

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 551.34

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
ПРИ РЕГИОНАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

А. Н. Хименков, В. П. Мерзляков

*Институт геоэкологии РАН (ИГЭ РАН), 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, а/я 145, Россия*

Активизация мерзлотно-геологических процессов, вызванная изменением среднегодовой температуры, оказывает значительное воздействие на изменение параметров литогенной основы геосистем.

Предложена методика региональной оценки изменения механических свойств засоленных мерзлых пород. Эту методику можно использовать при различных сценариях изменения климата. Она основана на комплексном анализе материалов картирования и результатов моделирования динамики климата, а также на данных по механическим свойствам засоленных грунтов.

Полученные результаты могут быть полезны для оценки изменения устойчивости природно-технических систем и, в частности, оснований инженерных сооружений при колебаниях температуры грунтов, связанных с изменением климата или нарушением поверхностных условий.

*Мерзлые грунты, засоленность, прочностные свойства, сценарий, потепление климата, районирование*

ASSESSMENT OF CHANGE IN SALT FROZEN GROUND PROPERTIES UNDER  
THE REGIONAL CLIMATE WARMING

A. N. Hymenkov, V. P. Merzlyakov

*Institute of Environmental Geoscience (IEG RAS),  
Ulan'sky pereulok 13, building 2, P/O box 145, 101000, Moscow, Russia*

Activization of geocryological processes, induced by changing of mean annual temperature has a significant influence on changing of climate parameters of geosystem lithogenic basis.

The methodology has been suggested for regional estimation of mechanical properties of saline frozen soils for different scenarios of climate changing. It has been based on complex analysis of mapping data, modelling of climate dynamics and data of saline soil mechanical properties.

The obtained results may be used for estimation of changing stability of nature-technical systems and, in particular, of engineering constructions foundations when ground temperature fluctuates due to climate changing or breaking of surface conditions.

*Frozen soils, salinization, strength properties, scenario, climate warming, zoning*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы резко обострились дискуссии вокруг проблемы глобального изменения климата и связанных с ним изменений природной среды. Сценарии развития таких изменений различны как по направленности, так и по динамике. В настоящее время возникла необходимость в разработке унифицированных методик, позволяющих выявить и проследить реакцию различных компонентов природной среды на изменение климата.

При обсуждении проблем, связанных с потеплением климата, в первую очередь рассматриваются оттаивание мерзлых пород, активизация термоденудационных процессов, динамика растительного

покрова. Меньше внимания уделяется изменению параметров литогенной основы геосистем, таким, например, как механические свойства грунтов.

Статья посвящена слабо разработанным вопросам, связанным с методикой региональной оценки изменения механических свойств засоленных мерзлых пород, которую можно использовать при различных сценариях изменения климата. В качестве примера будет рассмотрен север Западной Сибири. Здесь морские отложения, формирующие засоленные грунтовые толщи, занимают площадь около одного миллиона квадратных километров. Изменение температуры грунтов рассмотрено на

основе карты повышения температуры грунтов Западной Сибири, разработанной на кафедре гео-криологии МГУ [Ершов и др., 1996].

Следует сразу оговориться, что авторы не отдают предпочтение какому-либо сценарию изменения климата. Используемый в статье пример выбран потому, что в нем показана неоднородность изменений температур на севере Западной Сибири. Оценка возможных вариантов развития климата не является темой данной статьи.

### ЗАСОЛЕННЫЕ ГРУНТЫ

Для четвертичных пород севера Западной Сибири характерно устойчивое по площади и в разрезе криогенной толщи хлоридно-натриевое засоление (морской тип). Известна карта засоленности мерзлых грунтов Западной Сибири, составленная Г.И. Дубиковым и Н.В. Ивановой на основе анализа более 4000 проб [Дубиков, Иванова, 1990, 1996].

Засоление грунтов Западной Сибири охватывает криогенную толщу на всю ее мощность до 300 м и более. Глинистые породы, способные в наибольшей степени сохранять первичную седиментационную засоленность, содержат в 2–8 раз больше солей, чем песчаные (за исключением песчаных горизонтов с криопэгами).

Засоление мерзлых пород постепенно уменьшается в южном направлении. Так, засоленность  $D_{sal}$  мерзлых пород на севере Ямала и Гыданского п-ова в процентах от массы сухого грунта составляет 2,0–3,5 % (местами 4–6 %). В южной части Ямала (южнее р. Юрибей) величина  $D_{sal}$  принимает значения 0,05–0,3 %, в Обско-Пуровском междуречье – 0,01–0,1 %.

Для инженерных расчетов оснований при значениях  $D_{sal} < 0,05$  % мерзлые породы принято считать незасоленными.

Оценки понижения температуры замерзания засоленных пород  $\Delta\theta_z$ , в соответствии с законом Рауля, в первом случае (север Ямала) составляют 1,8–3,15 °С (местами 3,6–5,4 °С), во втором случае (южная часть Ямала) – приблизительно 0,3 °С.

### ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

За последние 30–35 лет среднегодовая температура воздуха в различных регионах криолитозоны России повысилась на 0,5–1,6 °С. Наибольшие региональные тренды повышения среднегодовой температуры воздуха характерны для Центральной Якутии (1,6 °С) и севера Западной Сибири (1,3 °С) [Pavlov, 1996].

В настоящее время существует несколько сценариев возможного изменения климата с учетом антропогенных факторов. Ниже используются данные работы [Ершов и др., 1996], где принят сценарий, разработанный в Институте глобального климата и экологии РАН, согласно которому на

территории криолитозоны России к 2100 г. среднегодовая температура воздуха повысится на 4–6 °С в зависимости от географического положения районов.

### ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ

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

Установлено [Велли, 1973; Пекарская, Чапаев, 1979], что даже при небольшом засолении  $D_{sal} = 0,15$  % в диапазоне температур  $\theta = -2,8... -6,5$  °С содержание жидкой фазы в грунте (суглинков) на 2,5–3,8 % больше, чем при отсутствии солей. Если  $D_{sal} = 1,0$  %, то эта разница достигает 22,3 %. При  $\theta = -2,8$  °С и  $D_{sal} = 0,5$  % содержание жидкой фазы на 8,2 % больше, чем в таком же незасоленном суглинке.

Если температуру суглинистого грунта повысить от  $-6,5$  до  $-2,8$  °С при  $D_{sal} = 0,15$  %, то это приведет к увеличению содержания незамерзшей воды на 4,5 %, при  $D_{sal} = 0,5$  % – на 5,9 %, а при  $D_{sal} = 1,0$  % – на 14,5 %. Такое же изменение температуры в незасоленных грунтах приведет к увеличению содержания незамерзшей воды на 3,9 %.

Известно, что наряду с понятием „содержание незамерзшей воды” используют понятие „льдосодержание”. Они дополняют друг друга, так как незамерзшая вода ослабляет, а лед упрочняет грунт.

Изучение льдистости грунтов в зависимости от засоленности [Пекарская, Чапаев, 1979] показывает, что в супесчаном грунте весьма высокой степени засоления ( $D_{sal} \approx 9$  %) (эксперимент для установления нижнего предела льдовыделения по температуре) при температуре выше  $-5,6$  °С весь содержащийся поровый раствор находится в жидкой фазе, и только при более низких температурах начинается льдовыделение. В незасоленной супеси такого же гранулометрического состава льдообразование начинается практически при 0 °С. При  $\theta = -5,6$  °С вся вода находится в твердом состоянии.

Таким образом, состояние мерзлого грунта определяется двумя параметрами – засоленностью  $D_{sal}$  и температурой  $\theta$ , а его свойства следует рассматривать как функции двух переменных  $D_{sal}$  и  $\theta$ , что и положено в основу методики.

Изучением прочности мерзлых грунтов в зависимости от засоленности и температуры занимались такие авторы, как Ю.Я. Велли, П.А. Гришин, В.М. Карпов, В.И. Аксенов, А.Н. Яркин, А.А. Карпунина и др.

Приведем лишь некоторые данные. Установлено, что в интервале температур  $-1...-5$  °С вели-

чина эквивалентного сцепления суглинка  $C_{eq}$  резко уменьшается при засоленности 0,2–0,3 % [Велли, 1990]. При температурах  $-3...-4$  °С величина эквивалентного сцепления при указанной засоленности и при влажности выше предела текучести уменьшается в 2 раза, а при  $\theta = -1...-2$  °С величина эквивалентного сцепления уменьшается в 3–4 раза. Изменение суммарной влажности от 25 до 55 % вызывает уменьшение эквивалентного сцепления на 25–30 %.

Расчетное давление  $R$  на пылеватые и мелкие пески при засоленности  $0,03\% < D_{sal} < 0,1\%$  в диапазоне температур  $-1$  °С  $> \theta > -8$  °С уменьшается примерно в 2 раза. При засоленности  $D_{sal} > 0,5\%$  и температурах грунта  $\theta > -8$  °С мелкий песок практически находится в охлажденном состоянии и свойства его близки к свойствам талого песка. В то же время расчетное давление  $R$  на глинистые грунты при засоленности  $0,03\% < D_{sal} < 0,15\%$  в том же диапазоне температур уменьшается всего лишь на 10–20 % [Рекомендации..., 2001].

Засоленность существенно влияет на изменение прочности на срез  $R_{af}$  по поверхности смерзания мерзлых грунтов с фундаментом. Величина прочности на срез в интервале температур  $-1...-5$  °С при засоленности 0,5 % снижается в 2–2,5 раза по сравнению с незасоленными грунтами. Дальнейшее увеличение засоленности до 1,1 % приводит к уменьшению сопротивления смерзанию в 3 раза, а при засоленности грунта более 1,5 % смерзание с фундаментом практически отсутствует [Велли, 1990].

По другим данным [Миренбург и др., 1990] при увеличении засоленности от 0,2 до 0,5 % и температуре  $-3$  °С для суглинка длительная прочность на срез  $R_{af}$  уменьшается от 212 до 110 кПа. При той же температуре и увеличении засоленности от 0,1 до 0,2 % близкие значения  $R_{af}$  имеет мерзлый песок – 198 и 111 кПа соответственно.

Обобщение результатов экспериментов по определению прочности на срез [Хименков, Брушков, 2003] представлено на рис. 1.

Суглинки оказываются более прочными, чем супеси. Исследовались льдонасыщенные супеси с суммарной влажностью 0,35. Однако содержание незамерзшей воды изменялось в зависимости от засоленности. Так, при  $D_{sal} = 0,5\%$  содержание незамерзшей воды в супеси составляло примерно 0,12. Суммарная влажность суглинка составляла 0,40–0,45. Содержание незамерзшей воды в суглинке при  $D_{sal} = 1\%$  было примерно 0,2.

Увеличение засоленности до 0,5 % в суглинистых и супесчаных грунтах приводит к резкому уменьшению прочности на срез в 2–3 раза. При засоленности больше 0,5 % уменьшение прочности на срез становится более плавным (см. рис. 1). Подобный вид имеют зависимости  $R_{af}-D_{sal}$  для суглинка и супеси по другим экспериментам.

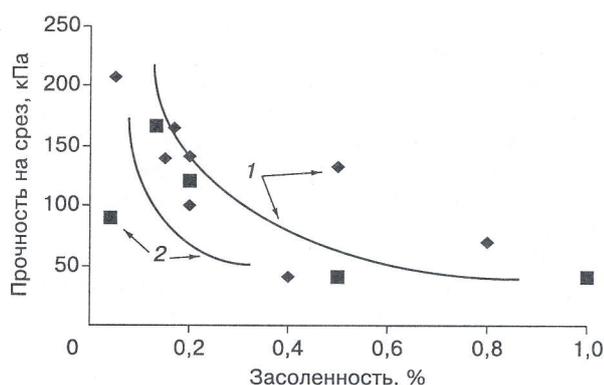


Рис. 1. Зависимость длительной прочности на срез по поверхности смерзания  $R_{af}$  от засоленности  $D_{sal}$  для суглинка (1) и супеси (2) при температуре грунта  $\theta = -3$  °С.

В зависимости от деформируемости мерзлые грунты подразделяются на твердо-мерзлые и пластично-мерзлые. Критерием границы перехода из одного состояния в другое является определенное значение коэффициента сжимаемости грунта [СНиП 2.02.04-88, 1990]. Смысл этого критерия в том, что расчет устойчивости оснований при твердо-мерзлом состоянии грунта ведется по прочности, а расчет устойчивости оснований при пластично-мерзлом состоянии грунта следует вести по прочности и по деформациям, развивающимся в период строительства и эксплуатации сооружения.

В рекомендациях по определению прочности мерзлых грунтов [Рекомендации..., 2001] приводятся данные, из которых следует, что при засоленности грунта  $D_{sal} > 1,5\%$  и температуре  $\theta > -8$  °С грунты всех типов находятся в охлажденном состоянии. При засоленности грунта  $D_{sal} < 0,15\%$  и температуре  $\theta < -3$  °С грунты всех типов находятся в твердо-мерзлом состоянии.

#### РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

При разработке различных сценариев изменения климата следует учитывать динамику отдельных компонентов природной среды, таких как температура грунтов, мощность снегового покрова, растительный покров. Большое внимание следует уделять прогнозу развития экзогенных процессов: термокарста, термоэрозии, склоновых процессов и др.

На наш взгляд, развитие различных научных направлений (картирование засоленных грунтов морского генезиса, разработка математического моделирования изменений климата, накопление большого материала по механическим свойствам засоленных грунтов при различной температуре)

позволяют подойти к прогнозу изменения прочностных и деформационных свойств для различных регионов. Особенно это важно для районов распространения засоленных мерзлых толщ.

Наиболее подходящим регионом для иллюстрации предлагаемого подхода к прогнозу изменения механических свойств мерзлых грунтов при изменении климата является север Западной Сибири.

В основу выделения районов положено изменение температур грунтов в соответствии с принятым сценарием [Ершов и др., 1996]. Каждый район соответствует определенной разности значений между прогнозируемой температурой грунтов и современной. Выделенные участки накладываются на карту засоленности. Внутри районов выбираются подрайоны с однородными показателями засоленности грунтов. Затем для выделенных районов и подрайонов подсчитываются значения механических характеристик грунтов на прогнозируемый момент времени. Определяется величина изменений данных характеристик по сравнению с

современными. Схема районирования представлена на рис. 2.

Рассматриваемая область делится на две температурных зоны: зону повышения интервала температуры от  $-7...-9$  до  $-2...-4$  °С (район 1) и зону повышения интервала температуры от  $-5...-7$  до  $-1...-2$  °С (район 2). В пределах районов проведено деление на подрайоны в соответствии со значениями засоленностей грунтов [Дубиков, Иванова, 1990; 1996]. Район 1 совпадает с территорией распространения значений засоленности грунтов 0,5–1,5 %. В районе 2 выделены два подрайона: 2а со значением засоленности 0,5–1,5 % и 2б со значениями засоленности меньше 0,5 % (преимущественно около 0,25 %).

Для выделенных районов с различной начальной засоленностью можно проследить влияние изменения температуры на состояние грунтов (диаграмма на рис. 3). Повышение температуры в подрайоне 2а приводит к резкому увеличению области охлажденных грунтов. В подрайоне 2б сохраняются как области пластично-мерзлых, так и области твердо-мерзлых грунтов.

Были составлены сравнительные таблицы изменения прочности на срез при смерзании с поверхностью бетона (табл. 1) и расчетного сопротивления нормальному давлению на засоленные мерзлые грунты (табл. 2) для значений температур, прогнозируемых в соответствии с выбранным сценарием. При составлении таблиц использовались материалы из [Рекомендации..., 2001].

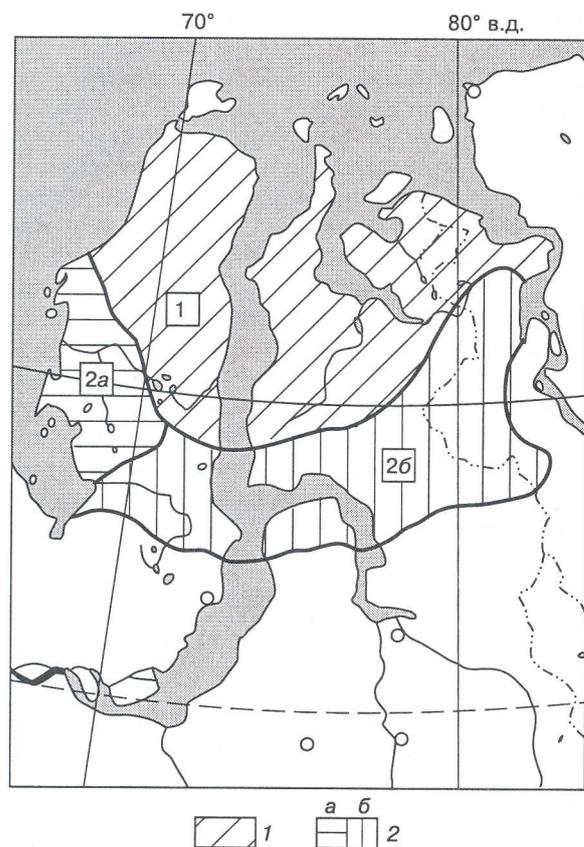


Рис. 2. Схема районов изменения прочностных свойств засоленных мерзлых грунтов на севере Западной Сибири при потеплении климата.

1 – зона повышения температуры от  $-7...-9$  до  $-2...-4$  °С, засоленность грунтов 0,5–1,5 %; 2 – зона повышения температуры от  $-5...-7$  до  $-1...-2$  °С: а – засоленность грунтов 0,5–1,5 %, б – засоленность грунтов менее 0,5 % (преимущественно около 0,25 %).

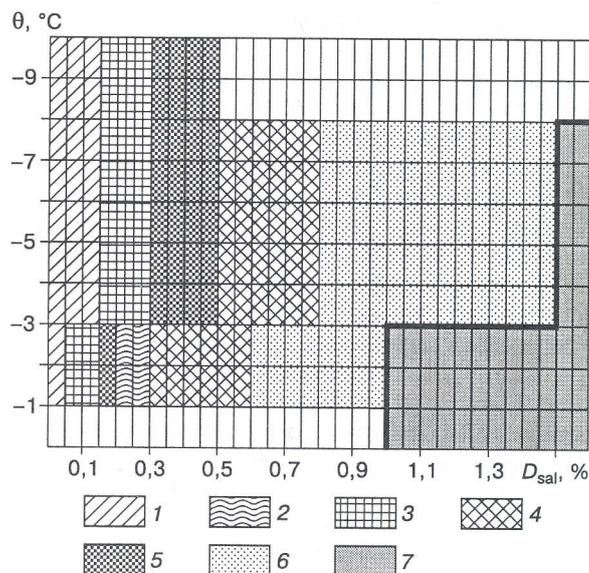


Рис. 3. Диаграмма состояния грунтов в зависимости от засоленности и температуры.

Пески: 1 – твердо-мерзлые, 2 – пластично-мерзлые; супеси: 3 – твердо-мерзлые, 4 – пластично-мерзлые; суглинки и глины: 5 – твердо-мерзлые; 6 – пластично-мерзлые; 7 – область охлажденного состояния грунтов всех типов.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

Таблица 1. Изменение прочности на срез засоленных и незасоленных мерзлых грунтов при смерзании с бетонной поверхностью для прогнозируемых температур

Грунты	Засоленность $D_{sal}$ , %	Прочность на срез $R_{ар}$ , кПа (засоленные грунты)		Относительная потеря прочности, %	Прочность на срез $R_{ар}$ , кПа (незасоленные грунты)		Относительная потеря прочности, %
		при современной температуре	при прогнозируемой температуре		при современной температуре	при прогнозируемой температуре	
Район 1							
<i>Современная температура -8 °С, прогнозируемая температура -3 °С</i>							
Пески	0,5	>55	20	>64	>380	260	>32
Супеси	0,5	>110	60	>45	>300	200	>33
Суглинки тяжелые	0,8	>105	45	>58	>300	200	>33
Район 2							
<i>Современная температура -6 °С, прогнозируемая температура -2 °С</i>							
Подрайон 2а							
Пески	0,5	55	15	73	380	200	60
Супеси	0,5	110	40	64	300	150	50
Суглинки тяжелые	0,8	105	15	86	300	150	50
Подрайон 2б							
Пески	0,3	110	30	72	380	200	60
Супеси	0,3	160	55	65	300	150	50
Суглинки тяжелые	0,3	245	60	76	300	150	50

Таблица 2. Изменение значений сопротивления нормальному давлению  $R$  на засоленные и незасоленные мерзлые грунты для прогнозируемых температур

Грунты	Засоленность $D_{sal}$ , %	Расчетное нормальное давление $R$ , кПа (засоленные грунты)		Относительная потеря прочности, %	Расчетное нормальное давление $R$ , кПа (незасоленные грунты)		Относительная потеря прочности, %
		при современной температуре	при прогнозируемой температуре		при современной температуре	при прогнозируемой температуре	
Район 1							
<i>Современная температура -8 °С, прогнозируемая температура -3 °С</i>							
Пески	0,5	410	-	-	2790	1540	45
Супеси	0,6	410	200	51	1870	1520	19
Суглинки легкие	0,8	770	230	70	1820	1100	40
Глины	0,8	930	270	69	1840	1090	41
Район 2							
<i>Современная температура -6 °С, прогнозируемая температура -2 °С</i>							
Подрайон 2а							
Пески	0,5	280	-	-	2350	1290	45
Супеси	0,5	450	220	51	1820	1330	27
Суглинки легкие	0,5	930	170	82	1600	860	46
Глины	0,8	600	160	73	1550	910	41
Подрайон 2б							
Пески	0,3	450	-	-	2350	1290	45
Супеси	0,3	1310	750	43	1820	1330	27
Суглинки легкие	0,3	1330	440	67	1600	860	46
Глины	0,3	1200	470	61	1550	910	41

В таблицах приведены значения характеристик засоленных и незасоленных грунтов для современных и прогнозируемых температур, а также относительная потеря прочности после потепления. Таблицы показывают, в частности, что при одних и тех же изменениях температур относительные изменения механических свойств засоленных грунтов значительно выше, чем у незасоленных. Причем в районах с большей засоленностью интенсивность уменьшения значений механических характеристик возрастает.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Районирование является основой регионального анализа изменения геокриологических условий. Первые шаги в области районирования территорий для анализа изменения механических свойств грунтовых массивов (для незасоленных грунтов) в связи с потеплением климата предприняты, в частности, в работах [Вялов и др., 1993; Фотиев, 2000].

Для территорий распространения мерзлых засоленных грунтов региональный прогноз изменения механических и прочностных свойств при изменении климата стал возможен только в настоящее время. Это связано с тем, что в последние годы проведено обобщение достаточного количества испытаний по определению механических характеристик грунтов различного гранулометрического состава, засоленности и температуры [Рекомендации..., 2001]. Сравнительно недавно опубликованы первые карты засоленности северных регионов [Дубиков, Иванова, 1990; 1996]. Также в недавнее время стали разрабатываться сценарии изменения климата и температуры грунтов.

Проведенное в данной работе районирование основано на конкретных материалах по принятому сценарию изменения климата и соответствующей ему динамике температуры грунтов для севера Западной Сибири. При других сценариях для той же территории конфигурация районов и их количество могут изменяться. Предложенный метод районирования применим и к другим регионам, а также к различным сценариям изменения региональных температур грунтов.

Приведенные в табл. 1 материалы показывают, что прочность на срез во втором районе при повышении температуры уменьшается интенсивнее, чем в первом, это наблюдается для всех разновидностей грунтов. Для песков в первом районе прочность на срез уменьшилась на 64 %, в подрайонах 2а и 2б – на 73 и 72 % соответственно. Для супесей в первом районе прочность на срез уменьшилась на 45 %, в подрайонах 2а и 2б – на 64 и 65 %. Для суглинков в первом районе прочность на срез уменьшилась на 58 %, в подрайонах 2а и 2б – на 86 и 76 %.

Интервал повышения температуры в обоих районах практически одинаков и составляет 4–5 °С, но во втором – диапазон температур сдвинут на 2 °С в сторону более высоких температур. Большая засоленность грунтов в подрайоне 2а сказывается незначительно (только для суглинков здесь прочность на срез уменьшилась на 10 % больше, чем подрайоне 2б).

Динамика уменьшения расчетных давлений  $R$  на мерзлые грунты несколько иная. Для супесей в первом районе расчетное давление уменьшилось на 51 %, в подрайонах 2а и 2б – на 51 и 43 % соответственно. Для суглинков в первом районе расчетное давление уменьшилось на 70 %, в подрайонах 2а и 2б – на 82 и 67 %. Для глин в первом районе расчетное давление уменьшилось на 69 %, в подрайонах 2а и 2б – на 73 и 61 %.

Здесь меньшие изменения наблюдаются в подрайоне 2б. По-видимому, это связано с меньшей засоленностью грунтов. В то же время наибольшая динамика наблюдается в подрайоне 2а, т. е. именно там, где и засоленность больше, и повышение температуры значительнее.

Усовершенствование методики в дальнейшем будет зависеть от детализации имеющихся данных по засоленности и температуре грунтов региона и их влиянию на механические характеристики. По мере учета неоднородности прочностных и деформационных характеристик засоленных грунтов при различных температурах будет возможен переход к их более точному локальному прогнозированию, учитывающему как изменение общих природных условий, так и условий, связанных с освоением и застройкой территории [Порхаев, Щелоков, 1980].

Это поможет более надежно проектировать инженерные сооружения. Напомним, что процент деформированных зданий в области распространения засоленных грунтов недопустимо высок. В пос. Амдерма они составляют около 40 %, в пос. Диксон – 33 %, в пос. Тикси – 22 %, в г. Певек – 50 % [Хименков, Брушков, 2003]. Среди причин деформаций – неточная оценка несущей способности оснований.

В дальнейшем, рассматривая влияние изменения климата на температуру грунтов, следует учитывать ее зависимость от растительного покрова. Температура мерзлых грунтов в зависимости от ландшафта при прочих равных условиях может отличаться на 5 °С.

Представительными данными наблюдений современных температурных изменений криолитозоны в арктических районах Западной Сибири являются данные геокриологического стационара Марре-Сале (Западный Ямал), на котором в течение 1978–1995 гг. проводились непрерывные наблюдения за температурой грунтов и глубиной сезонного протаивания в различных ландшафтных

условиях [Павлов, 1994, 1997; Павлов, Москаленко, 2001; Pavlov, 1996]. Показано, что на территории стационара потепление мерзлых грунтов на глубине 10 м в различных ландшафтных условиях составило 0,1–1 °С. Наибольшее потепление характерно для низкотемпературных тундровых урочищ (современная температура на глубине 10 м  $t_{10}$  равна –7 °С), наименьшее – для относительно высокотемпературных урочищ, низких пойм и долин рек ( $t_{10} = -2,5$  °С).

Для мерзлых толщ севера Западной Сибири характерно широкое распространение горизонтов минерализованных вод с отрицательной температурой – криопэггов. Криопэги препятствуют смерзанию свай с вмещающим грунтом, приводят к коррозии металлических и железобетонных конструкций, оказывают агрессивное воздействие на бетон, способствуют засолению пресных надмерзлотных вод. Формированию новых криопэггов способствуют повышение температуры пород в верхних горизонтах засоленной мерзлой толщи и изменение условий на поверхности грунта, таких как смена растительного покрова и увеличение снежного покрова зимой. На центральном Ямале в районе Бованенковского месторождения неглубоко залегающие линзы криопэггов встречаются в пределах участков, характеризующихся относительно высокой среднегодовой температурой мерзлых пород от –2 до –3 °С [Стрелецкая и др., 1996]. Засоленность глинистых грунтов здесь составляет около 1 %, песчаных – от 0,2 до 0,3 %. Эти места представляют собой обводненные поверхности, спущенные старичные озера, пойменные участки. Типичные для этих мест фоновые температуры многолетнемерзлых пород составляют –7 °С.

Прогноз развития криопэггов в связи с потеплением климата требует разработки специальной методики. Основания, содержащие криопэги, не следует считать полностью непригодными для строительства. Основные принципы сооружения фундаментов на основаниях, которые содержат криопэги, разработаны С.С. Вяловым и Н.Б. Кутвицкой. В первую очередь это принцип сооружения фундамента из упрочненного мерзлого грунта [Кутвицкая, 1990].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При потеплении климата изменения в рассматриваемом регионе будут проявляться не только в резкой активизации экзогенных мерзлотных процессов, но и в значительном уменьшении несущей способности грунтов.

Особенно важно учитывать это при формировании природно-технических систем, где устойчивость техногенной составляющей зависит в основном от прочностных характеристик грунтового массива.

Проблема изменения строения и свойств засоленных мерзлых грунтов под воздействием потепления климата разработана недостаточно и, очевидно, отстает от потребностей практики.

Многие сооружения, построенные к настоящему времени, спроектированы в соответствии с современными природными условиями без учета возможного повышения температуры грунтов и изменения их механических характеристик. Неблагоприятные условия здесь возникнут задолго до того как начнется таяние мерзлых пород. Одновременно следует ожидать развития криопэггов со всеми неблагоприятными последствиями, связанными с этим.

К настоящему времени накоплено достаточно информации по распространению засоленных мерзлых грунтов, их свойствам в зависимости от состава и температуры. Это позволяет проводить обоснованный региональный прогноз изменения механических и прочностных свойств мерзлых грунтов при различных сценариях потепления климата для регионов с различными типами засоления.

В настоящей работе сделан шаг к разработке такого метода. Дальнейшее ее развитие авторы связывают, в частности, со следующими задачами:

- использование необходимых данных, позволяющих выполнить прогнозные оценки, которые наряду с засоленностью и температурой грунтов учитывают ландшафт и его изменения;

- выполнение более полного прогноза механических характеристик мерзлых грунтов с учетом изменения засоленности в прогнозируемое время и экспериментальных данных по их механическим и прочностным свойствам для более широкого диапазона отрицательных температур;

- разработка специального метода прогноза изменения инженерно-геологических свойств грунтовых массивов в связи с развитием криопэггов при потеплении климата;

- разработка прогноза изменения прочностных и деформационных свойств грунтов, связанных с динамикой их температур при хозяйственном освоении территории.

Авторы пользуются случаем выразить глубокую признательность В.И. Аксенову за обсуждение работы и полезные рекомендации по использованию результатов исследований.

### Литература

- Велли Ю.Я. Устойчивость зданий и сооружений в Арктике. Л., Стройиздат, 1973, 152 с.
- Велли Ю.Я. Исследования засоленных вечномерзлых грунтов Арктического побережья // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, с. 9–20.
- Вялов С.С., Фотиев С.М., Герасимов А.С., Золотарь А.И. Обеспечение несущей способности вечномерзлых грунтов

- в условиях потепления климата // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1993, № 6, с. 2–6.
- Дубиков Г.И., Иванова Н.В.** Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, с. 3–9.
- Дубиков Г.И., Иванова Н.В.** Состояние и засоленность грунтов прибрежных участков Карского моря // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 2. М., Изд-во МГУ, 1996, с. 213–222.
- Ершов Э.Д., Козлов А.Н., Пармузин С.Ю., Чепурнов М.Б.** Деградация криолитозоны России при глобальном потеплении климата // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 1. М., Изд-во МГУ, 1996, с. 319–327.
- Кутвицкая Н.Б.** Фундаменты из упрочненного мерзлого грунта // Проблемы механики грунтов и инженерного мерзлотоведения. М., Стройиздат, 1990, с. 146–155.
- Миренбург Ю.С., Кондратьев С.Д., Фокин В.А.** К методике оценки прочностных и реологических свойств засоленных мерзлых грунтов // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, с. 90–98.
- Павлов А.В.** Прогноз эволюции вечной мерзлоты в зависимости от глобальных изменений современного климата // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и экологии. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1994, с. 135–151.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 1, с. 47–58.
- Павлов А.В., Москаленко Н.Г.** Термический режим почвы на севере Западной Сибири // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 2, с. 11–19.
- Пекарская Н.К., Чапаев А.А.** Влияние засоленности мерзлых грунтов на их деформативные свойства // Инженерное мерзлотоведение. М., Наука, 1979, с. 5–19.
- Порхаев Г.В., Щелоков В.К.** Прогнозирование температурного режима вечномерзлых грунтов на застраиваемых территориях. Л., Стройиздат, 1980, 112 с.
- Рекомендации по определению прочности мерзлых грунтов с морским типом засоления / Аксенов В.И. и др.** Под ред. В.В. Баулина, Г.И. Дубикова. М., Изд-во ФГУП ПНИИИС, 2001, 41 с.
- СНиП 2.02.04-88.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Госстрой СССР, 1990, 52 с.
- Стрелецкая И.Д., Иванова И.Д., Ривкин Ф.М.** Картирование территории Бованенковского ГКМ по условиям распространения криопэгов (полуостров Ямал) // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 2. М., Изд-во МГУ, 1996, с. 149–153.
- Фотиев С.М.** Возможные изменения геотемпературного поля криогенной области России при глобальном потеплении климата // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 14–29.
- Хименков А.Н., Брушков А.В.** Океанический криолитогенез. М., Наука, 2003, 336 с.
- Pavlov A.V.** Permafrost-climating monitoring of Russia: analysis of field data and forecast // Polar Geography, 1996, vol. 20, No. 1, p. 44–64.

Поступила в редакцию  
31 мая 2004 г.