

## СОСТАВ И СВОЙСТВА ОТЛОЖЕНИЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ЛАГУН БЫКОВСКОГО ПОЛУОСТРОВА

**В.Г. Чеверев, И.Ю. Видяпин, В.Е. Тумской**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т,  
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия, water@geol.msu.ru*

Статья содержит фактические данные о составе, криогенном строении и теплофизических свойствах образцов талых и мерзлых пород природного сложения, отобранных из отложений термокарстовых лагун Быковского полуострова (Ивашкина лагуна, район пос. Тикси).

*Быковский полуостров, термокарстовые лагуны, состав и свойства пород*

## COMPOSITION AND CHARACTERISTICS OF THE THERMOKARST LAGOON DEPOSITS, BYKOVSKY PENINSULA

**V.G. Cheverev, I. Yu. Vidyapin, V.E. Tumskey**

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,  
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, water@geol.msu.ru*

The paper contains data on the composition, cryogenic structure and thermophysical properties of frozen and thawed samples selected from bottom deposits of thermokarst lakes and lagoons on Bykovsky peninsula (Ivashkina lagoon, Tiksi region).

*Bykovsky peninsula, thermokarst lagoons, ground composition and properties*

### ВВЕДЕНИЕ

Существование субэаральных типов отложений на шельфе восточно-арктических морей предполагалось давно [Клюев, 1966; Арэ, 1978]. Позднее [Романовский и др., 1999] была подробно разработана новая концепция развития шельфов морей Восточной Арктики в конце позднего неоплейстоцена и в голоцене. Одним из наиболее важных моментов этой концепции является признание опережающего развития озерного термокарста на осушенной части шельфа до его затопления морем в ходе поздненеоплейстоцен-голоценовой трансгрессии. Результатом такой последовательности развития процессов стало формирование специфических образований, названных термокарстовыми лагунами. Они представляли собой затопленные морем термокарстовые котловины, находившиеся на разной стадии развития. При этом расширялся комплекс взаимосвязанных геологических, геокриологических, геохимических и биологических процессов, приводивший к существенному изменению характеристик природной среды в пределах затопленных котловин. В настоящее время образования термокарстовых лагун почти не происходит из-за относительной стабильности уровня моря. Однако подобные формы существуют на южном берегу Быковского полуострова вблизи пос. Тикси. Отложения одной из них, Ивашкиной

лагуны, изучались весной 2004 г. путем бурения со льда с полным отбором керна для дальнейших лабораторных исследований [Тумской, Борцов, 2008].

В настоящей статье изложена часть опытных данных, полученных авторами в 2004–2006 гг. при разработке темы “Исследование теплопереноса и формирования криогенного строения в породах арктического шельфа Восточной Сибири путем лабораторного физического моделирования”.

### СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Работ, посвященных изучению свойств отложений шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, очень мало. Основное внимание уделялось вопросам стратиграфии, истории развития, генезиса. Имеются лишь обзорные карты с выделенными участками распространения более песчаных и тонкодисперсных отложений, выборочно проводилось изучение теплофизических свойств пород (например, [Молочушкин, Гаврильев, 1970]). Таким образом, сведений о вещественном, фазовом составе воды и свойствах отложений практически нет, как отсутствует информация и о взаимодействии пресных и морских вод с отложениями в районе исследований. Отложения термокарстовых лагун ранее не изучались и не выделялись.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе бурения опробованы собственно аласные, лагунные, озерные, таберальные и подстилающие (вероятно, аллювиальные) отложения. Местоположение скважин и отобранных образцов показано на мерзлотно-геологическом профиле (рис. 1). Образцы упаковывались в пакеты Ziplock или в пластиковые лотки и полиэтиленовую пленку. Мерзлые и талые образцы были раздельно упакованы в бытовые кулеры и доставлены в МГУ в естественном состоянии.

Из пяти скважин отобрано и испытано 29 образцов керна на гранулометрический, химический и минеральный составы и 18 образцов на термограммы замерзания, содержание незамерзшей воды и теплофизические свойства. Определение гранулометрического состава пород производилось методом пипетки, а минерального состава – методом рентгеноструктурного анализа. Состав и содержание водно-растворимых солей изучались с помощью метода водных вытяжек. Термограммы замерзания, содержание незамерзшей воды, теплопроводность и теплоемкость образцов пород определялись на комплексе современных приборов с программным обеспечением для ПК [Бровка и др., 2005]. Теплопроводность образцов пород находилась стационарным методом в мерзлом состоянии при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в талом – при  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплоемкость пород и содержание незамерзшей воды определялись калориметрическим методом.

Результаты определения гранулометрического состава образцов пород (табл. 1) показали, что озерные и лагунные отложения мощностью около 1 м представлены суглинками легкими, средними

и тяжелыми пылеватыми, глинами пылеватыми. Ниже находятся таберальные отложения протянувшегося ледового комплекса, представленные в основном супесями легкими и тяжелыми, часто пылеватыми. Основание вскрытого разреза сложено аллювиальными песками крупно- и мелкозернистыми. Результаты минералогического анализа грунтов показали, что отложения однородны и характеризуют одну область сноса (табл. 2). Наиболее распространенным минералом в исследованных отложениях является кварц, содержание которого превышает треть от общего количества минералов. На втором месте по удельному содержанию стоят альбит, хлорит и иллит, далее гидрослюда и микроклин, а наименьшее содержание в отложениях у смешанослойных минералов и роговой обманки. Отмечается значительное содержание (от 5,7 до 37 %) рентгеноаморфных минералов.

По результатам химического анализа наиболее засолены лагунные (1,16–2,54 %) и аласные (1,24 %) отложения, остальные генетические типы имеют среднюю степень засоления (0,34–0,98 %). Содержание органического углерода по лабораторным данным изменяется от 0,6 до 3,0 %, а общее содержание углерода – от 1,4 до 5,8 %.

Дисперсность и засоленность определяют содержание незамерзшей воды, а льдистость и криогенное строение к тому же и теплофизические свойства отобранных образцов пород. Как видно из опытных данных (рис. 2), содержание незамерзшей воды уменьшается в ряду озерно-лагунные–аласные–озерные–таберальные–аллювиальные отложения. Наибольшая теплопроводность (1,85–1,99 Вт/(м·К)) характерна для мерзлых

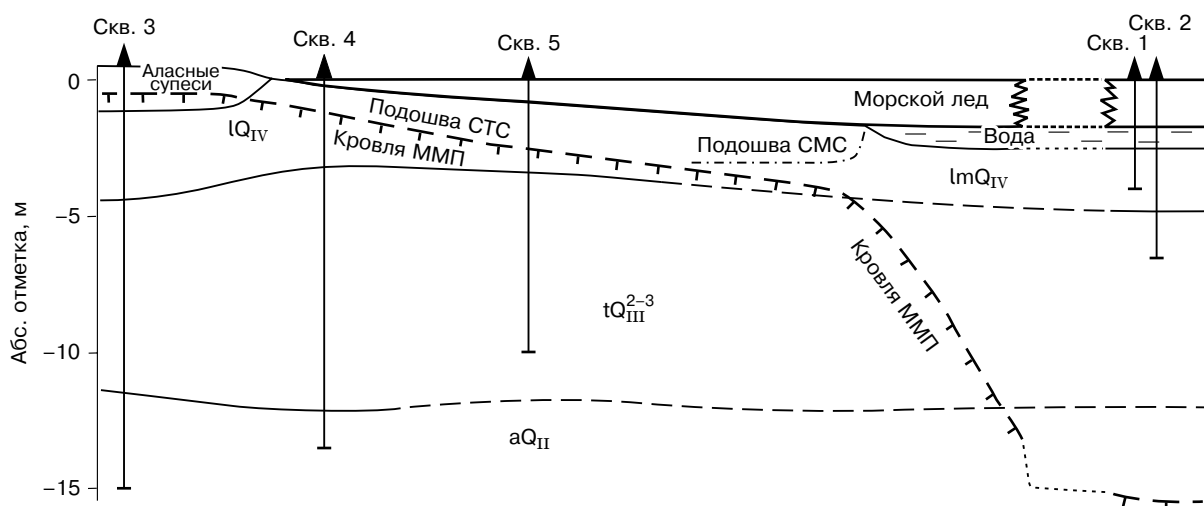


Рис. 1. Мерзлотно-геологический профиль западного побережья Ивашкиной лагуны (Быковский п-ов, Якутия).

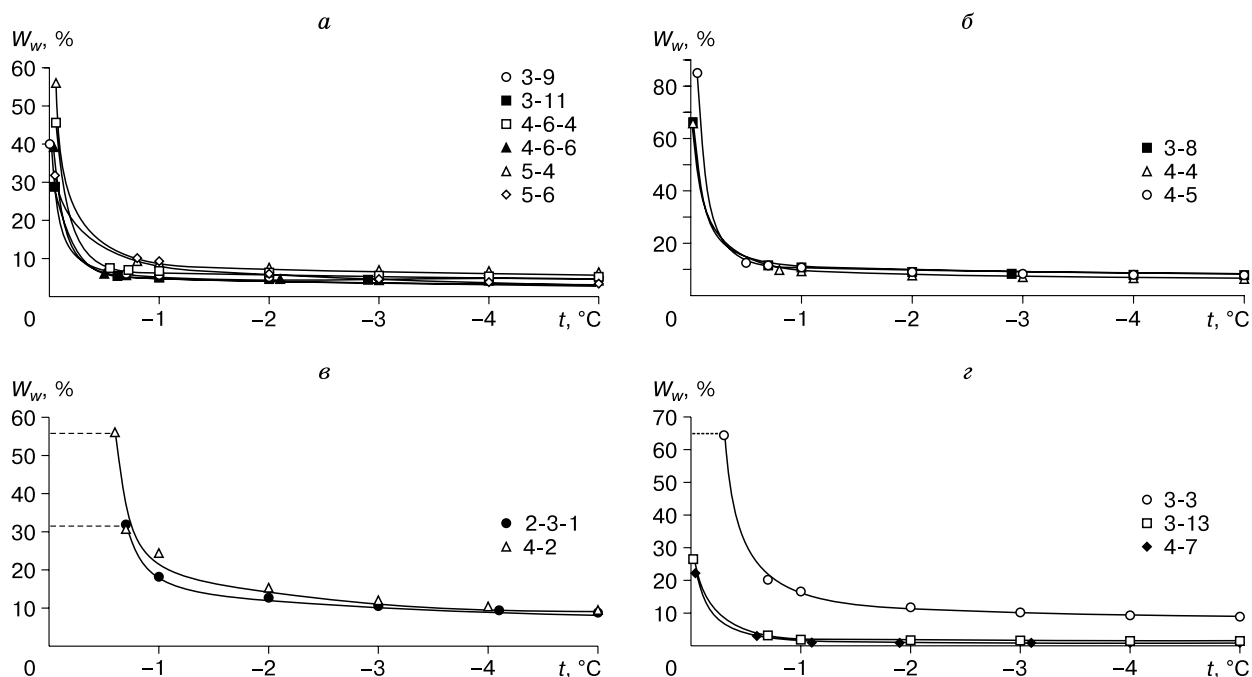
Состав и генезис отложений см. в табл. 1.

Таблица 1. Результаты granulometricкого анализа исследуемых пород

Лаб. номер образца	Глубина отбора, м	Генезис, возраст	Содержание частиц по фракциям (%) диаметром (мм)										Наименование грунтов (по В.В. Охотину)
			5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001	
1-1	0,30-0,80		-	-	-	0,5	1,1	22,5	36,3	14,0	14,9	10,7	Суглинок легкий пылеватый
2-1	0,05-0,10	Лагунные, mQ <sub>IV</sub>	0,1	0,3	2,0	1,8	2,4	21,9	27,8	13,4	20,2	10,1	То же
2-2-1	0,69-0,75		0,3	0,5	3,5	4,1	5,0	12,0	24,4	13,9	22,4	13,9	Суглинок средний пылеватый
1-2-1	0,01-1,08		-	-	-	0,6	0,6	10,3	28,4	19,0	25,3	15,8	Суглинок тяжелый пылеватый
2-2-2	1,17-1,20		-	0,1	0,5	0,6	1,4	8,3	28,6	16,2	26,7	17,6	То же
2-3-1	1,59-1,65	Озерно-лагунные, ImQ <sub>IV</sub>	0,1	0,2	0,5	0,5	0,5	17,6	33,7	13,0	18,7	15,2	Суглинок средний пылеватый
2-3-2	1,85-1,89		-	-	-	0,5	0,5	17,6	39,5	12,1	17,8	12,0	То же
4-2	0,15-0,17		-	-	-	0,5	1,0	7,5	17,3	18,5	31,6	23,6	Глина пылеватая
1-2-2	1,33-1,40		-	0,1	0,5	0,5	0,6	10,2	35,4	16,9	21,9	13,9	Суглинок средний пылеватый
4-4	0,99-1,06	Озерные, IQ <sub>IV</sub>	-	-	-	-	0,5	8,6	32,1	17,8	27,3	13,7	То же
4-5	2,75-3,65		-	-	-	0,5	2,7	8,8	30,6	21,9	24,5	11,0	Суглинок легкий пылеватый
2-4-1	2,37-2,43		-	0,1	0,3	0,5	2,1	26,5	33,4	11,3	15,3	10,5	То же
2-4-2	2,81-2,92		-	0,1	0,5	0,7	12,2	38,8	21,2	7,3	10,1	9,1	Суглинок легкий
2-4-3	3,35-3,40 3,21-3,37		0,1	0,1	2,8	6,5	39,3	28,6	9,0	2,9	5,7	5,0	Супесь легкая
4-6-1	3,59-3,67		-	-	-	0,6	14,2	38,7	21,1	9,4	11,5	4,5	То же
4-6-2	4,85-4,95		-	-	-	0,4	1,5	2,5	31,0	27,8	26,0	10,8	Суглинок легкий пылеватый
4-6-3	5,9-6,0	Таберальные, tQ <sub>III-3</sub>	0,1	0,1	2,9	11,0	28,7	20,1	13,5	7,8	10,1	5,7	Супесь тяжелая
4-6-4	8,2-8,3		-	-	0,9	1,9	19,7	22,8	25,9	9,4	12,2	7,2	То же
4-6-5	9,2		0,1	0,3	7,5	9,2	20,2	22,7	17,4	7,6	10,4	4,6	Супесь легкая
4-6-6	10,7-10,8		-	0,1	1,0	2,1	9,4	21,0	35,2	12,6	12,8	5,8	Супесь тяжелая пылеватая
4-6-7	11,6-11,8		2,8	20,6	21,6	11,0	11,3	10,1	7,6	5,6	7,4	2,0	Супесь легкая
4-7	12,2-12,3	Аллювиальные, aQ <sub>II</sub>	-	-	0,9	0,9	69,7	25,2	1,6	0,3	0,1	1,3	Песок тонко-мелкозернистый (по Е.М. Сергееву)

Таблица 2. Минералогический состав исследуемых пород

Лаб. номер образца	Содержание органического углерода, %	Общее содержание углерода, %	Засоленность z, %	Процентное содержание минералов								Рентгено-аморфные	
				Альбит	Хлорит	Гидро-слода	Роговая обманка	Иллит	Кальцит	Микро-клин	Смешано-слоиные		Кварц
1-1	2,15	2,27	1,16	12,6	7,7	4,8	0,7	11,9	—	5,0	—	36,9	20,5
2-1	2,89	2,69	2,54	11,0	12,0	7,2	—	23,1	—	4,1	1,4	34,5	6,7
2-2-1	2,17	1,92	0,79	10,5	7,6	5,2	1,1	7,3	—	5,8	1,5	36,8	24,1
1-2-1	1,53	2,34	0,90	10,9	11,1	10,6	—	14,4	—	3,5	—	37,8	11,6
2-2-2	2,19	2,50	0,80	9,8	13,0	5,2	0,7	16,3	—	3,9	2,2	36,4	12,2
2-3-1	0,48	2,78	0,74	14,4	6,7	4,7	1,1	8,0	—	4,3	0,6	35,7	24,5
2-3-2	2,46	2,80	0,73	16,3	8,5	5,7	0,9	12,0	—	5,4	2,2	43,2	5,7
4-2	0,98	2,89	0,90	7,7	15,0	5,6	—	25,5	—	3,5	1,7	34,6	6,4
3-8	—	—	0,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1-2-2	1,89	2,36	0,84	13,4	8,4	6,0	0,9	10,9	—	5,7	1,0	37,2	16,6
4-4	0,69	1,74	0,34	9,3	7,8	6,7	—	11,0	—	3,1	2,4	34,2	25,5
4-5	0,34	3,28	0,46	8,7	13,6	3,9	—	18,0	—	3,2	1,8	31,4	19,4
3-3	—	—	1,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-4-1	2,69	3,62	0,90	12,4	7,6	2,4	0,6	6,9	—	4,5	1,1	36,8	27,7
2-4-2	3,89	5,81	0,97	18,8	6,0	1,6	0,6	8,4	—	6,5	1,9	43,6	12,6
2-4-3	0,78	1,06	0,41	17,4	5,1	3,4	—	5,3	—	3,7	—	48,4	16,7
3-9	—	—	0,43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-11	—	—	0,46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-6-1	1,98	2,84	0,65	14,2	4,7	5,1	0,4	6,2	—	3,0	2,0	40,8	23,6
	3,09	4,48	0,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-6-2	1,23	2,39	0,98	8,6	11,9	5,2	0,3	13,4	—	3,1	1,2	34,2	22,2
4-6-3	0,63	2,01	0,39	10,5	4,5	2,8	—	6,6	2,1	1,8	0,6	34,1	37,0
4-6-4	1,22	1,59	0,67	19,2	6,3	3,1	—	7,4	—	5,5	1,1	41,9	15,6
	1,41	2,01	0,79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-6-5	2,32	2,12	0,69	14,9	6,9	3,9	—	9,1	—	4,9	1,1	42,5	16,7
4-6-6	2,42	1,59	0,41	10,2	6,4	3,3	—	8,6	—	3,8	2,1	36,9	28,7
4-6-7	0,78	1,40	0,44	9,1	12,1	5,2	—	23,3	—	2,7	—	40,3	7,2
5-4	—	—	0,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5-6	—	—	0,69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-13	—	—	0,29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-7	—	0,61	0,42	18,4	0,6	1,0	0,9	1,4	—	8,6	0,7	55,1	13,3



**Рис. 2. Зависимость содержания незамерзшей воды ( $W_w$ ) от температуры ( $t$ ) в отложениях термокарстовых лагун Быковского п-ова:**

*a* – таберальные отложения (3-9, 3-11, 4-6-4, 4-6-6, 5-4, 5-6), *б* – озерные отложения (3-8, 4-4, 4-5), *в* – лагунно-озерные отложения (2-3-1, 4-2), *г* – аласные (3-3) и аллювиальные отложения (3-13, 4-7).

пород, как правило, имеющих большое влагосодержание и высокую льдистость (до 50–85 %) (табл. 3). При этом аномальная теплопроводность (2,67 Вт/(м·К)) получена для мерзлого образца № 2-4-3 супеси легкой из таберальных отложений, что объясняется весьма значительным содержанием в ней крупных частиц кварца (48,4 %), имеющих высокую собственную теплопроводность (см. табл. 1, 2).

Криогенное строение отложений, находящихся в многолетнемерзлом состоянии, описано при бурении и отборе керна скважин. Оно изменяется в зависимости от геолого-генетического типа отложений. Так, *озерные* супесчаные отложения, отобранные на глубине 3,15–3,25 м, характеризуются неправильно-сетчатой и местами решетчатой криогенной текстурой с толщиной ледяных прослоев 4–5 мм и размером блоков между шлирами 2–4 см. Много толстых (до 1 см) вертикальных и круто наклонных шлиров, секущих субгоризонтальные шлиры. Вертикальные шлиры часто толще горизонтальных. Суммарная влажность (льдистость) образцов высокая и составляет 66–68 %. Выше по разрезу (2,35–2,75 м) залегают суглинки легкие пылеватые, более влажные (льдистые) с суммарной влажностью до 85 %. Их крио-

генная текстура крупносетчатая со шлирами 2–6 мм, блоки от 1 × 3 до 3 × 5 см.

Супеси пылеватые, отобранные из *аласных* отложений, с суммарной влажностью (льдистостью) 55–64 % имели толстосетчатую и местами атакситовую криогенную текстуру с толщиной шлиров 3–5 мм и размером блоков грунта между шлирами 5–10 мм.

Особенностью криогенной текстуры *таберальных* отложений, которые в мерзлом состоянии расположены, как правило, на относительно больших глубинах (3–12 м) является их меньшая льдистость (30–40 %). В соответствии с этим отложения, представленные в основном супесями, имеют массивную или микрошлировую, линзовидно-слоистую криогенную текстуру с толщиной ледяных прослоев 0,5–1,0 мм и расстоянием между шлирами 1–2 см. На глубинах около 6 м толщина шлиров достигает уже 3 мм, а расстояние между ними увеличивается до 30–40 см. Однако на глубинах 9–12 м толщина шлиров вновь уменьшается до 0,5–1,0 мм, а расстояние между ними – до 0,5–1,0 см.

Подстилающие *аллювиальные* тонко-мелкозернистые пески имеют низкую льдистость 27–28 % и массивную криогенную текстуру.

Таблица 3. Теплофизические свойства исследуемых пород

Лаб. номер образца	Глубина отбора проб, м	Наименование породы (по В.В. Охотину)	$W_1$	$W_2$	$\lambda_r$	$\lambda_m$	$C_r$	Дж/(кг·К)		$T_{\text{из}}, ^\circ\text{C}$	$W_w$ (%) при $t$ ( $^\circ\text{C}$ )				
								$C_r$	$C_m$		$C_{\text{ск}}$	-1	-2	-3	-5
			%		Вт/(м·К)										
2-3-1	1,59–1,65	Суглинок средний пылеватый	30,5	31,9	1,01	1,11	1592	1232	797	-0,70	18,2	12,7	10,5	8,8	8,1
4-2	0,23–0,30	Глина пылеватая	58,0	56,1	1,20	1,98	2072	1410	837	-0,60	24,4	15,3	12,0	9,5	8,2
3-8	3,15–3,25	Супесь пылеватая*	67,6	66,3	1,12	1,93	2215	1464	873	-0,02	10,7	9,0	8,3	7,8	7,7
4-4	0,99–1,06	Суглинок средний пылеватый	60,6	65,8	1,15	1,85	1967	1253	614	-0,02	9,3	7,7	7,1	6,4	6,0
4-5	3,65–2,75	Суглинок легкий пылеватый	84,9	85,0	1,01	1,99	2430	1553	927	-0,06	10,7	9,0	8,3	7,8	7,7
3-3	0,75–0,90	Супесь пылеватая*	54,6	64,4	1,18	1,56	2031	1403	846	-0,30	16,6	11,8	10,2	8,9	8,4
2-4-3	3,35–3,40	Супесь легкая	10,0	-	1,65	2,67	1058	917	744	-	-	-	-	-	-
2-4-3	3,21–3,37	То же	18,2	-	1,00	1,09	1271	996	738	-	-	-	-	-	-
3-9	5,55–5,70	Песок*	39,1	40,0	1,08	1,27	1756	1236	801	-0,00	5,7	5,1	4,8	4,6	4,6
3-11	9,61–9,73	Супесь легкая	32,7	28,8	1,03	1,21	1618	1167	774	-0,05	5,0	4,6	4,4	4,2	4,2
4-6-1	3,59–3,67	То же	-	22,0	-	-	-	-	-	-0,20	-	-	-	-	-
4-6-3	5,93–6,00	Супесь тяжелая	-	29,0	-	-	-	-	-	-0,18	-	-	-	-	-
4-6-4	8,20–8,27	То же	44,1	45,6	1,13	1,67	1798	1229	738	-0,06	6,7	6,3	5,5	5,2	5,1
4-6-6	10,7–10,8	Супесь тяжелая пылеватая	34,2	39,2	1,06	1,18	1667	1198	801	-0,04	5,1	4,6	4,3	4,2	4,1
5-6	9,60–9,70	Песок, супесь*	10,8	31,8	1,67	2,21	1100	949	766	-0,05	9,3	6,0	4,6	3,4	2,8
5-4	3,61–3,73	Песок*	56,0	56,0	1,44	2,14	1835	1211	586	-0,06	8,9	7,6	7,0	6,4	6,1
3-13	13,8–13,9	Песок*	28,3	26,5	1,07	1,21	1530	1091	774	-0,02	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
4-7	12,2–12,4	Песок	27,5	22,2	1,02	1,10	1492	1054	747	-0,04	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8

\* Наименование грунта дано по полевому описанию.

Примечание.  $W_w$  – влажность за счет незамерзшей воды;  $W_1$ ,  $W_2$  – природные влажности образцов ядра пород, испытанных на теплофизические свойства и на температуру начала заморзания;  $\lambda_r$ ,  $\lambda_m$  – коэффициенты теплопроводности талых и мерзлых пород;  $C_r$ ,  $C_m$  – теплоемкость талых и мерзлых пород;  $C_{\text{ск}}$  – теплоемкость скелета пород;  $T_{\text{из}}$  – температура начала заморзания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили отработать методику комплексного изучения образцов керна относительно небольшого размера и получить достаточно корректные количественные результаты. В работе охарактеризованы основные генетические типы отложений, свойственных одной термокарстовой лагуне Быковского п-ова, по минеральному и гранулометрическому составу, теплофизическим свойствам и фазовому составу воды. В настоящее время проводятся исследования образцов из других термокарстовых лагун Быковского п-ова, имеющих иной возраст и, следовательно, другую степень засоления. Это позволит охарактеризовать изменчивость теплофизических свойств отложений и фазового состояния воды в них применительно к термокарстовым лагунам на разных стадиях развития. Полученные данные будут использованы при моделировании геокриологических процессов на шельфах морей Восточной Арктики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-05-64815).

## Литература

- Арэ Ф.Э.** Термоабразия морских берегов и некоторые криогенные явления на дне моря // Криогенные процессы. М., Наука, 1978, с. 33–55.
- Бровка А.Г., Бровка Г.П., Дедюля И.В., Романенко И.И.** Комплекс приборов для определения фазового состава воды и теплофизических характеристик мерзлых грунтов // Материалы Третьей конф. геокриологов России. Т. 1, ч. 1. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, с. 5–11.
- Клюев Е.В.** Проявление термокарста на дне моря Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики, 1966, вып. 23, с. 26–32.
- Молочушкин Е.Н., Гаврильев Р.И.** Строение, фазовый состав и термический режим горных пород, слагающих дно прибрежной зоны моря Лаптевых // Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Л., Гидрометеиздат, 1970, с. 503–509.
- Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. и др.** Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 79–91.
- Тумской В.Е., Борцов А.В.** Строение термокарстовых лагун Быковского полуострова // Криосфера Земли, 2008 (*в печати*).

*Поступила в редакцию  
25 декабря 2006 г.*