

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.34

**ПУЧЕНИЕ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ПОРОД
ЧИТИНО-ИНГОДИНСКОЙ ВПАДИНЫ В СВЯЗИ С ПОТЕПЛЕНИЕМ КЛИМАТА**

Д.М. Шестернев, Д.Д. Шестернев

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
672014, Чита, Недорезова, 16, Россия, lok@mail.gin.su*

На основе материалов многолетних полевых и лабораторных исследований рассмотрены динамика и закономерности пучения крупнообломочных пород в условиях деградации криолитозоны. Выявлена взаимосвязь изменения типов сезонного промерзания и оттаивания пород при потеплении климата с изменением их пучиноопасности. Обращено внимание и доказано, что пучиноопасность крупнообломочных пород может изменяться в широких пределах и в зависимости от условий промерзания эти породы могут быть чрезмерно пучиноопасными.

Многолетнемерзлые породы, крупнообломочные породы, пучение, пучиноопасность, потепление климата

**FROST HEAVING OF COARSE CLUSTIC ROCKS OF THE CHITINO-INGODINSKOI CAVITY
IN CONNECTION WITH CLIMATE WARMING**

D.M. Shesternev, D.D. Shesternev

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
672014, Chita, Nedorezova str., 16, Russia, lok@mail.gin.su*

According to the results of long-term field and laboratory researches, the dynamics and regularities of frost heaving of coarse clastic rocks in the conditions of the cryolithozone degradation have been reviewed. The correlation between the changes in types of seasonal freezing and thawing of rocks and the changes in their frost susceptibility at climate warming has been revealed. It has been proved that frost susceptibility of coarse clastic rocks can vary within a wide range of limits and can be excessively frost susceptible depending on freezing conditions.

Permafrost rocks, coarse clastic rocks, frost heaving, frost susceptibility, climate warming

ВВЕДЕНИЕ

Масштабные исследования динамики температурного поля криолитозоны, выполненные в последние десятилетия в рамках программ Российской академии наук под руководством академиков В.М. Котлякова, В.П. Мельникова и чл.-кор. В.Т. Балобаева, показали, что интенсивность деградации криолитозоны, отмеченная в последние десятилетия прошлого столетия, не снижается и в настоящее время. К аналогичным выводам пришли и ученые Европейской ассоциации мерзловедов под руководством Х. Хубертена и Международной ассоциации мерзловедов под руководством Д. Брауна. Однако эти результаты часто не используются в практичес-

кой деятельности. Так, в расчетных схемах при проектировании и строительстве зданий и сооружений в пределах криолитозоны не учитывается срок эксплуатации зданий различной категории ответственности соразмерно с особенностями воздействия глобального изменения климата на динамику температурно-влажностного режима пород. Оценка мощности глубин сезонного промерзания и оттаивания пород и их пучения производится, как правило, на основе теплотехнических расчетов. В структуре математических моделей для этих целей используются значения средней температуры воздуха для всего периода наблюдений на соответствующей

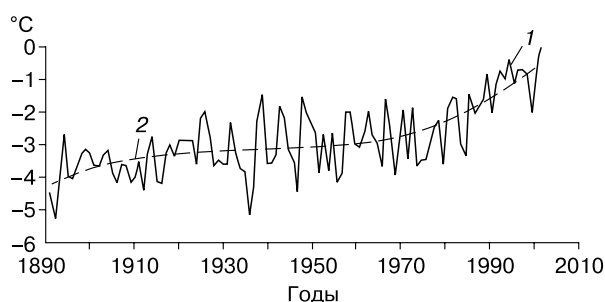


Рис. 1. Среднегодовые температуры воздуха (1) и кривая средних десятилетних скользящих значений (2) в Чите с 1891 по 2002 г.

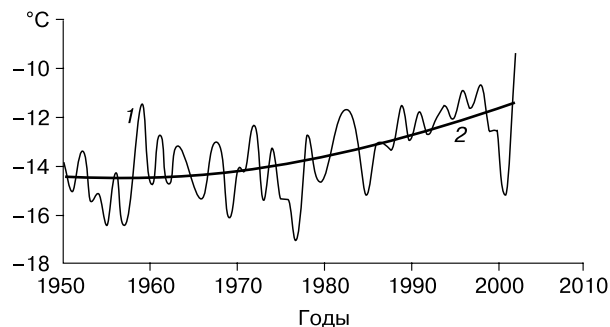


Рис. 2. Среднезимние температуры воздуха (1) и кривая средних десятилетних скользящих значений (2) в Чите с 1940 по 2002 г.

метеостанции, взятые из строительной климатологии [СНиП23-01-99, 2000]. Например, для строительства зданий с периодом эксплуатации 50 лет в Забайкалье для теплотехнических расчетов взято среднее значение температуры воздуха $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, полученное за 100 лет наблюдений. Однако, по данным метеостанции г. Читы, с середины до конца XX в. это значение составляет $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а за последние два десятилетия равно $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Повышение средней температуры воздуха отмечается и в настоящее время. Так, значение $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ впервые за последние 150 лет наблюдений было отмечено в 2000 и 2002 гг. (рис. 1). Эта же тенденция наблюдается и для изменения средней температуры воздуха в зимний период (рис. 2).

Повышение температуры воздуха и изменение других климатических параметров (начиная с 50-х гг. XX в.) на территории Южного и Центрального Забайкалья привели к сокращению мощности и площади распространения многолетнемерзлых пород (ММП). В период с 1950-х гг. и по настоящее время существенно увеличилась площадь распространения ММП несливающегося типа. Именно в эти годы отмечено развитие массовых деформаций зданий и сооружений, построенных по принципу I и II в Забайкалье. Несмотря на это, до сих пор практически отрицается воздействие глобального изменения климата на устойчивость зданий и сооружений. Принято считать, что 10 % зданий деформировались ввиду некачественно выполненных изысканий, 20 % в результате допущенных ошибок проектно-конструкторских решений, 27 % в связи с некачественным строительством и 43 % из-за неправильной их эксплуатации [Сальников, 1992, 1996].

Исследования динамики климата в Забайкалье, выполненные в последние десятилетия, наблюдения за развитием деформаций зданий, построенных по принципу I и II в Чите, и полученные параллельно результаты натурных экспериментальных исследований пучения сезоннопро-

мерзающих пород показали, что между ними существует определенная взаимосвязь. Например, в пределах Читино-Ингодинской впадины в результате деградации ММП и активизации процессов пучения пород (начиная с середины XX в.) количество малоэтажных зданий, построенных на вечной мерзлоте и нуждающихся в косметическом и капитальном ремонте, увеличивается, а многие из них находятся в аварийном состоянии [Демидюк, Шестернев, 1989].

Горно-складчатые области криолитозоны юга Сибири, к которым относится и территория Центрального Забайкалья, отличаются высокой сложностью геокриологических условий и широким распространением крупнообломочных пород, под которыми мы будем понимать породы, содержащие в своем объеме более 10 % крупнообломочных фракций (дресвы, щебня и глыб) [Шестернев, 1993]. До последних десятилетий было принято относить крупнообломочные породы (КОП) к классу непучинистых или слабопучинистых пород [Орлов и др., 1977]. В связи с этим работ, посвященных данной проблеме, сравнительно мало. В то же время нами установлено, что криогенное пучение КОП затрудняет эксплуатацию промышленных и гражданских сооружений [Шестернев, Шестернева, 1998].

Исследования пучения крупнообломочных пород в связи с потеплением климата выполнялись в соответствии с планом фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН по проекту "Исследование кинетики и механики криогенных процессов в горно-складчатых областях Юга криолитозоны России в условиях глобального изменения климата". Влияние потепления климата на геокриологические условия территории изучались в рамках интеграционных программ "Криогенные процессы и криолитозона полярных регионов суши и шельфа Арктических областей" и "Природные и антропогенные факторы динамики криогенных геосистем".

ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Проблема исследований криогенного пучения пород привлекает внимание ученых на протяжении столетия. К настоящему времени установлены количественные и качественные закономерности развития деформаций пучения пород различного состава, строения и свойств, предложены меры по предотвращению деформаций инженерных сооружений. Данные аспекты проблемы детально проанализированы в фундаментальной работе В.О. Орлова [1962] и в коллективной монографии под редакцией Э.Д. Ершова [Деформации..., 1985], что позволяет нам уделить основное внимание краткому анализу современного состояния проблемы преимущественно в региональном аспекте.

Изучению криогенного пучения пород в Забайкалье посвящено большое количество работ, выполненных главным образом во второй половине XX в. В результате установлено, что пучиноопасность промерзающих глинистых пылеватых и глинистых пылеватых заторфованных пород в центральной части Читино-Ингодинской впадины может изменяться от среднепучинистых до чрезмерно пучинистых, а модуль неравномерности пучения на небольших расстояниях колеблется от 0,59 до 6,08 [Орлов и др., 1987; Александров и др., 1990; Сальников, 1996; и др.]. В то же время в Забайкалье, как и в других регионах, изучению пучения КОП внимания практически не уделялось. В работах данного направления, как правило, рассматривались отдельные аспекты проблемы, предпринимались попытки по углублению теоретических и экспериментальных исследований влагопереноса, льдовыделения и пучения крупнообломочных пород [Фельдман, 1988; Шестернев, Верхотуров, 1993; Соколова, Орлов, 1993; Шестернев и др., 1998; Шестернев, 1988, 2001а,б, 2003].

В настоящее время опубликовано большое количество работ, где приведены математические модели для оценки пучения пород без учета содержания крупнообломочной составляющей [Золотарь, 1965; Пузаков, 1969; Леонович, Вырко, 1975]. Практика их использования показала, что все они отличаются хорошими сходимостями с экспериментальными данными для регионов, для которых разрабатывались. В случае распространения КОП ошибка при оценке пучения достигает 50 % и более [Шестернев, 2005а,б].

В данной работе представлены и проанализированы результаты комплексных исследований влияния потепления климата на изменение геокриологических условий и пучение крупнообломочных пород, выполненных в лабораторных и природных условиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ КРИОГЕННОГО ПУЧЕНИЯ ПОРОД

Изучение пучения пород ненарушенного сложения выполнялось в полевых условиях на стационарных площадках, оборудованных пучиномерными полигонами, в центре которых размещались дифференциальные пучиномерные установки. По результатам исследований определялись значения криогенного пучения h_p , вычислялись величина относительного пучения ϵ_p , коэффициенты неравномерности пучения K_f и интенсивности пучения по глубине f_p [Методические..., 1979; Шестернев, Шестернева, 1998; Шестернев, 2001а,б].

Стационарные площадки были оборудованы на I и II надпойменных террасах р. Ингоды, а также в пределах делювиально-солифлюкционных склонов горного обрамления Читино-Ингодинской впадины в Центральном Забайкалье. Ранее аналогичные исследования были выполнены на территории Ленского золоторудного комбината в Северном Забайкалье.

В связи с отсутствием аналогов отработка методики изучения пучения КОП в лабораторных условиях являлась одной из основных задач исследований. Конструкция крупногабаритного стенда выполнена с учетом опыта аналогичных исследований тонкодисперсных грунтов [Орлов, 1962; Ершов, 1979; Деформации..., 1985]. При этом учитывалась необходимость моделирования условий промерзания пород в "закрытой" и "открытой" системах [Shesternyov, 1997].

Для моделирования образцов пород нарушенного сложения использовались аллювиальные породы Читино-Ингодинской впадины. В качестве мелкодисперсных составляющих выбраны супесь и суглинки, крупнообломочной составляющей – гравийно-галечниковый материал, содержание которого изменялось от 10 до 70 % (табл. 1). Подготовленные объемные части мелко- и крупнодисперсных составляющих смешивались и уплотнялись до заданных значений плотности пород при заданной влажности. Высота образца породы нарушенного сложения равна 30 см, сторона квадратного сечения 10 см. Длительность опыта при температуре на поверхности образца –1, –3, –5 и –10 °С составляла 30, 20, 15 и 10 сут соответственно. При этих температурах образцы пород за указанные промежутки времени промерзали до 15–25 см, что было достаточным для завершения опытов.

Все известные расчетные методики оценки величины пучения пород разработаны для конкретных регионов, поэтому при их использовании в других районах требуется дополнительная проверка точности в сравнении с натурными данными, полученными для этих территорий. Такая ра-

Таблица 1. Гранулометрический состав, плотность и влажность образцов пород нарушенного сложения

Номер образца	Содержание (доли ед.) при диаметре частиц (мм)				r , г/см ³	$r_{ск}$ г/см ³	W_e доли ед.
	10–30	2,0–0,05	0,05–0,005	<0,005			
Супесь	–	0,82	0,11	0,07	1,70	1,42	0,20
1сп	0,12	0,72	0,10	0,06	1,77	1,50	0,18
2сп	0,34	0,53	0,08	0,05	1,90	1,67	0,14
3сп	0,50	0,40	0,06	0,04	2,03	1,85	0,10
4сп	0,62	0,31	0,04	0,03	2,12	1,96	0,08
5сп	0,75	0,20	0,03	0,02	2,19	2,07	0,06
Суглинок	–	0,58	0,24	0,18	1,56	1,20	0,30
1сг	0,11	0,51	0,22	0,16	1,64	1,29	0,27
2сг	0,32	0,38	0,17	0,13	1,81	1,50	0,21
3сг	0,47	0,32	0,12	0,09	1,98	1,72	0,15
4сг	0,60	0,23	0,10	0,07	2,06	1,84	0,12
5сг	0,73	0,15	0,07	0,05	2,17	1,97	0,09

Примечание. r – плотность пород с естественной влажностью; $r_{ск}$ – плотность скелета пород; W_e – весовая влажность образцов пород.

бота проведена нами для наиболее известных математических моделей оценки пучения пород, разработанных с учетом региональных особенностей природных условий (табл. 2). В результате нами в качестве базовой для соответствующей модификации была выбрана математическая модель Э.Д. Ершова и Ю.П. Лебедеко [1985]. Включив в ее структуру коэффициент, показывающий доленое содержание мелкозема ($k_{мдс}$), и произведя другие преобразования, мы получили зависимость для интегральной оценки пучения крупнообломочных пород:

$$h_p = \xi \left[0,03 k_{мдс} (W_{tot}^{мдс} - W_n^{мдс}) \right] + 1,03 k_{мдс} k_w \delta_t^\phi \text{grad}_L t \left(\frac{\xi}{V_{пр}} \right) \quad (1)$$

где ξ – глубина промерзания пород, см; $k_{мдс}$ – относительное содержание мелкодисперсной составляющей, доли ед.; $W_{tot}^{мдс}$, $W_n^{мдс}$ – суммарная влажность и количество незамерзшей воды мелкозема, доли ед.; k_w – коэффициент диффузии влаги; δ_t^ϕ – термоградиентный коэффициент, г/(см³·с); $\text{grad}_L t$ – градиент температур в зоне интенсивных фазовых переходов, °С/см; $V_{пр}$ – скорость промерзания грунтов, см/с¹.

Для оценки пучения крупнообломочных пород взяты значения водно-физических параметров, полученные в ходе инженерно-геологических изысканий.

Определение параметров k_w , $\text{grad}_L t$, ξ и $V_{пр}$ – процесс трудоемкий, требующий высокой квалификации исполнителей. Поэтому на основе

сформированных массивов экспериментальных данных В.А. Кудрявцева с соавт. [1973] и Э.Д. Ершова [1979] нами были найдены эмпирические зависимости для оценки термоградиентных коэффициентов и коэффициентов диффузии влаги в супесях и суглинках. Значения k_w и δ_t^ϕ для КОП вычислялись с учетом долевого содержания в них мелкодисперсной составляющей по следующим статистическим моделям:

$$k_w = [k_{мдс} \exp(A) \exp(B \ln W_{e.об}^{мдс})] \cdot 10^{-5} \quad (2)$$

$$\delta_t^\phi = k_{мдс} \exp(A) \exp(B \ln W_{н.об}^{мдс}), \quad (3)$$

где $W_{e.об}^{мдс} = W_t^{мдс} \rho_{ск}^{мдс}$, $W_{н.об}^{мдс} = W_n^{мдс} \rho_{ск}^{мдс}$ – объемная естественная влажность пород и объемная их влажность за счет незамерзшей воды; $\rho_{ск}^{мдс}$ – плотность скелета мелкодисперсной составляющей КОП;

Таблица 2. Оценка точности значений пучения пород, полученных расчетным и экспериментальным (в натуральных условиях) способами [Шестернев, 2005а]

ΣП	h_p	$h_э$	α , %	Источник
9	14,1	9,2	53	[Пузаков, 1969]
5	76,1		727	[Золотарь, 1965]
17	10,7		26	[Орлов, 1985]
16	11,8		28	[Ершов, Лебедеко, 1985]
16	12,6		40	[Петров, 1989]

Примечание. ΣП – количество параметров, входящих в математические модели; h_p , $h_э$ – расчетные и экспериментальные значения пучения пород, см; α – величина относительных ошибок, %.

Таблица 3. Значения коэффициентов аппроксимации (А, В) для оценки коэффициента диффузии ω и термоградиентного коэффициента δ_t^{ϕ} супесей и суглинков*

Наименование грунтов, по ГОСТ 25100-82	Формула (2), $R = 0,95$		Формула (3), $R = 0,97$	
	A	B	A	B
Супесь	–	–	11,07	5,35
Супесь легкая пылеватая	7,48	2,56	–	–
Супесь тяжелая пылеватая	12,45	8,70	–	–
Суглинок	–	–	7,53	4,58
Суглинок легкий пылеватый	16,90	13,96	–	–
Суглинок средний пылеватый	17,29	13,72	–	–
Суглинок тяжелый пылеватый	23,75	25,18	–	–

R – коэффициент корреляции.

A, B – коэффициенты аппроксимации (табл. 3). Значения коэффициентов корреляции, приведенные в табл. 3, получены при $k_{мдс} = 1$ в диапазонах изменения $W_{е.об}$ супесей от 0,12 до 0,36, суглинков – от 0,24 до 0,43 доли ед. (формула (2)) и в диапазонах изменения $W_{н.об}$ супесей от 0,03 до 0,10, суглинков – от 0,05 до 0,15 доли ед. (формула (3)).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Значения пучения дисперсных пород одного и того же гранулометрического состава, включая крупнообломочные, из года в год могут отличаться на значительную величину (табл. 4). Поэтому, чтобы использовать их в качестве расчетных значений, необходимо определить период, за который они должны быть получены. Представляется, что его длительность должна быть не менее короткопериодного цикла изменения основных климатических параметров, т. е. 3–5 лет.

Таблица 4. Изменение величин относительно пучения (ϵ_p , доли ед.) крупнообломочных отложений на стационарных площадках в Читино-Ингодинской впадине

Генезис отложений	Состав отложений	1982 г.	1983 г.	1984 г.	1993 г.	1994 г.	1995 г.
		$t_{cp} = -1,7 \text{ } ^\circ\text{C}$		$-3,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-0,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$
Делювиально-пролювиальные	Супеси с дресвой и щебнем	0,065	0,019	0,031	0,043	0,67	0,024
	Суглинки со щебнем и дресвой	0,078	0,044	0,046	0,025	0,073	0,017
Делювиально-солифлюкционные	Супеси со щебнем и дресвой	0,071	0,027	0,029	0,036	0,79	0,032
	Суглинки со щебнем	0,080	0,052	0,053	0,035	0,043	0,054
Озерно-аллювиальные	Супеси с гравием	0,137	0,110	0,091	0,054	0,123	0,057
	Суглинки с гравием	0,155	0,123	0,105	0,038	0,065	0,019
Аллювиальные	Песок пылеватый с галькой	0,030	0,010	0,016	0,010	0,008	0,005

Примечание. t_{cp} – среднегодовая температура воздуха, $^\circ\text{C}$; содержание крупнообломочных фракций изменяется от 10 до 30 %.

Устойчивое промерзание песчаных аллювиальных пород в Читино-Ингодинской впадине начинается обычно в середине октября, к концу декабря слой сезонного промерзания достигает 70–80 %, а завершается формирование сезонно-мерзлого слоя (СМС) пород в конце марта. В связи с различным темпом промерзания песчаных пород на кривой изменения h_p выделялось два участка (рис. 3). Первый характеризовался относительно высокой интенсивностью изменений криогенного пучения пород. В этот период влагонасыщение песчаных крупнообломочных пород вследствие близкого залегания уровня грунтовых вод (УГВ) было максимальным, следовательно, максимально и массивное распучивание песчаных пород. В конце декабря – начале января УГВ находился на глубинах 5–6 м, что существенно ниже подошвы х. Темп изменения пучения в этот период близок к нулевому (см. рис. 3, кривые 1а–3а).

Известно, что пучение промерзающих песчаных пород протекает преимущественно за счет их распучивания, вызванного увеличением объема влаги при переходе ее в твердое состояние. При этом принято считать, что диффузия воды в песчаных породах практически отсутствует, а термодиффузией можно пренебречь. Однако существуют экспериментальные данные, свидетельствующие о наличии достаточно интенсивного влагопереноса в песках, вызывающего развитие в них морозного пучения [Jahson, 1963; Чистотинов, 1973]. Причем Л.В. Чистотинов [1973] экспериментально показал, что это может происходить при изменении $V_{пр}$ от 3–4 до 6–8 см/сут.

По сравнению с песчаными крупнообломочные породы с песчаной составляющей являются более сложными системами. В них содержатся обломки пород, которые в силу своей высокой теплопроводности и много большей по отношению к сечению миграционных каналов площадью могут выступать одновременно экраном для переносимой влаги в мерзлых и промерзающих породах и

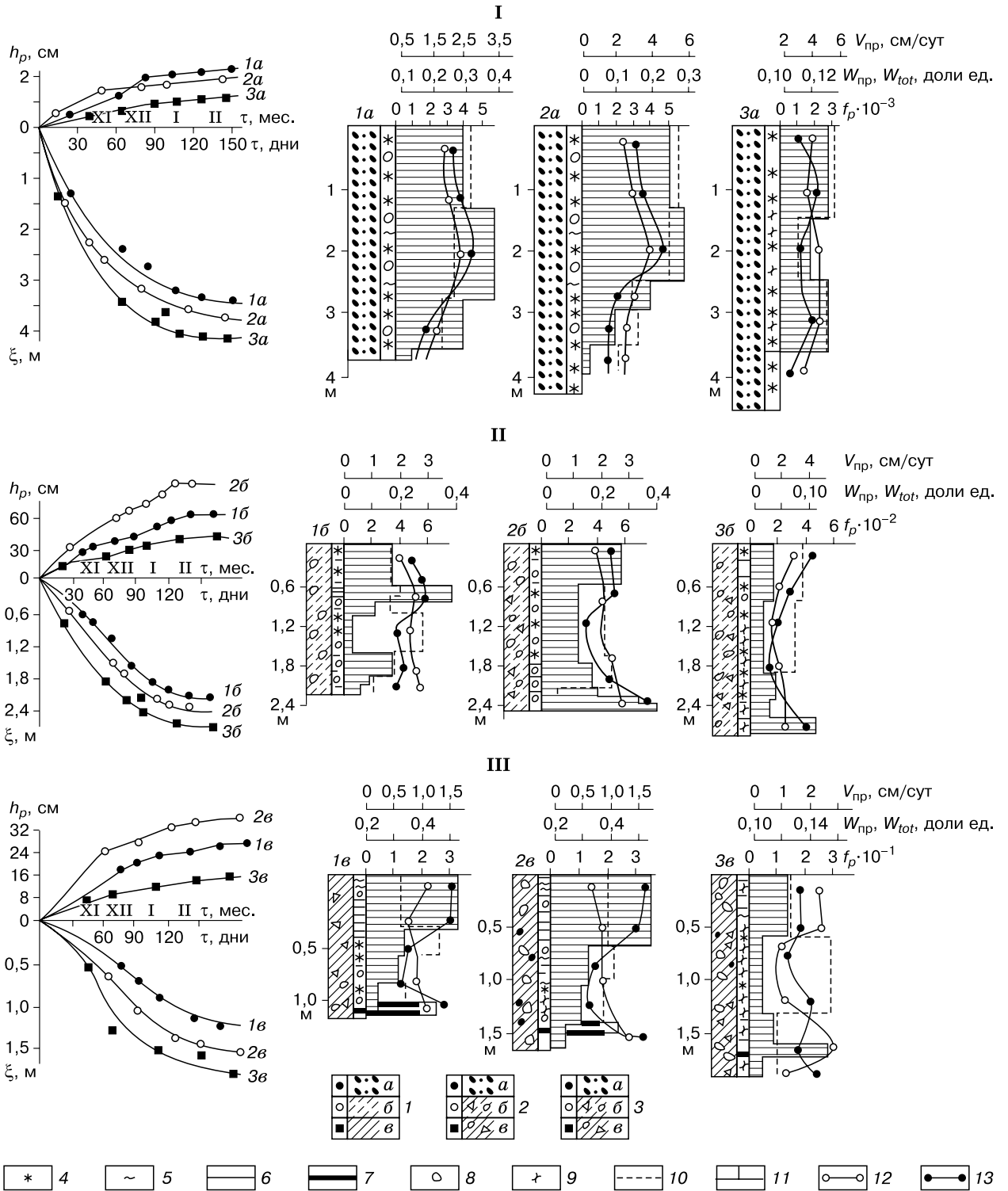


Рис. 3. Величина пучения (h_p) и глубина сезонного промерзания (ξ) массивов крупнообломочных отложений:

I – аллювиальные (галка, гравий с песчаным заполнителем); II, III – делювиально-солифлюкционные (дресва и щебень с супесчаным (II) и суглинистым (III) заполнителями); 1–3 – содержание крупнообломочных фракций, % (1 – 10, ..., 30; 2 – 30, ..., 50; 3 – 50, ..., 70); а–в – крупнообломочные породы с заполнителем (а – песчаным, б – супесчаным, в – суглинистым); 4–9 – криогенные текстуры (4 – массивные, 5 – линзовидные, 6 – слоистые среднешиповые, 7 – слоистые толстошиповые, 8 – корково-бесконтактные, 9 – корково-контактные); 10–13 – изменения по глубине разреза (10 – скорости промерзания пород $V_{пр}$, 11 – интенсивности пучения f_p , 12 – предзимней влажности $W_{пр}$, 13 – суммарной влажности W_{tot}).

опережающими центрами кристаллизации влаги. На данный момент мы не видим других причин, приводящих к образованию корковых криогенных текстур в КОП с суглинистым заполнителем, увеличивающих величину пучения. О наличии влагопереноса в песчаных, содержащих менее 50 % крупнообломочных фракций породах свидетельствует и то, что их суммарная влажность в конце W_{tot} зимы на 6–8 % превышает предзимнее значение $W_{пр}$.

Результаты экспериментальных исследований показали, что для крупнообломочных пород разного состава величина и характер изменения f_p с глубиной различаются. Так, в промерзающих песчаных КОП при содержании $k_v \leq 50\%$ (см. рис. 3, кривая 1а) наблюдалось постепенное увеличение f_p до глубины 1,5–2,5 м. С этих глубин и до подошвы x значения снижались практически до нуля. При содержании $k_v > 50\%$ в КОП с песчаным заполнителем отмечался уже ритмообразный характер изменений f_p при постепенном уменьшении значений с глубиной. По-видимому, это обусловлено предзимним распределением влажности пород, особенностями влагопереноса в связи с различием теплопроводных свойств песчаной и крупнообломочной составляющих пород, динамикой залегания глубины УГВ. Следует отметить, что на величину f_p и h_p могла оказывать влияние скорость промерзания пород $V_{пр}$, диапазон изменения которой до глубины 2,0–2,5 м колебался от 3,0 до 5,0 см/сут. Согласно работе [Чистотинов, 1973], при указанных значениях $V_{пр}$ формируются оптимальные условия влагопереноса во влагонасыщенных песчаных породах.

О характере изменений f_p крупнообломочных пород с песчаным заполнителем можно судить и по их криогенному строению. В породах с массивными криогенными текстурами значения f_p невысокие, с корково-массивными криогенными текстурами они существенно выше.

Предзимняя влажность супесей с дресвой и щебнем ($k_v = 10–30\%$), супесей дресвяно-щебнистой ($k_v = 30–50\%$) и дресвяно-щебнистой супеси ($k_v = 50–70\%$) при увеличении содержания крупнообломочных фракций от 10 до 70 % (см. рис. 3, II) уменьшалась от 0,27 до 0,10 доли ед. (при изменении влажности супеси от 0,32 до 0,40 доли ед.). Влагозаполнение пор пород первых двух типов пород перед промерзанием менее 1, а третьего – более 1. Здесь, как и в случае с КОП с песчаной составляющей, в формировании значений h_p и f_p гранулометрический состав и величины $W_{пр}$, $V_{пр}$ явились решающими факторами (при прочих равных условиях). Экспериментальные исследования показали также, что при $k_v < 50\%$ гранулометрический состав пород может оказывать на h_p меньшее влияние в сравнении с влияни-

ем $V_{пр}$. Так, при промерзании супесей с дресвой и щебнем ($k_v = 14,4\%$) значения h_p ниже, чем h_p супесей дресвяно-щебнистых ($k_v = 39,3\%$). Объясняется это тем, что значения $V_{пр}$ пород второго типа, согласно работе [Фельдман, 1988], близки к оптимальным для развития h_p и колеблются от 1,7 до 2,2 см/сут. В то же время диапазон изменений $V_{пр}$ пород первого типа шире и составляет 1,5–3,0 см/сут, выходя за пределы оптимальных значений для развития пучения.

Рассматривая кривые изменения пучения КОП с супесчаным заполнителем во времени (см. рис. 3, кривые 1б–3б), можно выделить на них три однотипных участка. С конца сентября до конца октября идет достаточно медленный, но прогрессирующий подъем поверхности пород и кривая h_p имеет вогнутый вид – первый участок. С ноября по март темп изменений, оставаясь относительно высоким, снижается, а кривая h_p приобретает выпуклый вид – второй участок. В этот период могут отмечаться относительно небольшие периоды, где темп изменений h_p то увеличивается, то замедляется. Средняя скорость пучения на этих двух участках составляла для супеси с дресвой и щебнем – 0,05 см/сут, супесей дресвяно-щебнистых – 0,07 см/сут; дресвяно-щебнистых с супесью – 0,03 см/сут. Третий участок характерен для февраля–марта, завершающей стадии промерзания сезонноталого слоя (СТС) пород. В это время может иметь место незначительное увеличение или уменьшение h_p , что, по-видимому, связано с перестройкой криогенного строения и структуры пород, находящихся уже в мерзлом состоянии [Ершов, 1979].

Изменение криогенного строения и интенсивности пучения по глубине в КОП с супесчаным заполнителем, промерзающих сверху и снизу, имело примерно одинаковый характер. В верхней части разреза СТС преобладали массивно-линзовидные, слоистые, линзовидно – и слоисто-корковые криогенные текстуры. Здесь величина f_p была относительно высокой, однако ее значения уменьшались по мере увеличения содержания крупнообломочных фракций. В нижней части массивов пород при промерзании менее влагонасыщенных супесей с дресвой и щебнем ($k_v = 14,4\%$) значения f_p меньше, чем для пород с промерзающими более влагонасыщенными супесями с дресвой и щебнем ($k_v = 39,3\%$) и дресвяно-щебнистой супесью ($k_v = 70,0\%$). В породах первого типа преобладали линзовидные и корковые криогенные текстуры, второго – слоистые и корковые, третьего – корковые и линзовидные. Наблюдались здесь и ледяные включения сложной конфигурации с включением мелкодисперсных частиц, что позволяет сделать предположение о развитии в этой части промерзающего СТС льдообразования инъекционного типа.

Таким образом, при промерзании СТС пород сверху и снизу в разрезе формируются три слоя с различными типами криогенных текстур, что и предопределяет характер изменения f_p по глубине. Кроме того, значения f_p при прочих равных условиях уменьшались при увеличении в КОП содержания крупнообломочных частиц. Следует отметить также, что в нижней части разреза СТС, сложенных крупнообломочными породами с супесчаным заполнителем, возможно формирование ледяных включений не только миграционно-сегрегационного, но и инъекционного типов. При увеличении содержания в породах крупнообломочных фракций вероятность этого растёт.

Крупнообломочные породы с суглинистым заполнителем получили широкое распространение в делювиально-солифлюкционных отложениях. Известно, что наиболее пучиноопасными породами являются тяжелые пылеватые супеси, легкие и средние суглинки с большим содержанием пылеватых частиц [Орлов, 1962]. И в нашем случае пучиноопасность исследуемых КОП с мелкодисперсной составляющей данных типов была наиболее высокой. Пучение массива промерзающего СТС мощностью до 2,0–3,0 м (сложенного крупнообломочными породами) колебалось от 36,5 см ($k_v = 18,3\%$) до 13,9 см ($k_v = 69,8\%$).

Промерзание КОП с суглинистым заполнителем, как и с супесчаным, происходило сверху и снизу. Это нашло отражение в формировании криогенного строения с тремя четко выраженными горизонтами (см. рис. 3, III). В верхнем слое (наибольшей мощности) преобладали линзовидно- и слоисто-корковые криогенные текстуры, в нижнем – слоисто-корковые, кроме того, здесь отмечались один-два прослоя льда мощностью 2–3 см. Происхождение последних при скорости промерзания менее 1,0 см/сут можно объяснить только наличием условий для развития вакуумно-миграционного влагопереноса и льдовыделения [Фельдман, 1988]. В нижней части разреза встречались также ледяные включения сложной конфигурации с наличием мелкодисперсных агрегатов, что, вероятно, свидетельствует об их инъекционном генезисе. Эти же части разреза СТС пород характеризовались и наиболее высокими значениями f_p . В средней части СТС пород преобладали корково-линзовидные и корково-массивные криогенные текстуры при существенно меньших значениях влажности в сравнении с верхними и нижними частями СТС. В соответствии с этим значения f_p здесь были минимальными.

Таким образом, из результатов исследований следует, что:

а) наиболее высокой пучиноопасностью отличается период, в течение которого промерзает 60–70 % мощности СТС массива КОП;

б) пучиноопасность КОП при развитии миграционно-сегрегационного льдовыделения возрастает при увеличении содержания и дисперсности мелкозема (песок, супесь, суглинок);

в) при одинаковом гранулометрическом составе мелкозема и других равных условиях увеличение содержания крупнообломочных частиц приводит к уменьшению пучиноопасности КОП;

г) при наличии условий для преобладающего развития инъекционного и вакуумно-миграционного механизмов влагопереноса и льдовыделения независимо от содержания крупнообломочных частиц и состава мелкозема КОП могут быть пучиноопасными;

д) влияние содержания крупнообломочных фракций на пучиноопасность КОП следует рассматривать в комплексе с другими факторами, определяющими оптимальные условия криогенного пучения: динамикой промерзания пород в течение холодного периода, предзимней влажностью и градиентами температур (grad_{lt}).

Известно, что пучиноопасность глинистых пород достигает максимальных значений при $\text{grad}_{ht} = 10\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$ и $V_{\text{пр}} = 3,12\text{--}2,40\text{ см}/\text{сут}$ [Орлов и др., 1977; Деформации..., 1985]. В то же время Г.М. Фельдман [1988] показал, что это происходит при $V_{\text{пр}} = 1,7\text{--}2,4\text{ см}/\text{сут}$. В нашем случае максимальное пучение КОП наблюдалось при grad_{ht} , изменяющихся от 3,3 до 10,0 $^\circ\text{C}/\text{м}$ и при более низких значениях $V_{\text{пр}}$, чем указано выше. По-видимому, ответ следует искать в особенностях влияния крупнообломочных фракций на распределение миграционного потока влаги и льдовыделения.

Изучая криогенное строение образцов КОП, содержащих $k_v > 50\%$ и формирующееся при $\text{grad}_{ht} > 10\text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$, было отмечено, что в мелкоземе преобладало цементное и инъекционное льдовыделение, а при содержании $k_v < 50\%$ – сегрегационное льдовыделение. При $\text{grad}_{ht} < 10\text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$ цементное льдовыделение носило явно подчиненный характер при возросшей роли сегрегационного и инъекционного льдовыделения. По-видимому, это отразилось и на формировании величин ϵ_p . В крупнообломочных породах с супесчаным заполнителем при изменении k_v от 12 до 74 % и $\text{grad}_{ht} = 3,3\text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$ значение ϵ_p уменьшилось на 28 %, в суглинистых – на 20 %. Эта же закономерность прослеживается и при других значениях grad_{ht} . В связи с этим можно заключить, что изменение содержания крупнообломочных фракций в КОП с супесчаной составляющей оказывает большее влияние на пучиноопасность в сравнении с глинистыми. Увеличение содержания крупнообломочных фракций в породах не всегда способствует уменьшению их пучиноопасности. Г.М. Фельдманом [1988] в результате лабораторных исследо-

ваний установлено, что при развитии вакуумно-миграционного механизма влагопереноса и льдовыделения в галечниках могут образовываться прослой льда мощностью до 2 см и более. Прослой льда еще большей мощности (до 5 см), генетическая принадлежность которых может быть объяснена возможностью развития указанного выше механизма льдовыделения, наблюдались нами при проходке шурфов в глыбово-щебнистых породах в пределах горного обрамления Чарской впадины в Северном Забайкалье. Следовательно, крупнообломочные породы, не содержащие мелкозем, могут характеризоваться высокими значениями пучиноопасности не только в результате инъекционного льдовыделения, но и при других механизмах влагопереноса и льдовыделения.

Пучиноопасность КОП может быть весьма значительной, а диапазон ее изменений достаточно широким, что связано не только с дисперсностью, но и с условиями льдовыделения в них. В равной степени это относится и к неравномерности пучения на исследуемых территориях, характеризуемой коэффициентом неравномерности K_f [Орлов и др., 1977]. Наиболее высокой она была на площадках, сложенных КОП с суглинистым заполнителем. Причем значения K_f при изменении k_v от 10 до 72 % увеличивались от 3,8 до 7,9. Аналогичный характер изменений наблюдался и на площадках, сложенных КОП с супесчаным заполнителем, здесь K_f колебался от 1,5 до 4,1. Наименьшие значения K_f характерны для площадок, сложенных песчаными КОП.

Исследование льдообразования и формирования криогенных текстур позволило сформулировать предположение об их взаимосвязи со значениями $\text{grad}_h t$. Например, существует мнение, что массивные криогенные текстуры образуются при $0,2-0,5 \text{ } ^\circ\text{C} > \text{grad}_h t > 8-10 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$, а крупнослоистые – при $\text{grad}_h t > 0,2-0,3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ [Попов и др., 1985]. В свою очередь Г.М. Фельдман [1988] утверждал, что массивные типы текстур формируются при скоростях промерзания грунтов $0,028 \text{ см/сут} < V_{\text{пр}} < 1,32 \text{ см/сут}$, а крупнослоистые – при $0,028 \text{ см/сут} < V_{\text{пр}} < 0,144 \text{ см/сут}$. Однако есть точка зрения, согласно которой оптимальные условия миграционно-сегрегационного льдовыделения формируются при $\text{grad}_h t$ от 10 до $30 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$ [Орлов, 1962]. Известно также, что при развитии кристаллизационно-пленочного механизма и достаточно медленном движении границы промерзания пород или квазистационарном ее положении в открытых системах создаются условия для формирования шлиров и прослоев льда большой мощности [Ершов, 1979; Жесткова, 1982]. В то же время в отдельных работах показано, что для каждого типа пород существует своя оптимальная скорость промерзания, при которой миграционный поток влаги достигает максимальных значений [Чистотинов, 1973; Фельдман, 1977; Борозинец, 1983]. Кроме того, В.Е. Борозинец [1983] в результате серии опытов по промерзанию суглинка определил, что при $V_{\text{пр}} < 0,173 \text{ см/сут}$ миграции влаги к фронту промерзания не происходит. По данным Г.М. Фельдмана [1988], минимальная ве-

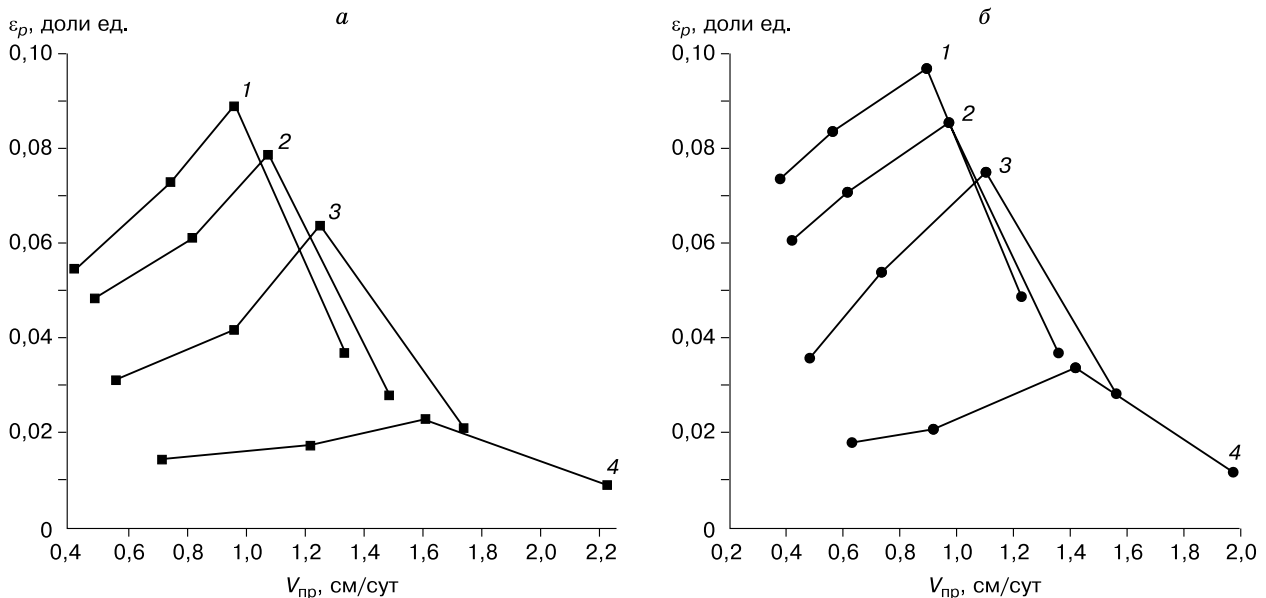


Рис. 4. Зависимость величины относительного пучения (ϵ_p) от изменения скорости промерзания ($V_{\text{пр}}$) крупнообломочных пород нарушенного сложения с супесчаным (а) и суглинистым (б) заполнителем: 1–4 – $W_{\text{об}} = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7$ доли ед. – объемное содержание крупнообломочных фракций диаметром 2–40 мм.

Таблица 5. **Изменение типов сезонноталого (СТС) и сезонномерзлого слоев пород и их пучинноопасности в условиях потепления климата**

Номер	Типы СТС и СМС		Степень пучинистости		По влажности		По степени влияния грунтовых вод			
	1960 г.	2000 г.	1960 г.	2000 г.	1960 г.	2000 г.	ПС	ГЗ	ПС	ГЗ
							1960 г.		2000 г.	
A11	П-РК-С-П	<i>П-РК-М-П</i>	ПНП	ПНП	НДВ	НДВ	–	3	1	2
A16							–	3	1	3
A25		П-РК-М-П					–	3	–	3
A24		<i>П-РК-М-П</i>					–	3	1	3
A20	П-РК-С-ГрП	<i>П-РК-С-ГрП</i>					–	3	1	3
A21	П-РК-Г-ГрП	<i>П-РК-С-ГрП</i>					–	3	1	3
A12	П-РК-С-ГлП	<i>П-РК-Г-ГлП</i>					–	3	–	3
A3	П-РК-Г-ПГк	<i>П-РК-Г-ПГк</i>					1	2	1	3
A5	П-РК-С-ПГк	<i>П-РК-Г-ПГк</i>					1	2	1	2
A14	П-РК-Г-ПГр	<i>П-РК-Г-ПГр</i>					1	2	1	2
B3	П-РК-Г-ДрП	<i>П-РК-Г-ДрП</i>					–	2	1	2
A6	П-РК-Г-Сп	<i>П-РК-М-Сп</i>		СРП	СЛВ	СЛВ	1	1	1	2
A2	П-РК-М-ГрСп	<i>П-РК-М-ГрСп</i>		СЛП	ВЛ	ВЛ	1	2	1	1
A1	П-РК-М-ГрСп	<i>П-РК-М-ГрСп</i>		ПНП			1	1	1	1
B7	П-РК-М-Сп	<i>П-РК-М-Сп</i>	СЛП	СЛП	СЛВ	СЛВ	1	2	1	3
B2	ПП-РК-М-ДрСп	<i>П-РК-М-ДрСп</i>	ЧРП	<i>СНП</i>	ВЛ	ВЛ	1	1	1	3
B4	П-РК-М-ГрСп	<i>ПП-ПК-М-ГрСп</i>	СНП	<i>СРП</i>	СЛВ	СЛВ	1	1	1	3
B5	П-РК-М-ГрСп	<i>П-ПК-М-ГрСп</i>	СЛП	<i>ЧРП</i>	СЛВ	СЛВ	1	1	1	3
B6	ПП-ОРК-М-ГрСп	<i>П-РК-М-ГрСп</i>					1	1	1	3
B1	П-РК-М-Сп	ПП-ПК-М-Сп	ПНП				–	3	1	3
B6	П-РК-М-ГрСп	<i>П-РК-М-ГрСп</i>	СЛП				–	3	1	3
B2	П-РК-М-ДрСп	<i>П-РК-С-ДрСп</i>	СРП	<i>СНП</i>	ВЛ	ВЛ	1	3	1	3
B7	П-РК-М-ГкСп	<i>П-РК-М-ГкСп</i>			СВЛ	СВЛ	–	3	1	3
B10	П-РК-М-ДрСп	<i>П-РК-С-ДрСп</i>	ЧРП	ЧРП	НВЛ	<i>ВЛ</i>	–	3	1	3
B11	П-РК-М-ДрСп	<i>П-РК-С-ДрСп</i>		<i>СНП</i>	ВЛ	ВЛ	1	3	1	3
B12	П-РК-М-ДрСп	<i>П-РК-С-ДрСп</i>	СРП	<i>СЛП</i>			1	3	1	3
B13	П-РК-М-ДрСп	<i>П-РК-С-ДрСп</i>	СНП	<i>ЧРП</i>			–	3	1	3
B5	П-РК-М-ГрСп	<i>П-РК-М-ГрСп</i>	ЧРП	<i>СЛП</i>	СВЛ	<i>ВЛ</i>	1	3	1	3
B9	П-РК-М-ГрСп	<i>П-РК-М-ГрСп</i>		<i>СРП</i>	ВЛ	<i>СВЛ</i>	–	3	1	3
A18	П-РК-М-ГрСг	<i>П-РК-М-ГрСг</i>	СЛП	СЛП	ВЛ	ВЛ	1	1	1	2
A19	П-РК-М-Сг	<i>ПП-ПК-М-Сг</i>	ЧРП	<i>СРП</i>	ВЛ	ВЛ	1	1	1	1
A22	П-РК-С-ГрСг	<i>ПП-ПК-С-ГрСг</i>	ПНП	<i>СНП</i>			1	1	1	2
A8	П-РК-М-ДрСг	<i>ПП-ПК-С-ДрСг</i>	СЛП	ЧРП			1	1	1	2
A9	П-РК-М-ДрСг	<i>ПП-ПК-М-ДрСп</i>	СЛП	<i>СРП</i>			1	1	1	2
A7	П-РК-М-ДрСг	<i>П-РК-С-ДрСг</i>	СНП	<i>ЧРП</i>			1	1	1	2
A15	П-РК-С-Сг	<i>П-РК-С-Сг</i>	ПНП	<i>СЛП</i>			1	1	1	2
A17	ПП-ОРК-С-ГрСг	<i>ПП-ОРК-С-ГрСг</i>		ПНП			1	1	1	3
B1	П-РК-М-ГрСг	<i>П-РК-М-ГрСг</i>	СНП	<i>ЧРП</i>			1	1	1	–
B8	П-РК-М-ГрСг	<i>П-пК-М-ГрСг</i>	СЛП	СЛП			–	3	1	3
B4	П-РК-М-ГрСг	<i>П-РК-М-ГрСг</i>	СРП	<i>ПНП</i>			1	3	1	3
A4	П-РК-С-П	<i>П-РК-С-П</i>	ПНП	ПНП	НДВ	НДВ	–	3	1	3
A23	ПП-ОРК-С-ПБУ	<i>П-РК-С-ПБУ</i>					–	3	1	–
B3	ПП-ОРК-С-П	<i>П-РК-С-П</i>					–	3	1	–
A10	ПП-ОРК-С-Сп	<i>П-РК-С-Сп</i>		<i>ЧРП</i>	ВЛ	ВЛ	3	3	1	1
A13	ПП-РК-М-ДрСп	<i>П-РК-М-ДрСп</i>	СРП				1	2	1	1

Примечание. А11, ... – номер микрорайона; типы слоя сезонного оттаивания и сезонного промерзания пород (СТС и СМС): по среднегодовой температуре на подошве слоя ξ (t_{ξ} , °С): П – переходные (± 0 , ..., 1), ПП – полупереходные (± 1 , ..., 2); по амплитуде температур на поверхности пород (А, °С): ПК – повышено-континентальные (17, ..., 21), РК – резко континентальные (21, ..., 24), ОРК – особо резко континентальные (>24); по влажности ($W_{юп}$, доли ед.): М – глубоко-

кий $W_n < W_{\text{от}} < W_n + 1/3(W_n - W_n)$ (где W_n – полная влагоемкость пород, W_n – содержание незамерзшей воды в породах); С – средний $W_n + 1/3(W_n - W_n) < W_{\text{от}} < W_n + 2/3(W_n - W_n)$; М – мелкий $W_{\text{от}} > W_n + 2/3(W_n - W_n)$; по составу пород (содержание крупнообломочных фракций, %), по Д.М. Шестерневу [1993]: П – песчаные, ГрП – гравийно-песчаные, ГлП – глыбово-песчаные, ПГк – песчано-галечниковые, ПГр – песчано-гравийные, ДрП – дресвяно-песчаные, ПБУ – песчано-буроугольные, Сп – супесчаные, ДрСп – дресвяно-супесчаные, ГрСп – гравийно-супесчаные, ГкСп – галечниково-супесчаные, СГ – суглинистые, ГрСг – гравийно-суглинистые, ДрСг – дресвяно-суглинистые; степень пучинистости пород (согласно классификации В.О. Орлова [1962]): ПНП – практически непучинистые, СЛП – слабопучинистые, СНП – среднепучинистые, ЧРП – чрезмерно пучинистые; типы пучения по степени влияния грунтовых вод (по Л.С. Гарагуле [1978]) – по влажности пород: НДВ – недостаточно влажные, СЛВ – слабовлажные, ВЛ – влажные, СЛВ – сильновлажные; по продолжительности существования грунтовых вод (ПС): 1 – постоянно существующие, 2 – периодически исчезающие, 3 – периодически появляющиеся; по глубине залегания (ГЗ) в период промерзания грунта: 1 – уровень грунтовых вод залегает в пределах слоя сезонного оттаивания и промерзания ξ (грунты в пределах ξ содержат свободную воду), 2 – уровень грунтовых вод залегает в интервале глубин от ξ до $\xi + h_k$, где h_k – высота капиллярной каймы (грунты в пределах ξ содержат свободную воду), 3 – уровень грунтовых вод залегает на глубине более $\xi + h_k$ (грунты в пределах ξ содержат подвешенную и связанную воду).

Курсивом выделены: типы сезонного оттаивания, перешедшие при потеплении климата в типы сезонного промерзания пород; пучиноопасность грунтов, классификационные параметры которых изменились в ходе деградации многолетнемерзлых пород и изменения степени влияния грунтовых вод на пучение пород.

личина миграционного потока влаги отмечается при $V_{\text{пр}}$ менее 0,096 и более 19,20 см/сут. Максимальных величин миграция влаги и льдонакопление достигают при $V_{\text{пр}} = 1,7\text{--}2,4$ см/сут. Из других источников известно, что это происходит при $V_{\text{пр}} = 2,4\text{--}3,12$ см/сут [Деформации..., 1985]. Таким образом, в настоящее время нет единой точки зрения на формирование влагопереноса и величин пучения при различных скоростях промерзания глинистых грунтов.

Результаты лабораторных исследований показали, что в КОП с различным содержанием супеси и суглинка весьма четко прослеживается закономерное снижение максимумов относительного пучения при росте содержания крупнообломочной составляющей. Для каждого из этих максимумов характерно свое значение скорости промерзания пород. Весьма примечательно то, что при увеличении содержания крупнообломочной составляющей в крупнодисперсных породах с супесчаным и суглинистым заполнителем в относительном выражении не происходит существенного уменьшения разницы между минимальными и максимальными значениями степени пучинистости. Например, в КОП с супесчаным заполнителем при содержании дресвы 0,12 максимальное значение $\epsilon_p = 0,089$ ($V_{\text{пр}} = 0,97$ см/сут), минимальное значение $\epsilon_p = 0,037$ ($V_{\text{пр}} = 1,74$ см/сут) (рис. 4, а). Эти параметры при содержании крупнообломочной составляющей 0,75 равны 0,023 ($V_{\text{пр}} = 1,61$ см/сут) и 0,009 ($V_{\text{пр}} = 2,23$ см/сут) соответственно. Следовательно, в относительном выражении различие скоростей промерзания и степени пучинистости в первом случае составляет 85 и 141 %, во втором – 38 и 155 %. Аналогичная тенденция характерна и для КОП с суглинистой составляющей (см. рис. 4, б). Влияние скорости промерзания на величину относительного пучения в крупнодисперсных породах при увеличении со-

держания крупнообломочной составляющей существенно снижается. В этом случае основополагающим для формирования их пучиноопасности может стать механизм влагопереноса и льдонакопления, что и было показано в работе Г.М. Фельдмана [1988] и получено нами во время полевых исследований. В то же время в случае преобладающего развития миграционно-сегрегационного механизма влагопереноса и льдонакопления действует закономерности, охарактеризованные В.О. Орловым, Э.Д. Ершовым, Л.С. Гарагулей и др.

Анализируя картину изменения пучинистости песчаных пород и крупнообломочных пород с песчаным заполнителем в природных условиях, следует отметить, что недостаточно влажные их разновидности не изменялись по степени пучинистости даже при смене типов сезонного оттаивания и промерзания пород и не зависели от продолжительности существования и глубины залегания уровня грунтовых вод во время промерзания (табл. 5).

В отношении изменения пучиноопасности супесей и суглинков, крупнообломочных грунтов с супесчаным и суглинистым заполнителем установлена другая картина. В период интенсивного потепления климата (с 1960 г. по настоящее время) грунтовые воды в слое сезонного промерзания и оттаивания пород присутствуют постоянно, а глубина их залегания равна или больше глубины СМС или СТС пород. Таким образом, при деградации ММП на исследуемой территории существуют условия, близкие к оптимальным для формирования пород с высокими классами пучиноопасности.

Выполненные исследования показали, что в условиях потепления климата и деградации многолетнемерзлых пород пучиноопасность увеличилась на одну или две категории, а в ряде случаев достигла критического значения (см. табл. 5). Из

табл. 5 следует, что практически все типы сезонного промерзания и оттаивания, влагообеспеченность которых в ходе деградации криолитозоны увеличилась, относятся к пучиноопасным и чрезмерно пучиноопасным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований сводятся к следующему.

1. Для изучения закономерностей развития криогенного пучения пород, а также для оценки их пучиноопасности разработана комплексная методика, включающая: а) методы получения и математической обработки информации, характеризующей условия существования на исследуемой территории различных типов геокриологических обстановок; б) математическую модель процесса криогенного пучения крупнообломочных пород, учитывающую особенности миграции влаги в них в зависимости от дисперсности и содержания заполнителя; в) методы полевых и лабораторных исследований физико-механических, теплофизических и водно-физических свойств КОП с различным содержанием мелкодисперсного материала; г) составление карт типов сезонного оттаивания и сезонного промерзания пород по методике В.А. Кудрявцева для оценки пучиноопасности территории.

2. Установлено, что по мере убывания пучиноопасности крупнообломочные породы можно выстроить в следующий ряд: КОП с супесчаным заполнителем > КОП с суглинистым заполнителем > КОП с песчаным заполнителем. Максимальные изменения пучиноопасности грунтов произошли в микрорайонах, в которых суглинистые типы сезонного оттаивания перешли в сезонномерзлые типы в связи с формированием несливающейся мерзлоты или полным оттаиванием многолетнемерзлых пород.

3. Составлены схематические карты пучиноопасности грунтов на территории Читино-Ингодинской впадины на период до начала потепления климата (1890–1960 гг.) и на период относительно интенсивного потепления климата (1960–2002 гг.) и установлено, что пучиноопасность грунтов при деградации ММП усиливается.

4. На 60 % территории Читино-Ингодинской впадины грунты из пучинистых перешли в категорию сильнопучинистых и чрезмерно пучинистых. Полученные результаты нашли подтверждение в процессе режимных исследований в Читино-Ингодинской впадине на стационарных площадках.

5. Пучиноопасность грунтов территории Читино-Ингодинской впадины за период с 1960 по 2002 г. повсеместно изменилась, что привело к многочисленным деформациям зданий и инженерных сооружений. Поэтому для повышения каче-

ства работ по проектированию промышленных и гражданских инженерных сооружений в регионе разработаны Территориальные строительные нормы и правила (ТСН 50-305-204 Читинской области). [Основания..., 2004]

Литература

- Александров А.С., Железняк И.И., Мосенкис Ю.М.** Инженерное освоение криолитозоны Забайкалья. Новосибирск, Наука, 1990, 104 с.
- Борозинцев В.Е.** Экспериментальное исследование параметров криогенного пучения глинистых грунтов в условиях регулируемого режима промерзания: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1983, 26 с.
- Гарагуля Л.С.** Методика прогнозной оценки антропогенных изменений мерзлотных условий (на примере равнинных территорий). М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 224 с.
- Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л.** Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М., Недра, 1980, 384 с.
- Демидюк Л.М.** Особенности формирования температурного режима горных пород Читино-Ингодинской депрессии // Мерзлотные исслед., 1964, вып. IV, с. 301–315.
- Демидюк Л.М., Шестернев Д.М.** Опыт освоения территории при городской застройке // Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, с. 143–151.
- Деформации и напряжения** в промерзающих и оттаивающих породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 168 с.
- Ершов Э.Д.** Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М., МГУ, 1979, 214 с.
- Ершов Э.Д., Лебедеко Ю.П.** Деформации пучения // Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих грунтах. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, с. 40–43.
- Жесткова Т.Н.** Формирование криогенного строения грунтов. М., Наука, 1982, 216 с.
- Золотарь И.А.** Расчет промерзания и величины пучения грунта с учетом миграции влаги // Процессы тепло- и массообмена в мерзлых горных породах. М., Наука, 1965, с. 19–25.
- Кудрявцев В.А., Ершов Э.Д., Чевеверев В.Г.** Зависимость коэффициентов влагопереноса водонасыщенных грунтов от влажности, гранулометрического состава и плотности // Мерзлотные исслед., 1973, вып. XIII, с. 176–183.
- Леонович И.И., Вырко Н.П.** Механика земляного полотна. М., Наука, 1975, 232 с.
- Методические рекомендации** по стационарному изучению криогенных физико-геологических процессов. М., ВСЕГИНГЕО, 1979, 70 с.
- Орлов В.О.** Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1962, 188 с.
- Орлов В.О.** Оценка общей величины деформации пучения // Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих грунтах. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, с. 91–101.
- Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д.** Морозное пучение грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Л., Стройиздат, 1977, 147 с.
- Орлов В.О., Елгин Б.Б., Железняк И.И.** Морозное пучение грунтов в расчетах оснований сооружений. Новосибирск, Наука, 1987, 136 с.

- Основания** и фундаменты на мерзлых грунтах. ТСН 50-305-2004 Читинской области. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2004, 28 с.
- Петров В.С.** Прогноз криогенных процессов при инженерно-геокриологических исследованиях: Учеб. пособие. Чита, ЧитПИ, 1989, 101 с.
- Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В.** Криолитология. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 238 с.
- Пузаков Н.А.** Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. М., Автотрансиздат, 1969, 168 с.
- Сальников П.И.** Опыт и повышение эффективности строительства зданий на мерзлых грунтах в Южном Забайкалье // Инженерно-геокриологические проблемы Забайкалья: Зап. Забайкал. фил. Геогр. о-ва РФ. Чита, 1992, вып. 125, с. 4–11.
- Сальников П.И.** Устойчивость фундаментов зданий на мерзлых грунтах в Южном Забайкалье. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1996, 208 с.
- СНиП 23-01-99.** Строительная климатология. М., Госстрой РФ, ГУП ЦПП, 2000, 58 с.
- Соколова О.В., Горковенко Н.Б.** Оценка морозоопасности крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем // Основания и фундаменты, 1997, № 2, с. 11–15.
- Соколова О.В., Орлов В.О.** Пучинистые свойства крупнообломочных грунтов // Защита инженерных сооружений от морозного пучения: Тез. докл. и сообщ. Междунар. науч.-техн. семинара. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1993, с. 22.
- Фельдман Г.М.** Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. Новосибирск, Наука, 1977, 190 с.
- Фельдман Г.М.** Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск, Наука, 1988, 260 с.
- Цыгович Н.А., Кроник Я.А.** Физические и механические свойства мерзлых и оттаивающих крупнообломочных грунтов // II Междунар. конф. по мерзлотоведению: Докл. и сообщ. Вып. 4. Физика, физико-химия и механика мерзлых горных пород и льда. Якутск, Кн. изд-во, 1973, с. 52–62.
- Чистотин Л.В.** Миграция влаги в промерзающих водонасыщенных грунтах. М., Наука, 1973, 144 с.
- Шестернев Д.М.** К вопросу об оценке пучения крупнообломочных грунтов // Защита инженерных сооружений от морозного пучения: Докл. Междунар. науч.-техн. семинара. Якутск, Изд-во СО РАН, Якут. фил., 1988, с. 39–48.
- Шестернев Д.М.** Пучение дисперсных крупнообломочных грунтовых систем // Защита инж.сооружений от морозного пучения: Тез. докл. и сообщ. Междунар. науч.-техн. семинара. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1993а, с. 7.
- Шестернев Д.М.** Воздействие глобального потепления климата на криолитозону Южного Забайкалья // Материалы Второй конф. геокриологов России (Москва, 6–8 июня 2001 г.). М., Изд-во Моск. ун-та, 2001а, т. 2, с. 313–318.
- Шестернев Д.М.** Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001б, 266 с.
- Шестернев Д.Д.** К проблеме оценки пучения промерзающих дисперсных пород // Четвертая науч.-техн. конф. Горного ин-та. Чита, ЧитГТУ, 2003, ч. 2, с. 110–114
- Шестернев Д.М.** Криогенные процессы Забайкалья. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2005а, 262 с.
- Шестернев Д.Д.** Обоснование применения существующих математических моделей для оценки криогенного пучения пород в центральной части Читино-Ингодинской впадины // Материалы 3-й конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005б, с. 192–196.
- Шестернев Д.Д.** О влиянии климатических ритмов на деформации пучения пород слоя сезонного оттаивания и промерзания Читино-Ингодинской впадины // Материалы VII Межрегион. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, посвящ. 50-летию Якутского гос. ун-та им. М.К. Аммосова. Нерюнгри, Изд-во ТИ(ф)ЯГУ, 2006а, с. 66–68.
- Шестернев Д.Д.** Пучение грунтов в условиях глобального изменения климата // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения: Материалы Междунар. конф. Тюмень, ТюмГНГУ, 2006б, т. 1, с. 315–317.
- Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г.** Оценка морозоопасности глинистых крупнообломочных грунтов // Инженерно-геологическое изучение и оценка мерзлых, промерзающих и протаивающих глинистых грунтов (ИГК-90): Междувед. сб. науч. тр. С.-Петербург, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993, с. 55–58.
- Шестернев Д.М., Филатов А.В., Кубасов В.Н.** Использование электронного теплового штампа при моделировании промерзания пород // Вестн. Чит. организации Науч.-техн. о-ва строителей, 1998, с. 92–95.
- Шестернев Д.М., Шестернева М.К.** Пучение песчаных и глинистых крупнообломочных грунтов // Защита инженерных сооружений от морозного пучения. Докл. Междунар. науч.-техн. семинара (ЗМП-93) / Под ред. Р.М. Каменского, С.И. Заболотника, П.И. Сальникова и др. Якутск, Изд-во СО РАН, Якут. фил., 1998, с. 10–19.
- Jahson L.E.** Frost penetration in sandy soil // Abhandl, 1963, No. 180, 160 p.

Поступила в редакцию
23 мая 2007 г.