

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОРДЕНА ЛЕНИНА СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ

На правах рукописи

РГБ ОД

2000-0000000

Манзырев Дмитрий Владимирович

**МЕХАНИЗМ И ДИНАМИКА КРИОСОЛИФЛЮКЦИОННОГО
СМЕЩЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД (на примере Забайкалья)**

Специальность 04.00.07 - Инженерная геология, мерзлотоведение
и грунтоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2000

Работа выполнена на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии
Читинского государственного технического университета

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук,
доцент Петров В.С.

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор Рященко Т.Г.

кандидат геолого-минералогических наук,
доцент Шестернев Д.М.

Ведущая организация: Читинский Институт Природных Ресурсов СО
РАН

Защита состоится " 29 " июня 2000 г. в " 9 " часов на заседании дис-
сертационного совета Д 003.07.02 при Институте Земной Коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, прошу отпра-
влять Ученому секретарю диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского науч-
ного центра СО РАН (в здании ИЗК СО РАН).

Автореферат разослан "16" мая 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук  Ю.И. Кустов

29 (2P54, 7) 823, 0

2 823.127, 0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Значительные трудности в хозяйственную деятельность человека вносит широкое развитие склоновых процессов, весомую роль среди которых в области многолетнемерзлых пород и глубокого сезонного промерзания играет криосолифлюкция. Подтверждением тому являются многочисленные свидетельства о деформациях различного инженерных сооружений, вызванных криосолифлюкцией, которые приводят к осложнению или полному прекращению их эксплуатации.

Основной объем исследований приходится на изучение строения солифлюкционных отложений и скорости их движения на поверхности склона. Количество наблюдений за смещением пород по глубине и во времени крайне ограничено. К настоящему времени солифлюкционные отложения отнесены к самостоятельному континентальному типу. О механизме криосолифлюкции сложилось представление как о вязкопластическом течении пород на склонах; получены общие зависимости развития процесса от условий увлажнения, угла наклона склона, прочности того или иного дернового покрова на разрыв и т.д. Однако, несмотря на обширный фактический материал, ряд вопросов, например, выявление качественных и количественных взаимосвязей между криогенным структуро- и текстурообразованием и типами контактов между компонентами пород при их оттаивании, типами контактов и механизмом криосолифлюкции, структурно-прочностным строением пород сезонноталого слоя и динамикой смещения, остаются еще недостаточно разработанными и требуют дальнейшего изучения.

Целью настоящей работы явилось установление механизма, динамики и особенностей развития криосолифлюкции с единых позиций теории контактных взаимодействий в породах, на основе методики комплексных стационарных исследований процессов криогенного структуро- и текстурообразования, структурной прочности оттаивающих пород, типов контактов, дифференциальной и интегральной величины смещения по глубине и во времени.

Задачи исследований:

- разработать методику комплексных стационарных исследований, позволяющих определить параметры криосолифлюкции с учетом влияния на них теплофизических, физико-химических и физико-механических факторов;
- выявить связь механизма криосолифлюкции и характерных типов контактов между компонентами солифлюкционных отложений;
- установить роль криогенного структуро- и текстурообразования в динамике криосолифлюкционного процесса;
- вскрыть особенности развития составляющих факторов криосолифлюкции в породах различного состава, строения и свойств, при различных условиях теплообмена на поверхности;
- разработать технологические решения по защите инженерных сооружений от деформаций смещения на солифлюкционных склонах.

Методы исследований включают анализ и обобщение фондовых и литературных данных, проведение стационарных наблюдений и полевого экспериментирования, определение основных физических и физико-механических показателей пород в полевых и лабораторных условиях в их динамике по глубине сезонноталого слоя, обработку экспериментальных данных с привлечением методов математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика комплексных стационарных исследований, включающая определение количественных параметров криосолифлюкции с применением новых устройств для ее измерения, оценку влияния криогенного структуро- и текстурообразования на развитие криосолифлюкции на основе широкого использования методов количественной характеристики физических и физико-механических свойств пород;
 - определен механизм криосолифлюкции при различных типах контактов между компонентами пород;
 - установлена динамика криосолифлюкционного процесса в зависимости от структурно-прочностного строения пород сезонноталого слоя при их оттаивании;
 - вскрыты особенности криосолифлюкции пород различного состава, строения и свойств, при различных условиях теплообмена на поверхности с количественной оценкой вклада составляющих ее факторов в суммарную величину смещения;
 - разработан способ защиты инженерных сооружений от деформаций, вызванных развитием криосолифлюкционного смещения;
 - усовершенствована методика количественной оценки величины криосолифлюкции с учетом выявленных особенностей механизма процесса.

Защищаемые положения:

1. Механизм криосолифлюкции представляет собой естественное сочетание вязкого и вязкопластического течения пород и их десерпционного смещения криогенной, гидрогенной и термогенной природы, обладающее определенной последовательностью и согласованностью в зависимости от типа контактного взаимодействия между компонентами пород.
2. Динамика криосолифлюкции определяется характером криогенного структуро- и текстурообразования, формирующим структурно-прочностное строение пород сезонноталого слоя при их оттаивании.
3. Особенности криосолифлюкции пород различного состава, строения и свойств, условий теплообмена на поверхности связаны с развитием вязкой, вязкопластической и десерпционной составляющих и определяются интегральным выражением этого развития.

Достоверность защищаемых положений, выводов и результатов, полученных в диссертации, обеспечивается необходимым объемом статистически обработанных экспериментальных данных, достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных зависимостей, положительным опытом внедрения научных положений работы при решении производственных задач.

Практическая значимость работы. Результаты выполненных исследований использованы для разработки мероприятий, направленных на защиту аварийных участков автодорог Читинского дорожно-эксплуатационного управления от деформаций, вызванных развитием криосолифлюкции. Получены патентно-защищенные технические решения (патент, №2105101, №2135696). Некоторые результаты исследований используются в учебном процессе кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ЧитГТУ.

Фактический материал и личный вклад автора. В основу диссертации положены результаты шестилетних исследований диссертанта в рамках тем № 7 Г/Б "Мерзлотно-инженерно-гидрогеологический мониторинг южной зоны распространения многолетнемерзлых пород" (номер гос. регистрации 019200017288), N 7-96 Г/Б "Инженерно-геологический прогноз криогенных процессов и управление ими при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых юга криолитозоны России" (номер гос. регистрации 019660005428) и исследований кафедры 1982-1992 гг., в которых с 1989 г. автор принимал непосредственное участие. Исследования проводились на 7 участках оборудованных 18 стационарными наблюдательными площадками.

Автором лично разработано устройство для измерения солифлюкции (УИС), оборудовано и проведены исследования на 12 площадках. Для определения гранулометрического состава, физико-механических свойств, плотности и объемной влажности пород отобрано соответственно 29 проб, 84 монолита и более 2000 образцов ненарушенного сложения. Выполнен анализ, обработка и обобщение полученных результатов.

Апробация. Результаты исследований и основные материалы диссертации докладывались на Первой конференции геокриологов России (Москва, 1996), региональных научно-технических совещаниях Читинской организации научно-технического общества строителей (Чита, 1997, 1998), научно-технических межвузовских конференциях (Чита, 1995-1999).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 9 статей, получено два патента на изобретение и подано две заявки на предполагаемое изобретение. Написан крупный раздел в заключительном отчете по теме N 7 Г/Б (номер гос. регистрации 019200017288).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 134 наименований и содержит 130 страниц машинописного текста, в том числе 22 рисунка, 11 таблиц.

Исследования проводились под руководством заведующего кафедрой, кандидата геолого-минералогических наук В.С.Петрова, которому автор выражает искреннюю признательность. Автор также благодарен за ценные советы и замечания гл.н.сотр. ИЗК СО РАН Ф.Н.Лещикову, профессору В.Г.Кондратьеву, доценту С.В.Смоличу и коллективу кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ЧитГТУ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Современное состояние вопроса. В главе содержится обзор современных представлений о проблеме. Условно выделено три основных направления проводимых исследований: геолого-географическое, физико-химическое и теплофизическое.

При геолого-географических исследованиях изучается влияние на развитие криосолифлюкции различных физических параметров природной среды. Широкое развитие данное направление получило благодаря работам Б.П.Агафонова, С.Г.Боча, В.А.Войлошникова, Б.И.Вторина, Е.А.Вториной, Л.С.Гарагули, Л.С.Говорухи, Г.Ф.Грависа, С.Е.Гречищева, Э.Д.Ершова, Л.А.Жигарева, М.И.Ивероловой, Т.Н.Каплиной, С.П.Качурин, В.А.Кудрявцева, С.А.Макарова, А.И.Попова, Н.Н.Романовского, В.С.Савельева, В.Л. Суходровского, С.В.Томирдиаро, Л.С.Троицкого, Е.В.Шандера, П.В.Швцова, G. Furrer, A. Wachburn и др. Накоплен обширный экспериментальный материал. Ряд вопросов изучен достаточно детально, например, механизм образования характерных солифлюкционных форм рельефа, состав, строение и свойства солифлюкционных отложений и др. Тем не менее недостаточно представлены количественные характеристики развития криосолифлюкции в зависимости от состава, влажности, плотности, вязкости пород и др. факторов.

При физико-химических подходах криосолифлюкция рассматривается в зависимости от структурной прочности отложений и факторов ее определяющих. Развитие данного направления стало возможным благодаря работам в областях коллоидной химии и физико-химической механики дисперсных структур (Б.В.Дерягин, П.А.Ребиндер, Е.Д.Щукин), микрореологии (В.И.Осипов и др.), грунтоведения и инженерной геологии (Р.С.Зиангиров, А.К.Ларионов, И.В.Попов, А.В.Приклонский, Е.М.Сергеев и др.). На сегодняшний день изучены структурные контакты в дисперсных породах и приведено их подразделение. Дана оценка прочности единичного контакта и преобладающего характера деформаций по каждому выделенному типу и т.п.

Исследованиями И.Я.Баранова, Л.А.Жигарева, В.С.Петрова и др. установлено, что наиболее интенсивно криосолифлюкция развивается в породах с коагуляционным типом контактов. Получены некоторые данные о влиянии минерального состава и обменных катионов. Не изучены особенности формирования структурных контактов между компонентами солифлюкционных отложений и их динамика в зависимости от различных факторов.

Теплофизический характер исследований предполагает изучение криосолифлюкции в зависимости от условий теплообмена на границе атмосфера-грунт. Определенный вклад в развитие данного направления внесли И.С.Васильев, Г.Ф.Гравис, Л.А.Жигарев, Т.Н.Каплина, С.П.Качурин, В.С.Петров, В.С.Савельев, Е.В.Шандер и др. Несмотря на обилие работ, рассматривающих влияние промерзания-оттаивания пород на развитие процесса (Л.А.Жигарев, Т.Н.Каплина, В.С.Савельев, Е.В.Шандер) и криогенные текстуры (И.С.Васильев, Л.А.Жигарев), практически не исследованными оста-

ются закономерности развития криосолифлюкции в зависимости от режима промерзания-оттаивания. Не раскрыта связь между криогенным структурообразованием и структурной прочностью оттаивающих солифлюкционных отложений и не дана ее количественная оценка.

Кроме изложенного рассмотрены существующие методы исследований и количественной оценки величины криосолифлюкции.

Глава II. Характеристика геолого-географических условий районов исследований. Территория Забайкалья включает в себя породы различных мерзлотно-температурных зон (по В.А.Кудрявцеву), отличающиеся температурой, мощностью, условиями формирования глубин сезонного промерзания-оттаивания, составом и др. параметрами. Поэтому выполнение поставленных в данной работе задач проводилось на целом ряде ключевых участков, расположенных в Северном и Центральном Забайкалье. Стационарные наблюдательные площадки располагались на склонах различной экспозиции и крутизны в широком диапазоне изменений основных параметров геокриологической обстановки.

Климатические условия Северного и Центрального Забайкалья имеют существенные различия. Среднегодовая температура воздуха в Северном Забайкалье на 3-5⁰ ниже, чем в Центральном и составляет -7,5⁰С. Устойчивые морозы наступают в середине октября и прекращаются в первой декаде мая. Среднегодовое значение количества выпадающих осадков повышается с ростом абсолютных отметок местности от 407,1 до 638,8 мм. В Центральном Забайкалье устойчивые морозы наступают в конце октября-начале ноября и прекращаются в начале третьей декады апреля. В среднем за год выпадает 334 мм атмосферных осадков.

Многолетнемерзлые породы в Северном Забайкалье имеют сплошное распространение, кроме таликовых зон, и мощность 150-500 м и более. На участках исследований температура многолетнемерзлых пород изменяется от -1,2 до -3,5 ⁰С. Глубина оттаивания составляет 0,4-1,3 м. Состав пород изменяется от пылеватого песка до легкого пылеватого суглинка, однако преобладают супеси. В Центральном Забайкалье (в районе исследований) многолетнемерзлые породы имеют островное распространение. Их мощность составляет 30-50 м. На участках исследований температура многолетнемерзлых пород изменяется от -0,2 до -0,9 ⁰С. Глубина оттаивания составляет 0,6-2,5 м. Состав пород представлен в основном пылеватыми суглинками с различным содержанием крупнообломочных включений.

В итоговой таблице приведены характеристики географических, геоморфологических и геокриологических условий, свойства пород каждого участка исследований.

Глава III. Методика экспериментальных исследований криосолифлюкции. В главе приведена методика комплексных стационарных исследований криосолифлюкции, которая предусматривает измерение смещений пород как по площади склона, так и по глубине сезонноталого слоя, изучение строения и свойств солифлюкционных отложений, наблюдения за тем-

пературным режимом пород.

Площадные стационарные наблюдения производились путем периодического определения положения марок относительно неподвижных опорных реперов. Марки располагались по профильным линиям вкрест простирания и по простиранию склона в местах наибольшего развития криосолифлюкции. Наблюдения выполнялись в виде серии измерений, включающей нивелирование всех марок, определение расстояний между ними по профильным линиям и их отклонения от створа (ординат). Координаты марок и величины смещения определялись по стандартным методикам.

Для наблюдения за процессом на стационарных наблюдательных площадках применялось разработанное нами устройство для измерения солифлюкции (УИС, рис. 1).

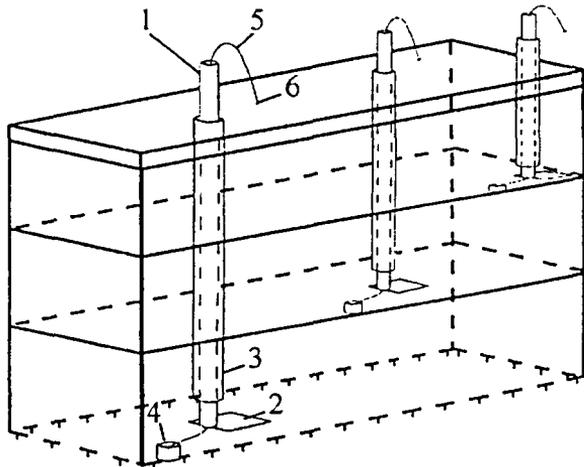


Рис. 1. Устройство для измерения солифлюкции (УИС)

УИС содержит несущую стальную трубку 1 с пластиной 2 ($S=8 \times 8$ см), пластмассовую трубку 3, марку 4, измерительный шнур 5. Измерительный шнур располагается в полем пространстве несущей трубки и крепится нижним концом к марке. Пластмассовая трубка одевается на несущую, а пространство между ними заполняется техническим вазелином. Установка УИСов производилась в скважины с интервалом 10-20 см, причем марки вдавливались в целик ниже их забоя.

Наблюдения на стационарных площадках включают всю серию измерений, применяемую при площадных исследованиях. Дополнительно измеряется длина шнура от метки 6 до верхнего обреза несущей трубки. Кроме того, развитие криосолифлюкции может привести к крену УИСа, при этом смещение его верхнего оголовка и пятки будут отличаться на некоторую величину. Поэтому нами было разработано устройство для измерения величины крена, что позволило использовать при определении величины смещения

пород по глубине сезонноталого слоя поправку за крен УИСа.

Определив интегральную величину криосолифлюкции, находили вклад составляющих ее факторов. Величину криогенной десерпции определяли по результатам наблюдений за деформациями пучения и осадки пород дифференцированно по глубине сезонноталого слоя. По эпюрам влажности и плотности находили величины набухания и усадки пород, по которым определяли вклад гидрогенной десерпции. Величина течения пород определялась как разница между интегральной величиной криосолифлюкции и десерпционным смещением.

Изучение строения и свойств солифлюкционных отложений. Для выявления типов контактов между структурными компонентами пород, а также связи между криогенным структурообразованием и структурной прочностью оттаивающих солифлюкционных отложений нами широко применялись методы количественной характеристики физических и физико-механических свойств (влажность, плотность, модуль общей деформации, предельное напряжение сдвига, вязкость и др.). Определение указанных показателей производилось в режимном цикле с учетом динамики структурно-прочностного строения пород по глубине сезонноталого слоя. Для наблюдений за скоростью промерзания и температурным режимом пород применялись электрические и термометрические косы.

Глава IV. Механизм и динамика криосолифлюкции. В общем виде величина криосолифлюкции может быть представлена следующим образом:

$$L = I_{\text{теч}} + I_{\text{кд}} + I_{\text{кд}}^{\text{л}} + I_{\text{гд}} + I_{\text{гд}}^{\text{к}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{теч}}$ - величина течения пород; $I_{\text{кд}}$ - величина криогенной десерпции пород; $I_{\text{кд}}^{\text{л}}$ - величина криогенной десерпции пород за счет их летнего пучения; $I_{\text{гд}}$ - величина гидрогенной десерпции; $I_{\text{гд}}^{\text{к}}$ - величина гидрогенной десерпции пород за счет их криогенного обезвоживания.

Течение пород на склонах. На основе разработанной методики комплексных стационарных исследований установлено, что взаимодействие между структурными компонентами солифлюкционных отложений при их оттаивании осуществляется, согласно инженерно-геологической классификации В.И. Осипова, в основном по 3 схемам, соответствующим дальнему коагуляционному, ближнему коагуляционному и переходному типам контактов.

В условиях порового льдовыделения между элементами мерзлой породы формируются минеральные и минерально-ледовые коагуляционные контакты. При оттаивании отложений с данной криогенной структурой значения их основных физических и механических показателей приведены в табл. I.

Таблица I

$\rho_0, \text{кг/м}^3$	$a, \text{МПа}^{-1}$	$E_0, \text{МПа}$	$\varphi, ^\circ$	$C, \text{МПа}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	Тип контакта
1000-1650	0,1 - 0,8	1 - 10	12-22	0,002-0,01	$10^{10} - 10^{12}$	ближний коагул.

Контактные взаимодействия между компонентами пород осуществляются по ближнему коагуляционному типу. Перекрытие граничных гидратных слоев обуславливает силы статического сопротивления сдвигу, зависящие от внешней нагрузки. При этом предел текучести имеет адгезионную природу. Течение пород можно условно отнести к вязкопластическому.

В условиях сегрегационного льдовыделения миграция влаги к фронту промерзания приводит к обезвоживанию талой зоны. Частицы и микроагрегаты сближаются и принимают более плотную упаковку, вызывая тем самым существенную усадку породы. В мерзлом состоянии обезвоженная зона характеризуется сухими и коагуляционными минеральными контактами. В таблице 2 приведены ее основные показатели при оттаивании.

Таблица 2

ρ_d , кг/м ³	a , МПа ⁻¹	E_0 , МПа	φ , °	C , МПа	η , Па·с
1650 - 1920	0,02 - 0,07	10 - 80	25-29	0,01 - 0,035	$10^{12} - 10^{13}$

Возрастание значений прочностных и деформационных показателей связано в первую очередь с формированием переходных контактов. Проведенные нами расчеты показывают влияние содержания переходных контактов на величину структурной прочности P_c дисперсных пород с коагуляционной структурой. При процентном соотношении коагуляционного (прочность единичного контакта $P_1=10^{-9}$ Н) и переходного ($P_1=10^{-7}$ Н) типа контактов равно, соответственно 99,6 % и 0,4 % (для частиц диаметром 0,001 мм, пористость 40 %), величина структурной прочности составляет 0,003 МПа. При этом доля переходных контактов в формировании структурной прочности равна 28,6 %. При увеличении содержания переходных контактов до 5 % величина структурной прочности достигает 0,013 МПа, а их доля в формировании P_c - 84 %.

Предел текучести в отложениях, структурная прочность которых определяется переходным типом контактов, обусловлен в основном сухим трением. При этом течение пород на склонах практически не наблюдается.

В льдистой зоне, где шпильки льда располагаются часто, а минеральные прослои не сильно обезвожены, в последних формируются коагуляционные минеральные контакты. При оттаивании в условиях избыточного обводнения, на фоне некоторой "рыхлости" сложения породы, минеральные прослои быстро разупрочняются. Взаимная фиксация микро- и макроагрегатов и отдельных крупных частиц идет в основном за счет второго потенциального минимума. Значения основных показателей приведены таблице 3.

Таблица 3

ρ_d , кг/м ³	a , МПа ⁻¹	E_0 , МПа	φ , °	C , МПа	η , Па·с	Тип контакта
700 - 1000	1 - 2,5	0,8 - 1,0	-	-	$<10^{10}$	дальний коагул.

Контактные взаимодействия между компонентами пород осуществляются по дальнему коагуляционному типу. Предел текучести имеет адегзионную природу и близок к 0. Течение пород можно условно отнести к вязкому.

Десерпционное смещение пород. Сезонное промерзание-оттаивание дисперсных пород на склонах приводит к развитию *криогенной десерпции*, поскольку их пучение протекает по нормали к поверхности склона, а осадка - по вертикали. Кроме того, экспериментальные исследования показали, что дифференциальное пучение некоторого слоя оттаивающих пород, расположенного ниже границы раздела фаз, и последующее вытравивание образовавшихся прослоев льда, приводят к развитию *криогенной десерпции за счет летнего пучения пород*.

Определенный вклад в смещение пород на склонах вносит гидрогенная десерпция, развивающаяся в результате протекания процессов набухания и усадки. Главную роль в формировании величины смещения за счет гидрогенной десерпции играют контакты переходного типа, которые образуются, с одной стороны, при обезвоживании и дегидратации солифлюкционных отложений в междождевой период (собственно *гидрогенная десертция*), с другой - в результате протекания физико-химической усадки пород при их промерзании (*гидрогенная десертция за счет криогенного обезвоживания*).

В целом вклад криогенной и гидрогенной десерпций в общую величину криосолифлюкции может быть не только равным величине течения, но и превалировать над ней при определенных геолого-геоморфологических условиях.

Динамика солифлюкции. При проведении полевых стационарных исследований установлена взаимосвязь криогенного структуро- и текстурообразования, структурно-прочностного строения пород сезонноталого слоя при их оттаивании и динамики криосолифлюкции. Для подтверждения обратимся к результатам наблюдений на одном из участков Северного Забайкалья.

Криогенное строение сезонноталого слоя на участке (уч. Салликиит) однообразно. Глубина оттаивания (ξ_{\max}) составляет 1,10-1,30 м. Приповерхностный слой (30-33 % от ξ_{\max}) имеет частослоистую, микрошлировую криогенную текстуру. Величина объемной влажности ($W_{\text{об}}$) составляет 0,45-0,55, а плотность сухой породы (ρ_d) 1250 кг/м³ и менее. Коэффициент пористости (e_0) больше единицы (1,15-1,30). Степень заполнения пор влагой (G) равна 0,86-0,90. Модуль общей деформации (E_0) составляет 3,5-4,0 МПа. Ниже, в слое мощностью 0,4-0,5 м, наблюдается смена слоистой криогенной текстуры на массивную. При этом ρ_d возрастает до 1600 кг/м³. Величина e_0 снижается с 0,8-0,9 до 0,75. При чем G практически не меняется. Величина E_0 составляет 8,0-9,5 МПа. Однако в целом контактные взаимодействия между компонентами пород до глубины 0,75-0,85 м осуществляются по типу ближнего коагуляционного контакта. Поэтому породы можно отнести к одному структурно-прочностному слою (№1). Его мощность в среднем составляет 62-67% от ξ_{\max} .

Ниже интенсивно обезвоженная зона с массивной криогенной текстурой мощностью 20-25 % от ξ_{\max} . Порода практически сухая. При этом ρ_d равна 1680-1750 кг/м³, а $W_{\text{ос}}$ 0,25-0,2. Величина e_0 снижается до 0,5, при G 0,6-0,7. Величина E_0 составляет 20-30 МПа. Таким образом, структурная прочность пород при их оттаивании определяется контактами переходного типа. Поэтому можно выделить II структурно-прочностной слой.

В приподошвенной части сезонноталого слоя (10-15 % от ξ_{\max}) наблюдается преимущественно толстошлировая криогенная текстура. Величина ρ_d составляет 1200-1300 кг/м³. При этом e_0 равен 1,10-1,20, при G 0,95. Величина E_0 составляет 3,2-3,6 МПа. Изложенное позволяет выделить III структурно-прочностной слой с ближним коагуляционным типом взаимодействия между компонентами пород.

При оттаивании I структурно-прочностного слоя развиваются вязкопластическое течение пород и криогенная десерпция (крутизна склона на участке 3-8^н). При этом величина $I_{\text{кд}}$ достигает 80 % от максимальной, что обусловлено значительной мощностью льдистого слоя (до 0,5 м). Интенсивность течения пород зависит от поступления талых и дождевых вод.

При оттаивании II структурно-прочностного слоя наблюдается развитие только $I_{\text{гд}}^{\text{к}}$. Интенсивность криосолифлюкции в I структурно-прочностном слое снижается в 3-5 раз, что связано с прекращением развития криогенной десерпции и повышением структурной прочности пород. Распределение влажности и плотности пород достаточно равномерное по всему слою. При этом величина e_0 в приповерхностном слое уменьшается в 1,6-1,9 раза и составляет 0,70-0,80. Близкие значения имеет и G . Величина E_0 по всей мощности I структурно-прочностного слоя равна 7,0-9,0 МПа.

При оттаивании III структурно-прочностного слоя развиваются вязкопластическое течение пород и криогенная десерпция. Течению пород способствует влага поступающая от выше лежащих слоев и таяния шлиров льда. Поэтому величина $W_{\text{ос}}$ относительно постоянна и составляет 0,4-0,45, а ρ_d 1,3-1,35 г/см³. Величина e_0 равна 0,95-1,0, при G 0,85-0,90. Вклад течения пород данного слоя в интегральную величину криосолифлюкции за рассматриваемый период составляет 80-90 %. Величина криогенной десерпции равна 15-20 % от максимальной.

Слой II продолжает набухать; продолжительность этого процесса зависит от степени обезвоживания пород и мощности слоя. В среднем разупрочнение занимает 30-50 суток. Течения пород I структурно-прочностного слоя практически не наблюдается.

Максимальная величина летнего пучения на участке наблюдалась в интервале глубин 0,8-1,0 м и составила 2,3 см. Доля криогенной десерпции за счет летнего пучения в интегральной величине смещения достигала 17 %. Величина гидрогенной десерпции незначительна. Ее вклад в интегральную величину криосолифлюкции не превысил 5 %.

Глава V. Особенности криосолифлюкции. В главе приведены осо-

бенности развития криосолифлюкции в породах различного состава, строения и свойств, при различных условиях теплообмена на поверхности и техногенном воздействии, а также способ защиты инженерных сооружений от деформаций, вызванных криосолифлюкционным смещением и методика количественной оценки процесса.

Особенности криосолифлюкции пород различного состава, строения и свойств. Проведенные исследования показали, что величина криосолифлюкции в тонкозернистом пылеватом песке составляет 0,3-0,5 см. Смещение пород развивается только за счет криогенной десерпции. Основную роль в развитии криосолифлюкции пылеватой супеси играет вязкопластическое течение. Ее величина равна 1,4-2,0 см, что составляет 56-65 % от интегральной величины смещения. Вклад криогенной десерпции меньше примерно в 2 раза и равен 31-36 %. Определенную роль начинает играть летняя криогенная десерпция, на долю которой приходится 4-8 %. Величина криосолифлюкции в легком пылеватом суглинке составляет 2,8-3,5 см. Смещение характеризуется развитием всех составляющих факторов, при этом роль течения и десерпционного смещения пород в интегральной величине криосолифлюкции примерно равны. Величина вязкопластического течения в легком пылеватом суглинке практически не изменилась по сравнению с пылеватой супесью и составляет 1,3-2,0 см. Величина криогенной десерпции снизилась в среднем на 13-25 %. Некоторый прирост интегральной величины криосолифлюкции связан с развитием криогенной десерпции за счет летнего пучения, гидрогенной десерпции и гидрогенной десерпции за счет криогенного обезвоживания.

Изучение влияния плотности пород на развитие криосолифлюкции проводилось на склоне, сложенном пылеватой супесью. В результате наблюдений установлено, что с уменьшением ρ_d скорость вязкопластического течения возрастает по параболической зависимости и этот рост тем интенсивнее, чем больше крутизна склона. Так, например, при угле наклона (α) 3^0 уравнение связи имеет вид $\vartheta = 13,42 + 16,44\rho_d + 5,02\rho_d^2$ (для значений ρ_d 1300-1700 кг/м³), а при $\alpha = 8^0$ — $\vartheta = 14,44 + 16,67\rho_d + 4,79\rho_d^2$ (рис.2). Во всех случаях коэффициент корреляции составляет 0,67-0,83 (при вероятности 0,68), а погрешность аппроксимации не превышает 0,19.

Исследования особенностей криосолифлюкции пород при различных условиях теплообмена проводились на площадках с естественными и искусственными условиями теплообмена на поверхности пород.

На площадке с естественными условиями теплообмена формируется трехслойное криогенное строение. При оттаивании в льдистых слоях контактное взаимодействие между компонентами осуществляется по типу ближнего коагуляционного контакта. Интенсивно развивается криосолифлюкция за счет течения пород и криогенной десерпции. Структурную прочность обезвоженного слоя определяют контакты переходного типа. Его разупрочнение происходит в течение 30-50 суток. Криосолифлюкция развивается путем гидрогенной десерпции за счет криогенного обезвоживания.

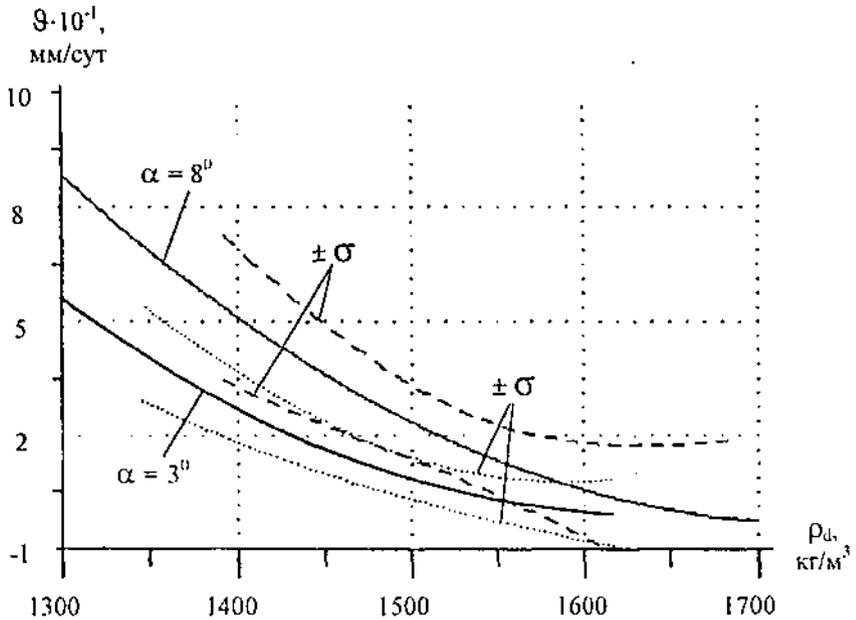


Рис. 2. Зависимость скорости вязкопластического течения пород (G) от их плотности (ρ_d)

Величина вязкопластического течения на площадке составила 2,6 см, а криогенной десерпции 0,9 см. При этом вклад верхнего льдистого слоя в интегральную величину криосолифлюкции равен 77 %, а нижнего – 23 %. Обезвоженный слой пассивно смешался на ниже лежащем и собственного вклада в развитии криосолифлюкции не внес.

На площадке с искусственным теплоизоляционным слоем из мха мощностью 0,5 м формируется преимущественно толстошлировая, более равномерно, по сравнению с естественными условиями, распределенная по глубине промерзающего слоя криогенная текстура. Мощность шлиров льда составляет 1 см и более. Мощность обезвоженных минеральных прослоев достигает 10 см. При оттаивании их структурная прочность определяется контактами переходного типа. Однако гидратация влаги, образующейся при вытаивании шлиров и линз льда, приводит к относительно быстрой трансформации (7-10 суток) переходных контактов в коагуляционные. Величина криосолифлюкции пород на рассматриваемой площадке составила 1,8 см. В данном случае величина криогенной десерпции достигает 38 % от интегральной величины смещения.

При быстром промерзании пород, когда скорость движения границы раздела фаз намного больше скорости миграционного потока влаги, происходит лишь поровое льдовыделение. Поэтому таких процессов как коагуляция,

агрегация, обезвоживание, усадка, набухание и др. не происходит. В результате гидрогенная десерпция за счет криогенного обезвоживания не наблюдается. Величина криогенной десерпции незначительна. Течение пород развивается только после их дополнительного обводнения (талые или дождевые воды).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что условия теплообмена на поверхности пород влияют на развитие: вязкого и вязкопластического течения, определяя структурно-прочностное строение пород сезонного слоя при их оттаивании; криогенной десерпции, определяя интегральную и дифференциальную величину деформаций пучения пород; гидрогенной десерпции, определяя величину деформаций усадки пород за счет обезвоживания минеральных прослоев и зон в результате процессов миграции влаги.

Проведенные исследования позволили предложить способ защиты инженерных сооружений от деформаций, вызванных развитием криосолифлюкции. Способ включает нарезку прорезей в грунте (нормально к поверхности склона) и заполнение их бентонитовой глиной. Идея заключается в том, что в период промерзания формируется разница по абсолютной величине термодинамического потенциала грунтовой влаги, существующего в бентоните и в солифлюкционных отложениях, достигающая 10 и более раз. Это приводит к изменению направления миграционного потока влаги в сторону бентонитового экрана, обезвоживанию и уплотнению солифлюкционных отложений, структурная прочность которых повышается на 1-3 порядка. Смещения пород в таких случаях практически не наблюдается. Устойчивая работа инженерного сооружения сохраняется на весь период эксплуатации.

Методика количественной оценки величины криосолифлюкции. Расчетные оценки величины вязкого и вязкопластического течения пород подробно изложены в работах А.С. Девдариани, Л.А. Жигарева, В.А. Кудрявцева, В.С. Петрова, В.С. Савельева и др. авторов. В диссертации приводится количественная оценка величин составляющих факторов криосолифлюкции в соответствии с обоснованным нами механизмом процесса. Расхождение результатов расчетов с экспериментальными данными не превышает 10 %.

Величина криогенной десерпции пород за счет их зимнего пучения определяется из выражения:

$$I_{кв}^i = \left(\sum_{i=1}^n \left((0,09 \cdot \rho_d^i / \rho_a \cdot (W_{\xi}^i - W_{из}^i) \cdot \xi_{пп}^i + 1,09 \cdot K_{ан}^i \cdot K_w^i \cdot \delta_i^{f,i} \cdot grad^i \cdot \xi_{пп}^i / \vartheta_{пп}^i - \beta^i \cdot K_{yc}^i \cdot \rho_d^i / \rho_v \cdot (W_{нчч}^i - W_{нч}^i) \cdot \xi_{yc}^i \right) + \sum_{i=1}^n (0,09 \cdot \rho_d^i / \rho_v \cdot (W_{\xi}^i - W_{нч}^i) \cdot \xi_{пп}^i + 1,09 \cdot K_{ан}^i \cdot K_w^i \cdot \delta_i^{f,i} \cdot grad^i \cdot \xi_{пп}^i / \vartheta_{пп}^i + a^i \cdot P^i \cdot \xi_{к}^i + \beta^i \cdot \rho_d^i / \rho_v \cdot (W_{нчч}^i - W_{нч}^i) \cdot \xi_{yc}^i - \beta^i \cdot \rho_d^i / \rho_a \cdot (W_{к}^i - W_{ам}^i) \cdot \xi_{ам}^i - \beta^i \cdot \rho_d^i / \rho_a \cdot (W_{к}^i - W_{нчч}^i) \cdot \xi_{ппчччч}^i + 1,09 \cdot J_w^{tem} \cdot \xi_{ом}^i / \vartheta_{ом}^i \right) \cdot tg \alpha / 2, \quad (2)$$

где W_{ξ}^i , $W_{ик}^i$, $W_{нач}^i$, $W_{ны}^i$, $W_{ми}^i$ - соответственно значение влажности: на границе раздела фаз в период промерзания пород, количество незамерзшей воды естественная влажность пород (предзимняя), влажность предела усадки влажность минерального прослоя; $\xi_{зир}$, $\xi_{ус}$, $\xi_{ми}$, $\xi_{приповерх}$, $\xi_{от}$, ξ_k соответственно глубина сезонного промерзания (оттаивания) пород, мощность обезвоженного слоя пород ниже раздела фаз, мощность набухающих минеральных прослоек, мощность приповерхностного набухающего слоя, мощность дифференцированного оттаивающего слоя ниже границы раздела фаз, мощность зоны компрессионного уплотнения; $K_{ан}$ - коэффициент анизотропии набухания; K_w - коэффициент диффузии влаги; δ_i^h - термоградиентный коэффициент; t - температура; $\vartheta_{зир}$, $\vartheta_{отт}$ - соответственно скорости промерзания и оттаивания пород; β - коэффициент объемной усадки; α - коэффициент сжимаемости; P - компрессионное давление; ρ_d , ρ_a - соответственно значение плотности сухой породы и воды; $J_w^{зем}$ - плотность миграционного потока влаги; α - угол наклона склона.

Величина криогенной десерпции пород за счет их летнего пучения определяется из выражения:

$$I_{кв}^y = \left(\sum_{i=1}^n \left(1,09 \cdot J_w^{зем,i} \cdot \xi_{от}^i / \vartheta_{от}^i + h_{ос}^i \right) \right) \cdot t g \alpha / 2, \quad (3)$$

где $h_{ос}$ - осадка за счет вытравливания сегрегационных прослоев льда. Плотность миграционного потока влаги определяется по методу влажности: эпюр Л.В.Чистотинова.

Величина гидрогенной десерпции определяется из выражения:

$$I_{гв}^y = \left(\sum_{i=1}^n \beta^i \cdot \rho_d^i / \rho_a \cdot (W_{ик}^i - W_{нач}^i) \cdot \xi_{приповерх}^i + (1 - \rho_d^{ном,i} / \rho_d^{к,i}) \cdot \xi_{ус}^i \right) \cdot t g \alpha / 2, \quad (4)$$

Величина гидрогенной десерпции пород за счет их криогенного обезвоживания определяется из выражения:

$$I_{гв}^k = \left(\sum_{i=1}^n \beta^i \cdot \rho_d^i / \rho_a \cdot (W_{ик}^i - W_{ми}^i) \cdot \xi_{ми}^i + \beta^i \cdot \rho_d^i / \rho_a \cdot (W_{нач}^i - W_{ны}^i) \cdot \xi_{ус}^i \right) \cdot t g \alpha / 2, \quad (5)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации дано решение актуальной научной задачи установления механизма, динамики и особенностей развития криосолифлюкции с единых позиций теории контактных взаимодействий в породах. Решение этой задачи имеет важное значение для управления процессом и разработки способов защиты инженерных сооружений, расположенных на склонах в области многолетнемерзлых пород и глубокого сезонного промерзания, от деформаций вызванных развитием криосолифлюкции пород.

Основные результаты проведенных исследований, выполненных в рамках задач, поставленных в данной работе сводятся к следующему.

1. Разработана методика комплексных стационарных исследований, в которой впервые применено устройство для измерения солифлюкции (УИС), отличающееся широкими функциональными возможностями и надежностью измерений; широко используются методы количественной характеристики физических и физико-механических свойств пород для оценки влияния криогенного структуро- и текстурообразования на развитие процесса.

2. При изучении механизма криосолифлюкции установлено, что контактные взаимодействия между компонентами солифлюкционных отложений осуществляются в основном по трем схемам, соответствующим дальнему коагуляционному, ближнему коагуляционному и переходному типам контактов. Если структурная прочность отложений определяется дальними коагуляционными или ближними коагуляционными контактами, то развивается соответственно вязкое или вязкопластическое течение пород на склонах. При определяющей роли переходного типа контактов течения пород не происходит. При цикле преобразований переходный-коагуляционный контакты, в результате обезвоживания-обводнения грунтовой системы, наблюдается развитие гидрогенной десерпции. В случае, когда при оттаивании сезоноталого слоя формируются коагуляционные контакты, наблюдается сочетание течения пород и криогенной десерпции. Последняя может быть вызвана пучением как промерзающих, так и оттаивающих пород. Если при оттаивании формируются переходные контакты, то развивается только гидрогенная десерпция за счет криогенного обезвоживания.

3. Выявлена динамика криосолифлюкции с количественной оценкой вклада составляющих факторов в зависимости от криогенного строения пород сезоноталого слоя. При оттаивании верхнего льдистого слоя наблюдается развитие криогенной десерпции и вязкопластического течения пород. Величина криогенной десерпции при трехслойном криогенном строении достигает 80 %, а при двухслойном 100 % от максимальной. Интенсивность развития вязкопластического течения зависит от внешних источников обводнения и, в целом, носит затухающий характер. В обезвоженном при промерзании слое развивается $I_{гд}^k$. Проявление вязкопластического течения пород возможно только после определенного периода разупрочнения, величина которого составляет в среднем 30-50 суток. При оттаивании приподошвенного льдистого слоя величина криогенной десерпции равна 15-20 % от максимальной. Величина вязкопластического течения составляет 30-100 % от ее величины за год.

4. Изучены особенности развития криосолифлюкции в зависимости от состава, строения и свойств пород, условий теплообмена на поверхности:

– в тонкозернистом пылеватом песке криосолифлюкция развивается путем криогенной десерпции и имеет минимальные значения (0,3-0,5 см); величина вязкопластического течения при переходе от легкой пылевой супеси к легкому пылеватому суглинку практически не изменяется и составляет 1,3-

2,0 см, вклад десерпционного смещения в интегральную величину криосолифлюкции возрастает на 8-12 %;

- установлены количественные зависимости скорости вязкопластического течения пород от их плотности при различных углах наклона склона;

- в зависимости от условий теплообмена на поверхности формируется определенный режим промерзания пород с соответствующим ему структурно-прочностным строением сезонноталого слоя; структурно-прочностные слои характеризуются определенной схемой контактного взаимодействия между компонентами пород, поэтому криосолифлюкция по глубине сезонноталого слоя развивается за счет различных составляющих ее факторов и имеет различную величину.

5. Управление криосолифлюкцией наиболее целесообразно и экономически эффективно проводить, изменяя условия формирования структурной прочности пород как в результате криогенного структуро- и текстурообразования, так и при протекании различных физико-химических процессов в талых породах.

6. Предложен способ защиты инженерных сооружений от деформаций, вызванных криосолифлюкцией, который заключается в нарезке по определенной схеме прорезей в грунте и заполнении их обезвоживающим материалом; в результате повышается структурная прочность солифлюкционных отложений, что обеспечивает устойчивую работу инженерных сооружений на весь период эксплуатации (Патент N2135696).

7. Усовершенствована методика количественной оценки величины составляющих факторов криосолифлюкции в соответствии с обоснованным нами механизмом процесса.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Проблемы изучения криосолифлюкции на современном этапе развития геокриологии. - Чита, 1995. - 13 с. Деп. в ВИНТИ 24.08.1995, N 2504-B25.
2. Природа смещения дисперсных пород на склонах //Материалы Первой конференции геокриологов России. - М.: Изд-во МГУ, 1996. - С. 53-61. Соавторы В.С.Петров, М.А.Петрова.
3. Прогноз и управление смещением пород на солифлюкционных склонах //Горный журнал, 1996. - № 9-10. - С. 12-15. Соавторы В.С.Петров, М.А.Петрова.
4. Механизм и динамика смещения дисперсных пород на склонах //Вест. Чит. организации н.-т. общ. строителей. Сб. науч. статей.- Чита, 1997. - Вып. I. - С. 101-105. Соавтор В.С.Петров.
5. Особенности развития смещения в зависимости от формирования структурной прочности промерзающих пород //Вест. Чит. государственного технического университета. Сб. науч. статей. - Чита.: ЧитГТУ, 1997. - Вып. 5. - С. 52-61.

6. Роль структурных связей в развитии вязкопластических деформаций грунтов на склонах // Вест. Чит. организации н.-т. общ. строителей. Сб. науч. статей. - Чита, 1998. - Вып.2. - С. 73-81. Соавтор В.С.Петров.

7. Лабораторный метод исследований деформаций смещения пород на склонах // Вест. Чит. организации н.-т. общ. строителей. Сб. науч. статей. - Чита, 1998. - Вып.2. - С. 81-87. Соавторы В.С.Петров, М.К.Бутин.

8. Особенности развития криосолифлюкции: Тез. докл. Первой научно-технической конференции, посвященной открытию Горного института. Часть 2. - Чита, ЧитГТУ, 1998. - С. 46.

9. Инженерно-геокриологические условия участка деформирования на 4-км подъездной дороге к с. Песчанка: Тез. докл. Второй научно-технической конференции, посвященной 25-летию Горного института (факультета). Часть 1. - Чита, ЧитГТУ, 1999. - С. 109 - 112. Соавторы В.С.Петров, Л.А.Васютнич, М.К.Бутин.

10. Патент, МПК6 6 Е 02 D 27/35. Способ защиты фундамента от деформаций пучения промерзающих пород. - Заявл. 26.04.1996, N2105101. Соавторы В.С.Петров, В.А.Бабелло.

11. Патент, МПК6 6 Е 02 D 31/08, 17/20. Способ защиты инженерных сооружений от деформаций, вызванных криосолифлюкционным смещением пород. - Заявл. 22.01.98, N2135696. Соавторы В.С.Петров, В.А.Бабелло.



Подписано в печать 5.05.2000 г. Формат 60x90/16

Объем 1 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 50

Типография Читинского государственного технического университета
Чита, Александровская, 30