й Ассамблеи Международного астрономического союза, проходившей в Праге 14—25 августа 2006 г., было принято включить в особую группу карликовых планет), Марсе, на спутниках Сатурна Титане, Энцеладе, спутнике Нептуна Тритоне и других космических объектах Солнечной системы. Низкие температуры на них ($-180\text{...}-240\text{ }^{\circ}\text{C}$) исключают участие в данных процессах жидкой воды. Причиной криовулканизма вероятнее всего является разложения газоклатратных гидратов N_2 , CH_4 , CO , CO_2 , Ar_2 . Причиной разложения газогидратов может быть разогрев как от внутренних источников тепла, так и от сезонного колебания солнечной энергии. В районе южного полюса Марса обнаружены многочисленные проявления криовулканизма (рис. 8.4).

Сезонные гейзеры выбрасывают в атмосферу планеты мощные фонтаны углекислого газа. Небольшого избыточного давления газовой смеси, возникающей в глубинном слое при его нагреве, оказывается вполне достаточно, чтобы выбросить газовый фонтан высоко в разреженную атмосферу. Слабый ветер, дующий в верхних слоях атмосферы, уносит выброшенный материал, на сотни километров в сторону, где он откладывается³. Явление криовулканизма, широко распространенное в космосе, реализуется и в земных условиях. Обнаруженные на севере Западной Сибири воронки газового выброса (см. тему 2), по мнению многих специалистов, формируются при разложении газовых гидратов метана и углекислого газа.

¹ Ершов В. Д., Ершов Э. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел.

² Kargel J. S. Cryovolcanism on the icy satellites // Comparative Planetology with an Earth Perspective. 1995. P. 101—113.

³ Бурба Г. Извержения миров // Вокруг света. 2006. № 5. С. 98—104.

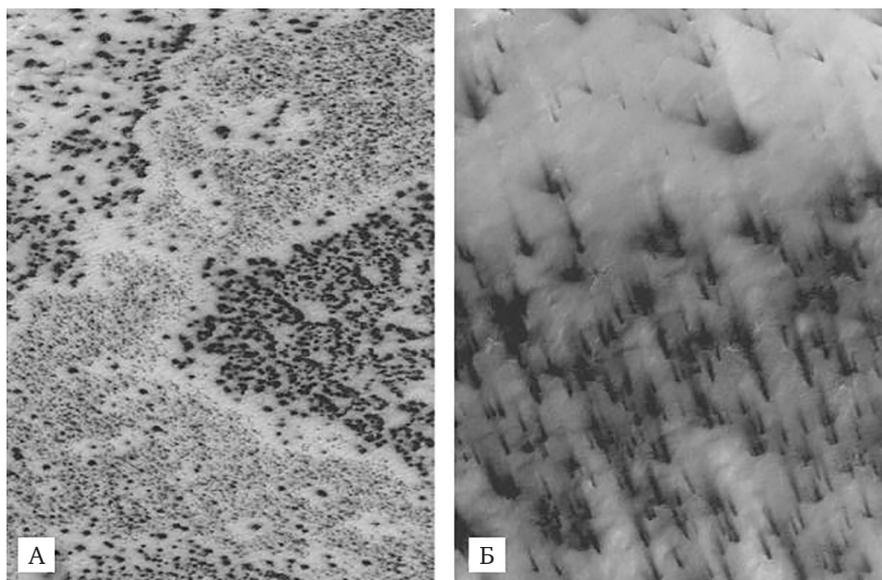


Рис. 8.4. Гейзеры на южном полюсе Марса в период минимума активности (А) и максимума (Б)¹

Кометы, эти летящие, холодные снежно-ледяные факелы, также представляют собой криогенные образования из льда H_2O и CO_2 . Во время прохождения кометы близко от Солнца поверхностный слой может нагреваться до $50\text{ }^{\circ}C$, а лед интенсивно испаряется², иногда с огромной скоростью в 40 т/с .

8.3. Планетный криолитогенез и жизнь

Именно условия Земли с ее жидкой водой являются единственными из известных, подходящими для живых организмов. В то же время жизнедеятельность и ее продукты, изменяющие состав и строение горных пород, представляют собой важный компонент криолитогенеза. Кроме того, этот вопрос имеет и огромное естественнонаучное и философское значение. Поиски жизни на Марсе начались, возможно, даже ранее, чем изучение жизни в мерзлоте. Их история драматична и поучительна. Существовало несколько аргументов в пользу существования биосферы на Марсе, среди которых особенно убедительной была давно известная способность темных областей восстанавливаться после сильных пылевых

¹ URL: <https://www.planetarium-moscow.ru/about/news/geologiya-kosmosa-kriovulkany> (дата обращения: 25.11.2020).

² Ершов В. Д., Ершов Э. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел.

бурь¹. Действительно, бури должны были бы покрыть поверхность планеты однородным слоем пыли, если бы растительность не восстанавливала первоначальный вид. В то же время низкие давления и температуры, малое содержание воды в атмосфере, отсутствие кислорода делают Марс малопригодным для жизни. Однако известно, что в условиях, аналогичных марсианским, многие почвенные бактерии по крайней мере не погибают; их много в любом взятом наугад образце почвы на Земле. К сожалению, биологические эксперименты с марсианским грунтом не принесли результатов; высокий уровень ультрафиолетовой радиации на поверхности и обнаружение там перекисных соединений также оставляют немного надежд.

В заключение остановимся на проблеме самого появления жизни на Земле (см. п. 4.4.2). В теории панспермии, которая становится все более популярной, предполагается, она могла быть занесена с других планет. Эта идея очень древняя, она основывается на предположении, что жизнь широко распространена во Вселенной. Основные концепции, лежащие в ее основе, имеют историю, охватывающую много столетий и культур.

В наиболее древних философиях Востока — например, в Ведах и письмах Будды — космический характер жизни считался само собой разумеющимся. Жизнь расценивалась как свойственная Вселенной черта, который является вечной. Ее сторонники получили в последнее время некоторые, хотя и не бесспорные, свидетельства ее справедливости в виде данных микробиологии и исследования метеоритов. Отмечалось, что много типов земных микроорганизмов живут при температурах, близких к температуре замерзания воды. Действительно, бактерии и водоросли изобилуют в полярных шапках, в мерзлых почвах, во льду и снеге. Пространство вне Земли также может быть домом для микроорганизмов. Во внешних областях Солнечной системы, в планетах Уран, Нептун и других, в спутниках планет, в кометах содержится более чем 100 земных масс льда и присутствуют следы органических молекул. Кометы и далекие планеты проводят большую часть своей жизни при температурах ниже 50 К, но в прошлом радиоактивный распад обеспечивал оттаивание льда и мог создавать окружающую среду, пригодную для роста микроорганизмов.

Несколько комет приближаются каждый год в пределы орбитального расстояния Земли от Солнца. В это время они достаточно нагреты, чтобы происходило оттаивание их поверхности. Даже на Земле теплые межледниковья, типа того, в котором мы теперь живем, составляют только примерно десятую часть более длительных эпох оледенений, так что криогенные стратегии выживания должны быть критическими продолжениями жизни. Вне Солнечной

¹ Маров М. Я. Планеты Солнечной системы.

системы микроорганизмы, находясь в вакууме, неизбежно высохли бы при температурах 10—30 К. Они оставались бы в таком бездействующем высушенном замороженном состоянии до того времени, когда они окажутся в среде, пригодной для размножения.

Принятая теория происхождения жизни приводит нас в древнюю атмосферу Земли, где синтез химических соединений, например аминокислот и органических газов, происходит под действием солнечной ультрафиолетовой радиации и электрических разрядов. Органические молекулы попадают с дождем в первичные океаны и образуют суп, где по прошествии миллионов лет могла возникнуть самокопирующаяся живая клетка. Эксперименты подтвердили образование таких молекул, но дальнейшие шаги к жизни оставались загадкой. Исключительная сложность живущих организмов на молекулярном уровне самоочевидна, и ясно, что существенного продвижения на пути понимания того, как они возникли, за последнее по крайней мере 50 лет так и не произошло.

Возможно, вероятность возникновения белков и ДНК из первичного материала такова, что ее можно сравнить с вероятностью сборки «Боинга-747» ураганом, пронесшимся над мусорной свалкой, по словам астрофизика Хойла, сказанным им в отношении РНК. Путь от бактерии к человеку, по существу, значительно проще, чем промежуток между не-живущей смесью органических молекул и жизнью. Кроме того, у нас нет никаких свидетельств того, что этот шаг вообще когда-либо случался на Земле.

Существует, однако, так называемая ультрафиолетовая проблема. Путешествующие в космосе бактерии были бы восприимчивы к повреждениям от ультрафиолетового и более жесткого излучения звезд. Однако убить ультрафиолетовым излучением не так просто. Генетическая информация лишь повреждается, но она может быть восстановлена специальными механизмами, существование которых было недавно доказано в бактеральных спорах.

Сегодня практически отсутствуют данные о выживании бактерий при низких температурах, в вакууме и при одновременном действии излучения. Кроме того, организмы могут быть защищены от радиации слоем льда или горных пород. Имеются бактерии, например *Deinococcus radiodurans*, которые могут жить в ядерных реакторах; эти бактерии совершают настоящий подвиг, используя ферменты, чтобы восстановить чудовищные повреждения ДНК.

Дозы радиации, получаемой бактериями в межпланетном пространстве в пределах Солнечной системы, зависят от расстояния от Солнца и стадии солнечной активности. В недавнем космическом эксперименте НАСА по прямой экспозиции спор *B. subtilis* к солнечной радиации в течение 2107 дней было установлено, что значительная часть этих спор осталась жизнеспособной.

Доза радиации, полученных незащищенной бактерией в межзвездном пространстве, трудно определима, возможно, она составляет 0,1—0,5 мГр за миллион лет. Однако воздействие такой радиации на живую бактерию и на бездействующую высушенную замораживанием клетку может значительно отличаться. Даже на Земле, при уровне радиации 0,001—0,01 Гр в год, за 10^8 лет доза составит 0,1—1 мГр. Однако, по публикациям, древние живые микроорганизмы были извлечены из антарктического льда возрастом почти 500 000 лет, янтаря возрастом более чем 25—40 млн лет и даже кристалла соли, возраст которого 250 млн лет¹.

В середине 1960-х гг. ученые исследовали метеорит, который упал во Франции в 1864 г. Они утверждали, что нашли следы органических структур, которые были подобны окаменелым микроорганизмам, в частности морским водорослям. В начале 1980-х гг. немецкий палеонтолог Х. Д. Пфлюг повторно поставил эту проблему. На микрофотографиях метеоритов в атласе, который был подготовлен в Палеонтологическом институте РАН², эти структуры действительно напоминают микроорганизмы. Если все эти предположения справедливы, жизнь может существовать не только на Марсе, но и на спутнике Юпитера Европе, кометах, даже в горячих облаках Венеры, не говоря уже о других звездных системах.

Выводы

Фазовые переходы и различные криогенные образования, связанные с ними, широко распространены на различных космических объектах.

На некоторых космических объектах существуют большие объемы воды в твердой фазе.

Морфология некоторых объектов на планетах Солнечной системы подобна криогенным образованиям на Земле, что может свидетельствовать о схожести процессов их образования.

Глубокое охлаждение биологических объектов может способствовать их сохранению и, как следствие, распространению жизни в космосе.

Криосфера Земли является частным случаем криогенных систем космоса.

¹ *Vreeland R. H., Rosenzweig W. D., Powers D. W.* Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal.

² *Жмур С. И., Розанов А. Ю., Горленко В. М.* Литифицированные остатки микроорганизмов в углистых хондритах // *Геохимия*. 1997. № 1. С. 66—68; *Астафьева М. М. и др.* Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. М. : ПИН РАН, 2011.

Заключение

Исторически случилось так, что закон возрастания хаоса (второй закон термодинамики) сформулирован, а закон возрастания организованности не описан до сих пор. Наука XIX и XX вв. широко применяла методы, которые позволяли выделить и подробно изучить отдельные части рассматриваемых объектов. Получалась мозаика элементов и структурных уровней вне их общих связей и обусловленностей, расчлененная по различным отраслям знаний. В результате сформировался конгломерат фактов, из которых нельзя сложить целое. Причина такой ситуации, по мнению У. Р. Эшби, в том, что вот уже более сотни лет стратегию научного поиска составлял преимущественно анализ — расчленения сложного целого на простые части; синтезом же, как таковым, практически пренебрегали¹.

Важным шагом в синтезе естественно-научных и общественных знаний является теория систем разработанная Л. Берталанфи². Она позволила сделать выдающееся открытие, касающееся противоречия между теориями Дарвина и Клаузиуса. Теория Дарвина предсказывала прогресс и мудрость развивающейся ко все более сложным формам Вселенной. А Больцманом и Клаузиусом, наоборот, был сделан вывод о «тепловой смерти» Вселенной, где жизнь рассматривалась как недоразумение. Берталанфи объяснил парадокс тем, что природа представляет собой открытую сложную систему, где сложность увеличивается за счет внешнего притока энергии.

При рассмотрении криосферы использовалась методология синтеза, заключающаяся в представлениях о иерархически организованной системе, базирующейся на единой энергетической основе и материальном носителе. Отдельные, кажущиеся не связанными между собой части являются ее подсистемами с индивидуальной структурой и внутренней организацией. Этот подход требует поиска аналогий, причинно-следственных связей, действующих как на внутреннем, так и внешнем уровне по отношению как к каждой из подсистем, так и к криосфере в целом. В настоящее время возникла потребность развития криологии, по пути объединения зна-

¹ Доклад У. Росса Эшби на конференции «Общества исследований в области общей теории систем» в Атланте, штат Джорджия, 27 декабря 1955 г.

² Bertalanffy L. von. General system theory // General Systems. 1956. Vol. I.

ний о криосфере, полученные в разных областях наук о Земле. При этом следует использовать два методических подхода:

1) исследование структуры криогенных систем, как ключа к познанию истории их возникновения и развития;

2) исследование структуры связей различных уровней организации — от кристалла льда до криосферы в целом.

Выделяемые криогенные системы имеют общие свойства. Во-первых, система существует во времени и в пространстве и находится в непрерывном развитии. Во-вторых, число ее элементов конечно. В-третьих, в системе находится единая основа для классификации ее элементов. В-четвертых, система обладает внутренним единством. В-пятых, система находится в единстве со средой.

Несмотря на то что геосистемный подход является весьма перспективным и в будущем, несомненно, станет основным при изучении криосферы, существует ряд проблем, которые мешают его внедрению в теорию и практику исследований.

1. Требуется доработка представлений о формировании и динамике криогенных геосистем на уровне генетического типа, территорий и геоструктур при воздействии различных природных факторов (климат, тектоника, колебания уровня Мирового океана).

2. Необходимо дополнить метод мерзлотнофациального анализа, предложенного Е. М. Катасоновым, путем разработки положений, учитывающих последовательную смену процессов льдообразования при формировании эпигенетических ММП.

3. В геокриологии принято выделять особую генетическую группу «инъекционных льдов», связанную с внедрением свободной воды в мерзлую породу. При всей важности инъекций следует учитывать, что это лишь один из элементов в группе напорных процессов, связанных с формированием мерзлых пород (вертикальное и горизонтальное перераспределение грунтовых вод, гидроразрыв промерзающих пород, инъекции, пластическое течение водонасыщенных грунтовых масс, течение мерзлых грунтов и льдов). Необходима разработка классификации напорных процессов, определение условий их реализации, выделение соответствующих им криогенных образований.

4. Зона фазовых переходов была выделена М. И. Сумгиным как «нулевая завеса» еще в начальный период развития геокриологии¹. Позднее Н. А. Цытович дал ее общую характеристику, выделив три основных структурных элемента: область значительных фазовых превращений, переходную область, область практически замерзшего состояния². В дальнейшем, несмотря на то что зона фазовых переходов играет важную роль в формировании и разрушении мерзлых пород, в ее изучении было сделано очень мало. Недостаточно материалов

¹ Сумгин М. И. и др. Общее мерзлотоведение. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1940.

² Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. М. : Высшая школа, 1973.

о комплексе парагенетических процессов, происходящих в ней, мало данных о ее морфологии, структуре, размерах, темпах перемещения границ для разных типов грунтов и различных значений интенсивности теплообмена. Притом что область фазовых переходов подвижна, она содержит все признаки геосистемы, такие как границы, структурные связи, общие закономерности строения. Поэтому ее изучение наиболее перспективно при использовании геосистемного подхода.

5. Необходимо дальнейшее совершенствование теории функционирования управляющих геосистем, перекрывающих ММП. Данные многокомпонентные геосистемы включают снежный покров, поверхностные водоемы, растительный покров, слой сезонного промерзания-оттаивания и переходный слой в верхней части ММП¹. Благодаря синергетическим эффектам в них формируются прямые и обратные связи, ослабляющие или усиливающие теплообмен между ММП и атмосферой. Разнообразие поверхностных условий определяет соответствующее разнообразие структуры и свойств управляющих систем. Это, в свою очередь, обуславливает неоднозначную реакцию различных участков крио литозоны на внешние воздействия. Кстати, эти эффекты не учитываются ни в одном сценарии развития криолитозоны при глобальных изменениях климата. Поверхностным системам присуща иерархичность, которая определяется геосистемной организацией ландшафтной оболочки Земли. Одной из особенностей поверхностных систем является большая неоднородность их распределения, при оценке которой потребуется разработка математического аппарата с применением вероятностных методов².

Представленные в курсе подходы имеют не только теоретическое, но и прикладное значение. Строительство на территориях, занятых мерзлыми породами, требует разработки современных методов оценки взаимодействий технических объектов с мерзлыми толщами. Требования к экологической составляющей хозяйственной деятельности возросли, поэтому важна оценка состояния криогенных систем, их устойчивости и динамики изменений, учитывающая региональные и отраслевые особенности. Особенно важны рассматриваемые подходы при разработке количественных моделей криогенных образований, что позволит принимать в расчет причинно-следственные связи и решать современные комплексные задачи геотехники, геоэкологии, палеогеографии, а также совершенствовать прогноз развития криолитозоны при изменении климата и техногенных нарушениях.

¹ Гречищев С. Е. , Чистотинов Л. В. , Шур Ю. Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз.

² Хименков А. Н., А Власов А. Н. Влияние неоднородностей природной среды на динамику криолитозоны // Криосфера Земли. 2007. № 1. С. 21—28.

Список рекомендуемой литературы

1. Брушков, А. В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства / А. В. Брушков. — Москва : Изд-во МГУ, 1998.

2. Ершов, В. Д. Внеземная криолитозона. Криолитозона планет, их спутников и других космических тел / В. Д. Ершов, Э. Д. Ершов // Основы геокриологии. Т. 3. — Москва : Изд-во МГУ, 1998.

3. Ершов, Э. Д. Общая геокриология : учебник / Э. Д. Ершов. — Москва : Изд-во МГУ, 2002.

4. Зимы нашей планеты : Земля подо льдом / Б. Джон и др. ; Под ред. Б. Джона. — Москва : Мир, 1982.

5. Лозина-Лозинский, Л. К. Очерки по криобиологии / Л. К. Лозина-Лозинский. — Ленинград : Наука, 1972.

6. Мельников, А. Н. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования / А. Н. Мельников [и др.]. — Новосибирск : Гео, 2010.

7. Попов, А. И. Криолитология / А. И. Попов, Г. Э. Розенбаум, Н. В. Тумель. — Москва : Изд-во МГУ, 1985.

8. Савельев, Б. А. Физика, химия, и строение природных льдов и мерзлых горных пород / Б. А. Савельев. — Москва : Изд-во МГУ, 1971.

9. Соломатин, В. И. Физика и география подземного оледенения / В. И. Соломатин. — Новосибирск : Гео, 2013.

10. Соломатин, В. И. Геокриология: подземные льды : учебное пособие для вузов / В. И. Соломатин. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 411 с. — (Высшее образование).

11. Тумель, Н. В. Геоэкология криолитозоны : учебное пособие для вузов / Н. В. Тумель, Л. И. Зотова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 204 с. : [24] с. цв. вкл. — (Высшее образование).

12. Фролов, А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А. Д. Фролов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005.

13. Хименков, А. Н. Геосистемный подход в геокриологии / А. Н. Хименков // Криосфера Земли. — 2013. — Т. 17. — № 2. — С. 74—82.

14. Хименков, А. Н. Океанический криолитогенез / А. Н. Хименков, А. В. Брушков. — Москва : Наука, 2003.

15. Уошборн, А. Л. Мир холода. Геокриологические исследования : перевод с английского / А. Л. Уошборн. — Москва : Прогресс, 1988.

16. Шумский, П. А. Основы структурного ледоведения / П. А. Шумский. — Москва : Изд-во АН СССР, 1955.

17. Harris, S. Geocryology: characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms / S. Harris, A. Brouchkov, G. Cheng. CRC Press, 2017.

Наши книги можно приобрести:

Учебным заведениям и библиотекам:

в отделе по работе с вузами
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: vuz@urait.ru

Частным лицам:

список магазинов смотрите на сайте urait.ru
в разделе «Частным лицам»

Магазинам и корпоративным клиентам:

в отделе продаж
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru

Отзывы об издании присылайте в редакцию

e-mail: gred@urait.ru

**Новые издания и дополнительные материалы доступны
на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Учебное издание

**Хименков Александр Николаевич,
Брушков Анатолий Викторович**

ВВЕДЕНИЕ В СТРУКТУРНУЮ КРИОЛОГИЮ

Учебник для вузов

Формат 70×100¹/₁₆.

Гарнитура «Charter». Печать цифровая.

Усл. печ. л. 23,04.

ООО «Издательство Юрайт»

111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.

Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru