



ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВЛАГИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ УРАЛЬСКОГО БЕРЕГА БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ

THERMAL PROPERTIES AND PHASE COMPOSITION OF THE WATER IN FROZEN SOILS OF THE BAYDARATSKAYA BAY URAL COAST

АЛЕКСЮТИНА Д.М.

Аспирант кафедры геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e21tb@mail.ru

МОТЕНКО Р.Г.

Старший научный сотрудник кафедры геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., доцент, rmotenko@mail.ru

ALEKSYUTINA D.M.

Postgraduate student of geocryology department, geology faculty, Lomonosov Moscow State University, e21tb@mail.ru

MOTENKO R.G.

Senior researcher of geocryology department, geology faculty, Lomonosov Moscow State University, Ph.D. (candidate of geological and mineralogical sciences), rmotenko@mail.ru

Ключевые слова:

мерзлые грунты; теплофизические свойства; фазовый состав; незамерзшая вода; коэффициент теплопроводности; коэффициент температуропроводности; теплоемкость; температура начала замерзания; криогенное строение; Байдарацкая губа; Уральский берег.

Key words:

frozen soils; thermal properties; phase composition; unfrozen water; thermal conductivity; thermal diffusivity; heat capacity; freezing temperature; cryogenic structure; Baydaratskaya Bay; Ural Coast.

Аннотация

В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований состава, строения и свойств мерзлых грунтов на Уральском берегу Байдарацкой губы. Обсуждаются и анализируются выявленные закономерности изменений теплофизических свойств и фазового состава влаги мерзлых грунтов разного гранулометрического и химико-минерального состава. Проводится сопоставление данных, полученных в полевых и лабораторных условиях.

Введение

Прибрежная зона арктических морей является очень динамичной системой в связи с развитием там многолетнемерзлых грунтов. В настоящее время существуют проблемы изучения взаимодействия вечномерзлых пород суши с морем при освоении северных территорий, например при строительстве береговых сооружений, подводных трубопроводов и пр. Поэтому оценка разрушения берега является достаточно актуальной задачей.

Представленная в настоящей статье работа является частью международного проекта SAMCoT (Sustainable Arctic Marine and Coastal Technology), который предусматривает многолетние многоплановые исследования в Арктике, включающие в том числе прогноз разрушения берегов. Составление прогноза развития этих процессов невозможно без знаний состава и свойств мерзлых пород. В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств и фазового состава влаги мерзлых грунтов.

Исследования проводились на побережье Байдарацкой губы Карского моря (рис. 1). Для данного района характерны суровая продолжительная зима с длительным залеганием снежного покрова, короткие переходные сезоны (весна и осень), короткое холодное лето, поздние весенние и ранние осенние заморозки. Средняя годовая температура воздуха имеет отрицательные значения ($-7 \div -10^\circ\text{C}$). Исследуемая территория относится к району сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Сплошность криолитозоны нарушается с поверхности несквозными подозерными и подрусловыми таликами, а по разрезу — линзами и массивами охлажденных пород и криопэггов. На пляжах и лайдах мерзлые грунты по разрезу чередуются с охлажденными. Мощность мерзлых пород в пределах пляжей

Abstract

The paper considers experimental results on the composition, structure and properties of the frozen soils at the Ural Coast of the Baydaratskaya Bay. Thermal properties, phase composition of water of frozen soils with different grain-size, chemical-mineral composition and comparison of field and laboratory data are discussed and analyzed.



и береговых баров составляет 2–8 м. На лайдах она меняется от 0 м на заливаемых во время приливов участках до 5–10 м и более в приподнятых местах. Под мерзлыми грунтами залегают охлажденные отложения, которые подстилаются горизонтом реликтовых мерзлых толщ. В пределах первых террас их мощность возрастает до 40–100 м, ниже залегает регионально выдержанный горизонт грунтов мощностью 100–150 м, охлажденных до минус 1 — минус 3°C. Наиболее низкая среднегодовая температура грунтов свойственна выпуклым обдаваемым ветром участкам суши, на которых плотность снежного покрова максимальна, а его мощность незначительна. В их границах на склонах и в прибрежной части первой морской террасы среднегодовая температура грунтов составляет минус 6,2 — минус 7,0°C. В понижениях террас и лайд с повышением снегонакопления температура грунтов изменяется от минус 2,4 до минус 4,7°C. Глубина сезонного протаивания грунтов изменяется от 0,2 до 1,5 м [1, 8].

В криолитозоне берега морей подвергаются воздействию двух основных процессов — термоденудации и термоабразии [7]. По мнению некоторых исследователей таких территорий, разрушение берегов происходит преимущественно вследствие термоденудации. Основная часть обломочного материала (70–75%) поступает в море в рыхлом состоянии под воздействием гидродинамических факторов, и только 25–30% приходится на размыв мерзлой толщ. За короткий период теплого времени года оттаявший материал накапливается у подножий береговых откосов, а волны и течения в периоды осенних штормовых нагонов уносят его в море, возобновляя тем самым новый цикл разрушения [8, 9].

На исследуемой территории были выбраны два участка. Основное различие между ними связано с разной высотой разрушающегося берегового уступа (4–6 и 10–15 м) и составом слагающих его пород. Летом 2012 г. исследования проводились лишь на одной площадке, на которой выделяются несколько геоморфологических уровней: морская терраса, пляж, лайда. Высота морской террасы составляет 4–5 м. Поверхность террасы неровная, осложнена обширными озерными котловинами на разных стадиях развития. Разрез представлен переслаиванием суглинков, супесей и песков. Лайды представляют собой обширные сильно заболоченные и заозеренные пространства, подвергающиеся действию приливов и отливов. Пляж представляет собой ровную слабонаклонную песчаную поверхность, полностью лишенную растительности. Среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов составляет минус 4,7°C.

Методы и объекты исследований

В ходе полевых работ на различных участках морской террасы было пробурено три скважины глубиной от 2,0 до 6,5 м. Первая и вторая скважины бурились близко друг от друга (рис. 2) и располагались между ледяными жилами, а третья была расположена над ледяной жилой, вскрытой в береговом обрыве. Весь извлекаемый керн (рис. 3) описывался и герметично упаковывался. Всего было отобрано 29 мерзлых монолитов, которые помещались в холодильную камеру, а после окончания буровых работ транспортировались в мерзлом состоянии для дальнейших лабораторных ис-



Рис. 1. Космический снимок и положение на карте территории исследований (выделена красным цветом) (<http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/50027>, <http://maps.yandex.ru>)



Рис. 2. Бурение скважины № 2 (фото С. Булдовича)

следований. Кроме того, было отобрано восемь образцов нарушенного сложения, пять из которых отбирались с эрозионного склона морской террасы.

Влажность и плотность взятых образцов изменялись в большом диапазоне (см. таблицу): влажность варьировала от 16,4 до 204,3%, плотность — от 1,15 до



Рис. 3. Керн из скважины № 1. Хорошо видны ледяные шлиры (фото Д. Алексютиной)

2,02 г/см³. Большая часть грунтов предположительно имеет озерно-болотное происхождение. Образцы, взятые с глубины более 5,0 м, имеют, по-видимому, морской генезис. Для них была оценена засоленность D_{sal} изменяющаяся от 0,7 до 1,0%.

Теплофизические свойства грунтов определялись в полевых и лабораторных условиях. Полевые определения коэффициента теплопроводности (λ) проводились на эрозионном склоне первой морской террасы с помощью прибора МИТ-1. Принцип действия этого

прибора основан на измерении изменения температуры зонда за определенное время при его нагреве с постоянной мощностью [5]. Рабочий диапазон температур составляет от минус 10 до плюс 50°C, диапазон измерения теплопроводности равен 0,03–2,00 Вт/(м·К). Относительная погрешность составляет $\pm 7,0\%$. Зонд имеет диаметр 6,0 мм и длину 12 мм. Для обеспечения максимального теплового контакта с массивом грунта он смазывается вазелином. Время выдержки зонда перед измерением — не менее 2 ч. Измерения коэффи-

Таблица

Характеристика образцов								
Место отбора образца	№ обр.	Глубина, м	Грунт (геол. индекс IвQIV)	Криогенная текстура	Влажность $W_{юр}$ %	Плотность ρ , г/см ³	Льдистость i , д.е.	
Скважина №	1	1*	0,15–0,28	суглинок	массивная	46,2	1,55	0,49
		2	0,45–0,50	супесь		27,9	1,86	0,33
		3	0,50–0,60	торф	порфировая	76,4	1,43	0,63
		4*	0,60–0,67	супесь заторфованная		86,2	1,45	0,69
		5	0,70–0,80	супесь	порфировая	90,3	1,37	0,66
		6*	0,80–0,90			107,4	1,39	0,76
		7	0,90–1,00			83,9	1,39	0,65
		8*	1,00–1,10	суглинок	атакситовая	204,3	1,15	0,83
		9	1,10–1,20			порфировая	82,3	1,40
		10	1,20–1,25	супесь	порфировая	159,1	1,20	0,79
		11*	1,25–1,38			161,7	1,24	0,83
		12	1,55–1,65		линзовидная	62,6	1,51	0,58
		13*	1,70–1,80			89,1	1,65	0,84
		14	1,80–1,90			24,7	1,91	0,34
	15*	1,50–1,65	порфировая			116,2	1,31	0,73
	2	16	2,00–2,20	супесь	линзовидная	40,8	1,69	0,48
		17	2,50–2,60		массивная	41,9	1,68	0,46
		18*	3,15–3,30		линзовидная	36,4	1,77	0,42
		19*	0,30–0,45		суглинок	массивная	48,1	1,61
	3	20	0,50–0,60	торф	порфировая	148,4	1,22	0,77
		21*	1,30–1,45	супесь	массивная	72,0	1,51	0,68
		22	1,90–2,15			43,0	1,67	0,47
		23*	2,80–3,05	супесь с торфом	слоистая	80,2	1,47	0,70
		24	3,30–3,60	супесь	линзовидная	26,9	1,87	0,35
		25	3,60–3,85	супесь	массивная	32,9	1,78	0,39
		26*	3,95–4,05	песок	линзовидная	24,9	1,92	0,40
		27	4,05–4,30	песок	массивная	21,3	1,97	0,39
		28	4,55–4,80	супесь		29,4	1,83	0,37
		29*	5,00–5,20	супесь		33,4	1,76	0,34
		30*	5,20–5,30	суглинок	-	40,0	1,30	0,26
		31*	5,40–5,55	супесь	-	32,9	1,45	0,25
		32*	6,25–6,30	песок	-	18,6	1,55	0,21
Эрозионный склон		33*	0,40–0,60	супесь	-	17,6	2,02	0,30
	34*	0,10–0,30	торф	-	114,2	1,19	0,65	
	35*	0,20–0,30		-	531,	0,87	0,78	
	36*	1,00–1,20	песок	-	16,4	1,69	0,25	
	37*	1,30–1,50		-	17,5	2,03	0,32	

* Монолиты, которые использовались для проведения экспериментальных исследований теплофизических свойств и фазового состава влаги мерзлых грунтов.



циента теплопроводности проводились при положительных и отрицательных температурах. В точках опробования устанавливались влажность и плотность, а также отбирались образцы для лабораторных исследований (см. таблицу, образцы № 33–37).

В лаборатории теплофизические свойства мерзлых грунтов определялись методом регулярного режима первого рода [5]. Этот метод основан на том, что при охлаждении или нагревании тела в среде с постоянной температурой все его точки стремятся принять температуру данной среды. Теория метода строго обоснована для случая, когда в процессе эксперимента в образце отсутствуют источники поглощения (выделения) тепла. Достоинствами метода являются простота технического осуществления, малое время эксперимента и вследствие этого возможность серийных исследований. Эксперименты проводятся с двойной повторностью на двух параллельных образцах, что позволяет повысить точность определения искомых характеристик. Различие результатов параллельных определений не должно превышать $\pm 5\%$. В противном случае проводятся дополнительные эксперименты, что позволяет получать каждую экспериментальную точку путем осреднения результатов 4–6 опытов. Для исследования образцы вырезались из монолитов мерзлого грунта специальными металлическими формами диаметром $d = 3$ см и высотой $h = 4$ см (для песков $d = 4$ см и $h = 6$ см). В геометрическом центре образца устанавливался рабочий спай хромель-копелевой термопары. Образцы герметизировались и выставлялись при отрицательной температуре в течение суток, а затем проводились эксперименты.

Эти же образцы использовались для определения температуры оттаивания (замерзания) t_{bf} криоскопическим методом [6]. Данный метод основан на выделении скрытой теплоты кристаллизации (или же поглощении теплоты плавления). Цикл оттаивания проводится в воздушной среде при комнатной температуре. После оттаивания образцы разделяются и устанавливается их плотность и влажность.

Теплоемкость C в данных исследованиях рассчитывалась по известным аддитивным соотношениям через удельные доли составляющих породу компонентов. Для расчетов использовались экспериментально полученные значения влажности и содержания незамерзшей воды. Значения теплоемкости воды, льда и грунта брались по литературным данным [5, 7].

Содержание незамерзшей воды (W_w) в мерзлых образцах определялось при комбинированном использовании контактного и криоскопического методов [2, 6].

Контактный метод основан на принципе динамического равновесия между льдом, незамерзшей водой и паром (принципе Н.А. Цытовича) [5]. Достоинствами этого метода являются простота, доступность, высокая производительность и широкий температурный диапазон применения. Для получения значений W_w при заданной температуре изготовлялось по две-три пластины размером $30 \times 40 \times 5$ мм. Они высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Параллельно приготавливались пластины из льда аналогичных размеров.

Пластины выдерживались в холодильной камере, после чего собирались вместе так, чтобы образовалась слоистая кассета и каждая сухая пластина контактиро-

вала с двумя пластинами льда. Образцы закладывались в холодильные шкафы с заданными значениями отрицательных температур ($-2 \div -20,5^\circ\text{C}$), а через несколько дней разделялись и высушивались.

Криоскопический метод определения фазового состава влаги основан на зависимости температуры начала замерзания породы от ее влажности. Эксперимент заключается в том, чтобы точно установить эту температуру и ее зависимость от влажности грунта. При этом надо учитывать, что содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте при температуре t_o равно той влажности грунта, которой соответствует температура его замерзания или оттаивания. Следует подчеркнуть, что для мерзлых грунтов нужно проводить определение именно температуры оттаивания, чтобы избежать погрешностей, связанных с переохлаждением [2, 6]. Для незасоленных пород температурной границей применимости данной методики является значение температуры от минус 1 до минус 3°C . Для тонкодисперсных и засоленных грунтов эта граница сдвигается в область более низких температур. При исследовании засоленных грунтов температурный интервал, в котором происходит вымерзание (оттаивание) порового раствора, увеличивается с ростом концентрации последнего. Точность определения температуры оставляет $\pm 0,03^\circ\text{C}$.

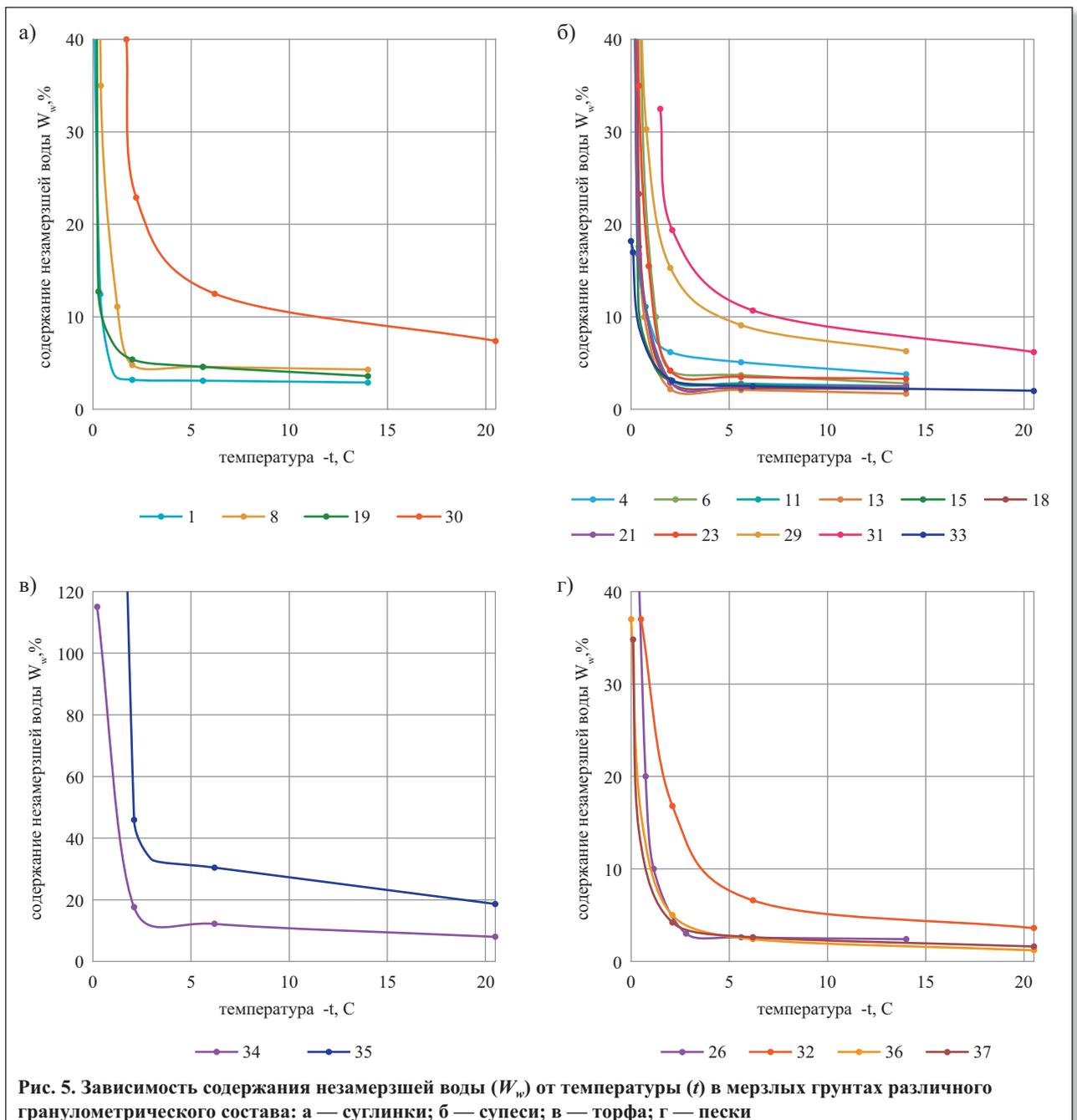
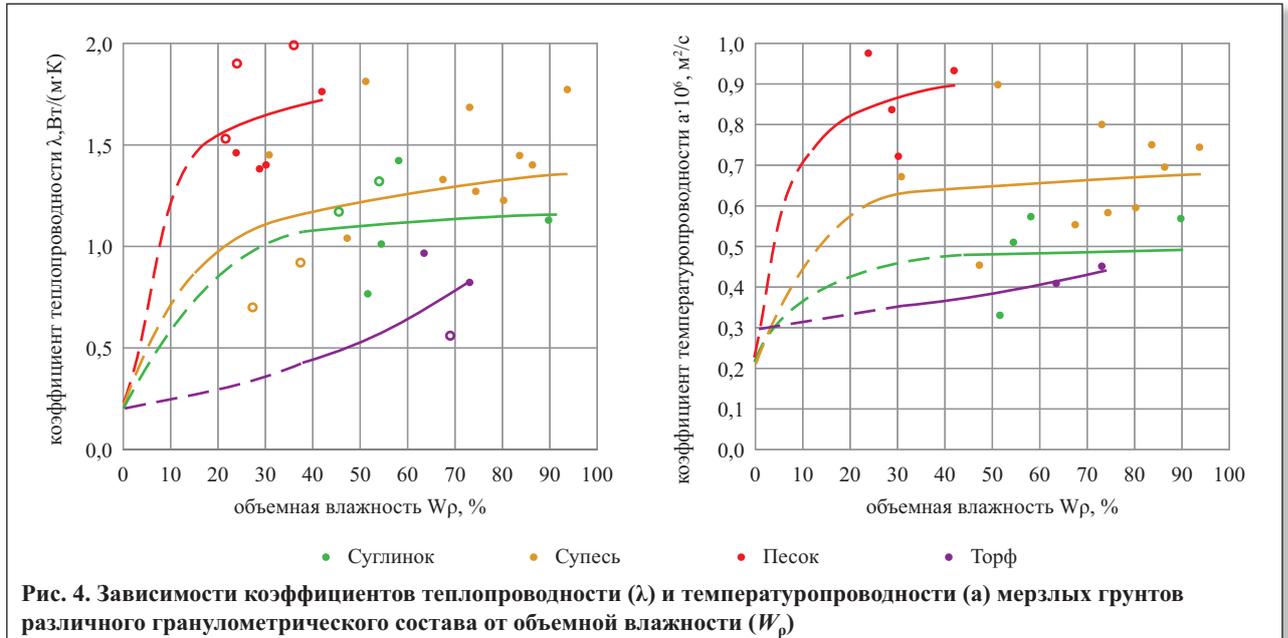
Образцы грунта с заданной влажностью промораживаются при минус 20 — минус 30°C . Заданная скорость промерзания обеспечивает массивную криогенную текстуру образцов. Температурным датчиком служит хромель-копелевая термопара. После окончания эксперимента образцы разделяются на две части и высушиваются при 105°C . Затем весовым методом определяется их влажность.

Результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств

Лабораторные исследования проводились на наиболее типичных для данного района образцах естественного сложения, приготовленных из монолитов, отобранных при бурении, а также на образцах нарушенного сложения, взятых на эрозионном склоне в точке полевых определений коэффициента теплопроводности. На рисунке 4 представлены результаты исследования теплопроводности λ и температуропроводности a мерзлых грунтов различного гранулометрического состава. Влажность и плотность образцов изменяются в широком диапазоне (см. таблицу), поэтому результаты экспериментальных исследований были обобщены в зависимости от объемной влажности $W_p = W \cdot \rho_d / \rho_i$ (где W — весовая влажность, %; ρ_d , ρ_i — соответственно плотность скелета грунта и льда, $\text{кг}/\text{м}^3$).

Незатемненными точками на графике (см. рис. 4) показаны результаты полевых исследований. Из-за недостаточности данных во всем диапазоне влажности пунктиром показан предполагаемый ход зависимостей. Для всех грунтов для коэффициента теплопроводности величина достоверности аппроксимации $R^2 > 0,8$.

В мерзлой супеси величина λ изменяется от 1,04 до 1,81 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в диапазоне изменения объемной влажности от 30 до 94%. Суглинок представлен малым количеством исследуемых образцов. Значения λ для мерзлых суглинков изменяются от 0,77 до 1,42 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$





при изменении W_p от 55 до 90%. В монографии «Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал» [4] приводятся данные по теплофизическим характеристикам засоленных и незасоленных грунтов региона, схожего с районом исследований. Коэффициент теплопроводности мерзлых песчано-глинистых грунтов изменяется в диапазоне от 1,12 до 2,62 Вт/(м·К). Столь большой разброс значений связан с «пестротой» литологического состава верхних горизонтов криогенных толщ [4].

Низкие значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности в мерзлых грунтах различного гранулометрического состава в большинстве случаев связаны с их заторфованностью и засоленностью и, соответственно, с большим содержанием незамерзшей воды. Сопоставление данных, полученных в лабораторных и полевых условиях, показало различия около 12–15%.

Результаты исследований фазового состава влаги мерзлых грунтов

Были проведены исследования фазового состава влаги мерзлых грунтов, отобранных из скважин № 1, 2, 3 и с эрозионного склона. На рисунке 5 представлены результаты исследования W_w в зависимости от температуры для грунтов различного гранулометрического состава.

Проанализируем полученные результаты по содержанию незамерзшей воды при среднегодовой температуре грунтов минус 4,7°C. В мерзлых незасоленных суглинках (см. рис. 5, а) оно изменяется от 3 до 5%, в засоленных суглинках с глубины 5,2–5,3 м его максимальное значение составляет 14%. В мерзлых незасоленных супесях W_w изменяется от 2 до 5%, в засоленных — от 10 до 13% (см. рис. 5, б). В торфах количество незамерзшей воды изменяется в большом диапазоне — от 15 до 33%. Столь большие различия связаны с зольностью и степенью разложения торфов (см. рис. 5, в). Для незасоленных песков содержание незамерзшей воды составляет около 1%, а для засоленных — около 5% (см. рис. 5, г).

По литературным данным [3, 4, 8], содержание незамерзшей воды при той же температуре в незасоленных супесях изменяется от 1,5 до 3,5%, а в засоленных — от 3 до 11%. Содержание незамерзшей воды при температуре минус 4,7°C в незасоленных и слабозасоленных пылеватых песках Бованенковского месторождения [4] изменяется от 1 до 2,2%, а в засоленных (при близком значении засоления D_{sal}) оно увеличивается до 4%. Небольшой разброс данных по фазовому составу влаги связан с природным разнообразием мерзлых грунтов.

Для практического использования было проведено обобщение полученных результатов исследования фазового состава влаги для мерзлых грунтов разного гранулометрического состава (рис. 6). Были выявлены диапазоны изменения в них количества незамерзшей воды.

Содержание незамерзшей воды для всех исследуемых грунтов изменяется в большом диапазоне из-за различий в дисперсности и химико-минеральном составе. Максимальные значения W_w характерны для торфов, минимальные — для незасоленных песков.

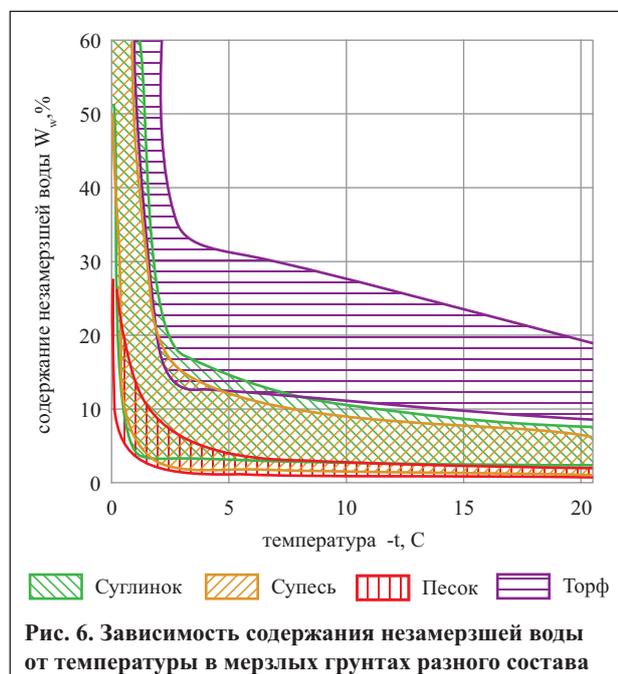
Полученные данные по свойствам, криогенному строению и составу отобранных образцов были проанализированы по глубине скважин № 1, 2 и 3. Посколь-

ку скважины № 1 и 2 располагались в 2 м друг от друга, для них была построена одна сводная колонка (рис. 7).

На рисунке 7 видно, что у суглинка с атакситовой криогенной текстурой влажность максимальна и составляет 200%, ниже по разрезу влажность уменьшается. Плотность, наоборот, в более дисперсных грунтах имеет меньшие значения. Содержание незамерзшей воды изменяется от 2 до 5%, максимальное значение W_w (около 5%) — в заторфованной супеши и в суглинке. Теплоемкость C непосредственно связана с дисперсностью и фазовым составом влаги и в мерзлых грунтах изменяется от 1350 до 1750 Дж/(кг·К). Наибольшие значения — у суглинка и заторфованной супеши. Увеличение W_w в грунте приводит к понижению λ из-за уменьшения количества более теплопроводного льда. Теплопроводность увеличивается с глубиной до 1,8 Вт/м·К. Температура начала замерзания грунтов (t_{bf}) примерно одинакова и равна минус 0,2°C, кроме случая с супестью с глубины 3,2 м, для которой $t_{bf} = -0,48^\circ\text{C}$ (такое значение связано с небольшим засолением данного грунта, т.е. $D_{sal} = 0,14\%$).

На рисунке 8 представлены состав, строение и свойства грунтов скважины № 3. Торф имеет максимальную влажность 148% и минимальную плотность 1210 кг/м³ (не считая ледяной жилы под ним). Естественная плотность грунта изменяется с глубиной в среднем от 1500 до 2000 кг/м³. Количество незамерзшей воды практически не меняется до глубины 5 м, а ниже видно его значительное увеличение (до 14%). Температура замерзания изменяется от минус 0,1 до минус 0,2°C. Глубже 5 м в связи с засолением значения t_{bf} понижаются от минус 0,5°C до минус 1,7°C. Теплофизические характеристики также изменяются с глубиной. Максимальные значения λ характерны для песка. Уменьшение коэффициента теплопроводности грунтов на глубине более 5 м связано с высоким содержанием в них незамерзшей воды. Теплоемкость также понижается с глубиной, т.к. песчаные грунты имеют наименьшие значения C — от 920 до 1000 Дж/(кг·К).

При сравнении результатов исследований по скважинам № 1 и 2 с данными по скважине № 3 видно,



что литологический состав пород в последней более однородный и песчаный. В первой и второй скважинах грунты до глубины 1,7 м имеют следующие средние значения физических свойств: влажность около 100%, плотность 1400 кг/м³. Ниже по разрезу влажность грунтов понижается до 35%, плотность увеличивается до 1750 кг/м³. В третьей скважине достаточно сильные изменения физических свойств наблюдаются на глубине 3,2 м от поверхности земли. В верхней части средняя влажность грунта составляет около 78%, плотность — 1500 кг/м³, а ниже влажность равна 30% при среднем значении плотности 1750 кг/м³.

Полученные результаты слегка отличаются от данных, представленных в монографии «Инженерная геология России» [3], в соответствии с которыми наиболее часто встречаемые значения влажности грунтов для рассматриваемого региона значительно ниже и изменяются от 20 до 30%, а средние значения плотности, наоборот, выше и варьируют от 1700 до 2100 кг/м³.

Выводы

В данной работе определены свойства пород различного гранулометрического состава в диапазонах наблюдавшихся изменений их влажности и плотности. Диапазон влажности для суглинков составляет от 40 до 204%, для супесей — от 25 до 162%, для торфов — от 114 до 531%, для песков — от 17 до 25%. Плотность суглинков изменяется от 1150 до 1610 кг/м³, супесей — от 1200 до 1900 кг/м³, торфов — от 870 до 1200 кг/м³, песков — от 1550 до 2030 кг/м³. Значение объемной влажности W_p суглинков варьирует от 52 до

90%, супесей — от 31 до 94%, торфов — от 63 до 74%, песков — от 24 до 42%.

Проведены экспериментальные исследования, получены значения и выявлены закономерности изменений теплофизических характеристик мерзлых пород. Проведено обобщение полученных данных по определению коэффициентов теплопроводности и температуропроводности в зависимости от объемной влажности. Для суглинков коэффициент теплопроводности варьирует от 0,77 до 1,42 Вт/м·К, для супесей — от 1,04 до 1,81 Вт/м·К, для песков — от 1,38 до 1,76 Вт/м·К, для торфов — от 0,56 до 0,97 Вт/м·К. Коэффициент температуропроводности суглинков изменяется от $0,331 \cdot 10^{-6}$ до $0,573 \cdot 10^{-6}$ м²/с, супесей — от $0,454 \cdot 10^{-6}$ до $0,898 \cdot 10^{-6}$ м²/с, песков — от $0,722 \cdot 10^{-6}$ до $0,933 \cdot 10^{-6}$ м²/с, торфов — от $0,409 \cdot 10^{-6}$ до $0,554 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Теплоемкость суглинков изменяется от 1280 до 1730 Дж/(кг·К), супесей — от 1000 до 1600 Дж/(кг·К), песков от 870 до 1000 Дж/(кг·К), торфов — от 1980 до 2100 Дж/(кг·К).

Проведено сопоставление результатов, полученных при полевых и лабораторных исследованиях. Разброс значений составил около 12–15%, что связано с природной изменчивостью грунтов.

Выполнены экспериментальные исследования и получены зависимости содержания незамерзшей воды (W_w) во всех исследуемых грунтах в зависимости от температуры (в диапазоне отрицательных температур от 0 до минус 20°C). Проведено обобщение полученных результатов для грунтов разного гранулометрического и химико-минерального состава. Максимальные значения W_w получены для засоленных грунтов. Наибольший диапазон изменений содержания незамерзшей воды выявлен в торфах.

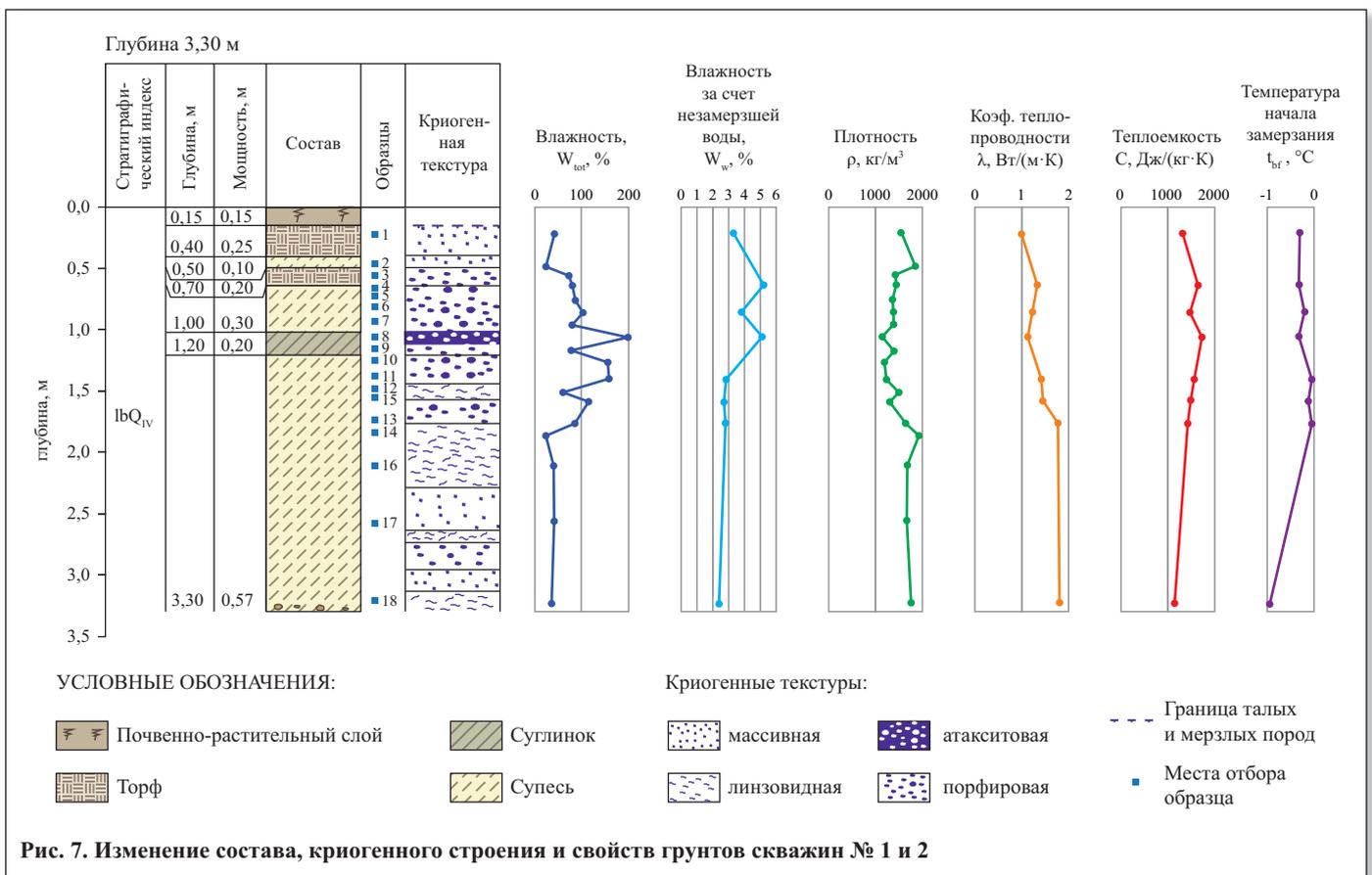
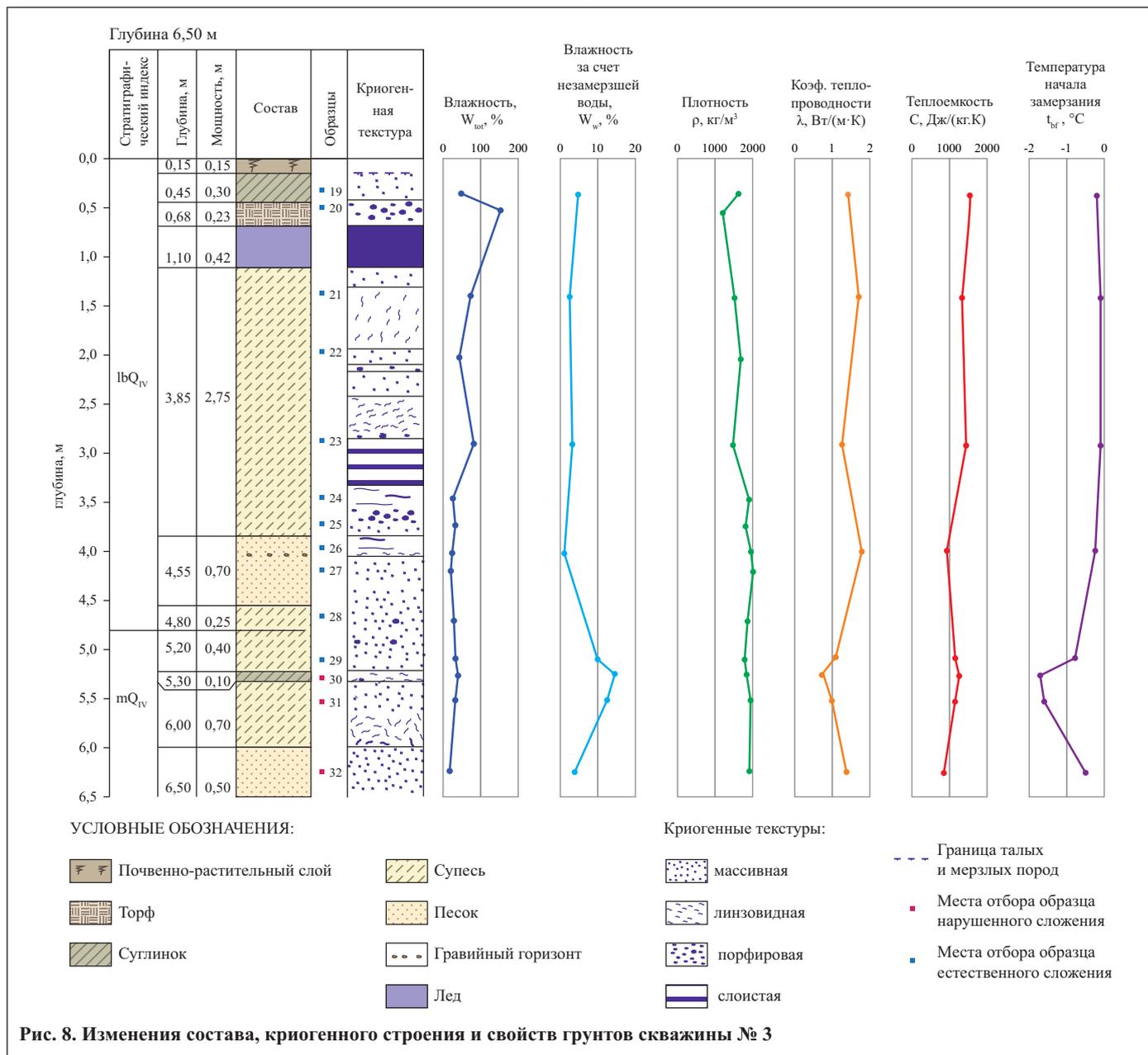


Рис. 7. Изменение состава, криогенного строения и свойств грунтов скважин № 1 и 2



Определена температура начала замерзания грунтов t_{bf} : $-1,7^{\circ}\text{C}$ для суглинков; $-1,6^{\circ}\text{C}$ для супесей; $-0,5^{\circ}\text{C}$ для песков. Самые низкие значения t_{bf} характерны для засоленных грунтов. Изучены состав, строение и свойства грунтов по скважинам, выявля-

ны изменения их теплофизических характеристик по глубине и сопоставлены с криогенным строением, литологией пород и их физическими свойствами. Полученные данные слегка отличаются от литературных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геокриология СССР. Западная Сибирь. М.: Недра, 1989.
2. Еришов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Геозкология. 1999. № 3. С. 232–242.
3. Инженерная геология России. Т. 1: Грунты России / под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011. 672 с.
4. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 т. Т. 2: Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО «Газпром Экспо», 2013. 424 с.
5. Методы геокриологических исследований: учебное пособие / под ред. Э.Д. Еришова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.
6. Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Результаты экспериментальных исследований фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Материалы 1-й Конференции геокриологов России. Кн. 2. М., 1996. С. 287–291.
7. Основы геокриологии. Ч. 6: Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне / под ред. Э.Д. Еришова. М.: Изд-во МГУ, 2008. 766 с.
8. Природные условия Байдарецкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал — Центр / В.В. Баулин, Г.И. Дубиков, И.А. Комаров, М.М. Корейша, С.Ю. Пармузин. М.: ГЕОС, 1997. 432 с.
9. Совершаев В.А. Задачи изучения морских берегов в криолитозоне в целях рационального хозяйственного освоения // Материалы 1-й Конференции геокриологов России. Кн. 3: Динамическая геокриология. М., 1996. С. 494–503.