

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 551.345 (268.52)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(13-25)

СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ И ТАЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ПОБЕРЕЖЬЯ БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ КАРСКОГО МОРЯ

Д.М. Алексютина, Р.Г. Мотенко

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; alexsyutina@gmail.com, rmotenko@mail.ru*

Приведены результаты полевых и лабораторных исследований состава, строения и свойств дисперсных пород прибрежного участка западного побережья Байдарацкой губы. Проанализированы результаты обобщения по температуре замерзания, содержанию незамерзшей воды, теплофизическим и физико-механическим свойствам отложений различного гранулометрического состава в зависимости от влажности, плотности, засоленности, заторфованности и температуры. Сопоставлены все полученные характеристики пород по глубине скважин, пробуренных на данном участке.

Мерзлые дисперсные породы, физико-механические и теплофизические свойства отложений, незамерзшая вода

COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF FROZEN AND THAWED DEPOSITS
ON THE BAYDARATSKAYA BAY COAST, KARA SEA

D.M. Aleksyutina, R.G. Motenko

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; alexsyutina@gmail.com, rmotenko@mail.ru*

Field and laboratory studies of the composition, structure and properties have been carried out for frozen and thawed soils on the western coast of Baydaratskaya Bay. The freezing point temperature, the unfrozen water content, the thermal and mechanical properties of soils with different grain-size distribution have been analyzed depending on the water content, density, salinity, organic content and temperature of the soil. Results of comparing of obtained soil parameters depth-wise the boreholes are summarized.

Dispersive frozen soils, thermal and mechanical properties, unfrozen water

ВВЕДЕНИЕ

На арктическом шельфе сконцентрировано большое количество еще не использованных энергетических ресурсов, поэтому его исследование приобретает сейчас особое значение. Освоение северных территорий требует четкого учета изменчивости природной среды, вызванной как естественными факторами, так и техногенным воздействием. Без знания характеристик приповерхностных рыхлых отложений невозможно моделирование природной среды и прогнозирование криогенных процессов.

Побережье Байдарацкой губы сложено мерзлыми дисперсными породами, чувствительными к внешним изменениям природной среды, поэтому геокриологическая характеристика этих отложений – достаточно актуальная задача. На побережье Байдарацкой губы за переработкой бере-

гов, сложенных многолетнемерзлыми породами (ММП), велись систематические наблюдения [Геозкология Севера, 1992; Камалов и др., 2006; Белова, 2014], что связано с активным развитием нефтегазовой промышленности в данном регионе, а также строительством перехода трубопровода “Бованенково–Ухта” через дно губы. Исследования состава, строения и свойств грунтов проводились в рамках инженерно-геологических изысканий, но опубликованных данных по характеристикам грунтов практически нет или в большинстве случаев для отложений изучены лишь их физические свойства. Механические и теплофизические свойства пород верхней части разреза охарактеризованы слабо, тогда как именно эти породы вскрываются в береговых уступах и разрушаются под воздействием термоабразии и термоденудации.

В настоящей статье рассматриваются и анализируются результаты исследования характеристик приповерхностных мерзлых и талых отложений, отражающих природную изменчивость их состава, строения и свойств.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на западном побережье Байдарацкой губы Карского моря. Изучаемый участок берега протяженностью 3.6 км расположен в 4 км к юго-востоку от устья р. Ою-Яха, между островами Левдиев и Торасавей (рис. 1).

В геологическом строении района мезозойско-кайнозойские породы повсеместно перекрыты толщей четвертичных отложений мощностью до 50 м [Геоморфологическая карта..., 1999]. Территория относится к области сплошного распространения ММП, в разрезе мерзлые породы чередуются с охлажденными породами, талые отложения приурочены к руслам крупных водотоков и термокарстовым озерам. Более ранние наблюдения [Дубиков, 1991; Инженерно-геологические... условия..., 1995; Природные условия..., 1997], проводимые при инженерных изысканиях на данной территории, показали, что глубина годовых колебаний температуры составляют 12–15 м при изменчивости среднегодовой температуры пород на глубине нулевых годовых амплитуд от -4 до -8 °С.

Согласно государственной геоморфологической съемке, вдоль изучаемого побережья Байдарацкой губы [Иванова, Войцеховский, 1959; Геоморфологическая карта..., 1999] прослеживаются аккумулятивные и цокольные прибрежно-морские и приморско-речные формы рельефа с раз-



Рис. 1. Территория исследований.

личными абсолютными отметками, в пределах которых выделяют первую и вторую морскую и речную террасы, лайд, пойму, пляж. Высотные отметки лайд и пойм составляют до 3 м, первых морских террас – до 4.5 м, речных – до 5–8 м, вторых морских и речных террас – 12–15 м. Таким образом, расчленение террас на морские и речные лишь по их гипсометрическим уровням не представляется возможным.

При проведении полевых работ в пределах изучаемого района были выбраны две наблюдательные площадки (I, II), разделенные поймой реки Нгарка-Тамбьяха, затопляемой в период осенних нагонов (рис. 2). Площадки различались высотой уступа над средним уровнем губы (здесь и далее высоты приведены относительно уровня губы, отличающегося от Балтийской системы высот на -0.5 м) и составом отложений: площадка I, распо-

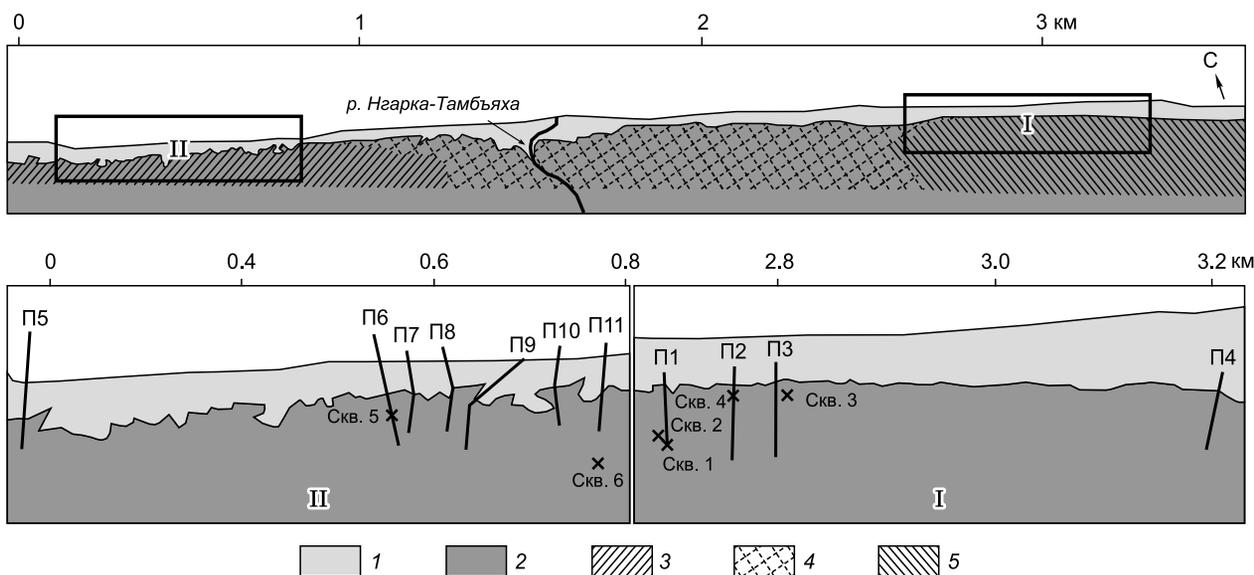


Рис. 2. Схема расположения наблюдательных площадок (I, II) на исследуемом участке берега, профилей (II) и скважин (Скв.).

1 – песчаный пляж; 2 – берег; 3 – высокая терраса; 4 – пойма (лайда); 5 – низкая терраса.

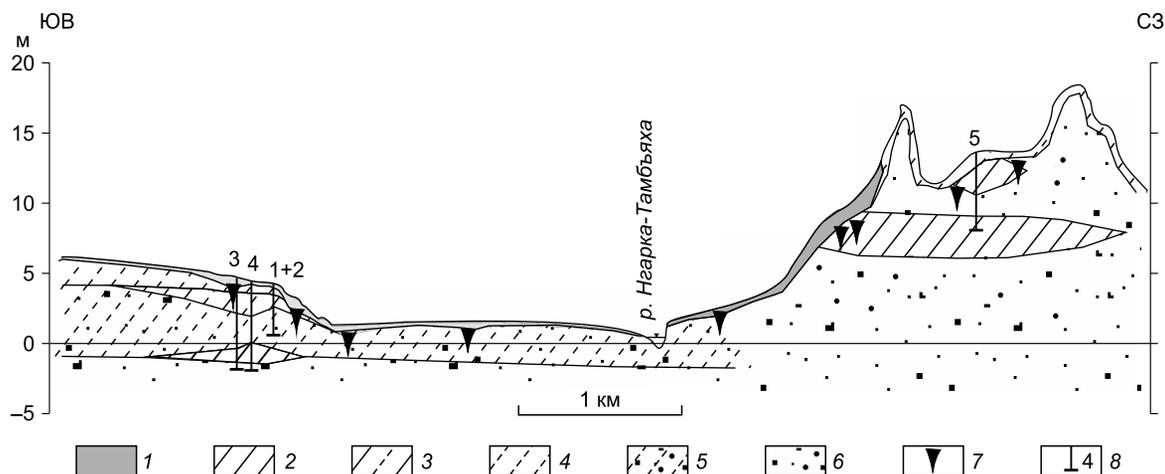


Рис. 3. Схематический разрез исследуемой территории:

1 – торф; 2 – суглинок; 3 – переслаивание супеси и суглинка; 4 – супесь; 5 – супесь с прослоями песка; 6 – песок; 7 – ледяные жилы; 8 – скважина и ее номер.

ложенная в юго-восточной части, заложена на террасе с высотами 4–6 м (в работе названа “низкой”); площадка II в северо-западной части территории исследований располагалась на террасе с отметками, достигающими 16 м (названа “высокой”). Для характеристики отложений, слагающих береговые уступы, было пробурено шесть скважин (глубиной 3.5–6.5 м), оборудованных в дальнейшем для ведения наблюдений за температурным режимом. Среднегодовая температура на забое составляет от -4.0 до -4.5 °С.

Отложения района исследований характеризуются “пестрым” литологическим составом (рис. 3)*.

В юго-восточной части низкой террасы залегают слабльдистые дисперсные отложения, представленные супесями, песками и их переслаиванием. В северо-западной части низкой террасы тонкодисперсные разности более льдистые и представляют собой переслаивание суглинков и супесей (скв. 4), вмещающих большое количество ледяных жил, краевая часть одной из которых была вскрыта скважиной 3.

Отложения поймы (лайды) представлены супесями и песками, перекрытыми с поверхности толщей торфов.

В береговых обрывах высокой террасы преобладают слабльдистые песчаные отложения. Единственная глубокая скважина (скв. 5, глубиной до 5 м) на данной площадке была пробурена на месте спущенного термокарстового озера и не может являться наиболее представительной.

МЕТОДИКА ОТБОРА ОБРАЗЦОВ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Бурение скважин осуществляли ручным мотобуром без промывки или продувки, чтобы сохранить криогенное строение керна. В случае затруднительной проходки какого-либо горизонта пород (например, при наличии прослоя гравелистого мерзлого песка) бурение продолжалось шнеком до смены отложений на более легкопроходимые. Для отбора керна использовали металлические ложки диаметром 4 и 7 см. Из всех скважин и со склона террас было отобрано 86 монолитов и образцов нарушенного сложения. Общее количество определений свойств на отобранных образцах составило более 1000.

Для всех отобранных образцов при проведении лабораторных работ определялись характеристики: *дисперсность, влажность, пластичность, плотностные характеристики, степень засоленности и относительное содержание органического вещества*. Основные характеристики пород изучались с помощью целого ряда стандартных методов [ГОСТ 5180-84, 1984; ГОСТ 27753.2-88, 1988; ГОСТ 26213-91, 1992; ГОСТ 12536-2014, 2015]. Кроме того, проводились определения *теплофизических характеристик в талом и мерзлом состоянии, температуры начала замерзания, физико-механических свойств и содержания незамерзшей воды мерзлых пород*.

Теплофизические свойства талых и мерзлых пород были охарактеризованы путем исследования трех параметров: теплоемкости, коэффициен-

* Отложения поймы и высокой террасы оценены на основе визуальных полевых наблюдений с дополнениями по литературным данным [Природные условия..., 1997; Белова, 2014].

тов тепло- и температуропроводности. В полевых условиях коэффициент теплопроводности пород в массиве определялся зондовым методом с помощью измерителя МИТ-1 (относительная погрешность измерения $\pm 7\%$). В лабораторных условиях теплофизические характеристики определялись методом регулярного режима первого рода [Методы..., 2004] и измерителем KD2 Pro, погрешность определения составляла $\pm 5-7\%$. Температура начала замерзания находилась криоскопическим методом с точностью $\pm 0.03\text{ }^\circ\text{C}$. Содержание незамерзшей воды в мерзлых породах исследовалось комбинацией двух методов (криоскопическим и контактным), отработанных на кафедре геокриологии МГУ [Ершов и др., 1991; Мотенко, Комаров, 1996; Мотенко, 1997; Методы..., 2004]. Исследования проводились с двойной повторностью; ошибка определений $\pm 3-5\%$.

Исследования физико-механических свойств (эквивалентного сцепления, сжимаемости и осадки при оттаивании) включали испытания мерзлого грунта методами шарикового штампа и компрессионного сжатия при оттаивании [ГОСТ 12248-2010, 2011]. Физико-механические характеристики отложений, отобранных из скв. 4, исследовались в мерзлотном домике под руководством М.Н. Царапова.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ОТЛОЖЕНИЙ

Диапазоны изменения характеристик исследуемых образцов представлены в таблице.

Гранулометрический состав. Исследования гранулометрического состава отложений показали, что в разрезах преобладают супеси, при общей изменчивости отложений от тяжелых пылеватых суглинков до песков средней крупности (рис. 4). Для всех образцов (за исключением мелких песков) характерно доминирующее содержание крупных пылеватых частиц.

В мелких песках низкой и высокой террас преобладает мелкая фракция песчаных частиц (см. рис. 4, а). В пылеватых песках низкой террасы распределение мелкой фракции песчаных частиц

и крупной фракции пылеватых частиц примерно одинаково и преобладает над другими фракциями, в пылеватых песках высокой террасы наблюдается максимальное количество тонкой фракции песчаных частиц (см. рис. 4, б). Песчаные супеси низкой террасы разделяются на два типа: в одних преобладает тонкая фракция песчаных частиц, в других – фракции мелких песчаных и крупных пылеватых частиц (см. рис. 4, в). Песчаные супеси высокой террасы характеризуются близким количеством трех указанных фракций, а пылеватые – тонкой фракцией песчаных частиц и фракцией крупной пыли. В пылеватых супеях низкой террасы преобладают фракции крупной пыли и средних песчаных частиц (см. рис. 4, г). Суглинки высокой террасы характеризуются высоким содержанием крупной пыли и глинистых частиц, а для низкой террасы к перечисленным фракциям добавляются песчаные частицы (см. рис. 4, д, е).

Криогенное строение. В песках преобладают массивная и тонколинзовидная криогенные текстуры, в супеях – линзовидная и порфиновая, реже массивная. В суглинках наблюдается наибольшее многообразие криотекстур: преобладает линзовидная, но встречаются также массивная, слоистая и атакситовая, приуроченные к верхним частям разреза низкой террасы.

Суммарная льдистость (i_{tot}) варьирует в широких пределах и увеличивается в более тонкодисперсных и заторфованных отложениях. Максимальная суммарная льдистость изменяется в органических разностях (торфах) от 59 до 96 %. Максимальные значения i_{tot} для минеральных и органоминеральных отложений составляют 85 %, минимальные значения в песках – 7 %, в супеях – 11 %, в суглинках – 26 %.

Естественная влажность (W_{tot}) отложений связана с различиями в криогенном строении и составе отложений. В песках средние значения W_{tot} составляют 19 % (в диапазоне природной изменчивости W_{tot} от 5 до 89 %), в супеях – 30 % (при изменении W_{tot} от 9 до 162 %), в суглинках – 42 % (в диапазоне W_{tot} от 19 до 112 %). Естественная влажность торфов – от 80 до 950 %.

Диапазоны изменения физических и теплофизических свойств пород

Порода	$W_{\text{tot}}, \%$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$D_{\text{sal}}, \%$	$I_r, \%$	λ_f	λ_{th}	C_f	C_{th}	$a_f \cdot 10^6$	$a_{\text{th}} \cdot 10^6$
					Вт/(м·К)		Дж/(кг·К)		м/с ²	
Пески	5–89	1.5–2.0	0.08–0.58	2.8–11.2	0.24–2.10	0.24–1.91	770–1500	770–2400	0.19–1.19	0.19–0.96
Супеси	9–162	1.2–2.1	0.01–0.71	3.6–14.4	0.22–1.65	0.22–1.81	770–1650	770–2900	0.16–1.59	0.16–0.74
Суглинки	19–205	1.1–1.7	0.04–0.99	4.9–25.3	0.18–1.55	0.18–1.53	840–1770	840–3150	0.15–1.44	0.15–0.58
Торфы	114–955	0.9–1.2	–	62.1–88.3	0.82–1.30	0.38–0.59	1980–2260	3020–4200	0.41–0.61	0.12–0.16

Примечание. W_{tot} – влажность; ρ – плотность; D_{sal} – степень засоленности; I_r – относительное содержание органического вещества; $\lambda_f, \lambda_{\text{th}}$ – коэффициент теплопроводности мерзлых и талых отложений; C_f, C_{th} – удельная теплоемкость мерзлых и талых отложений; a_f, a_{th} – коэффициент температуропроводности мерзлых и талых отложений соответственно.

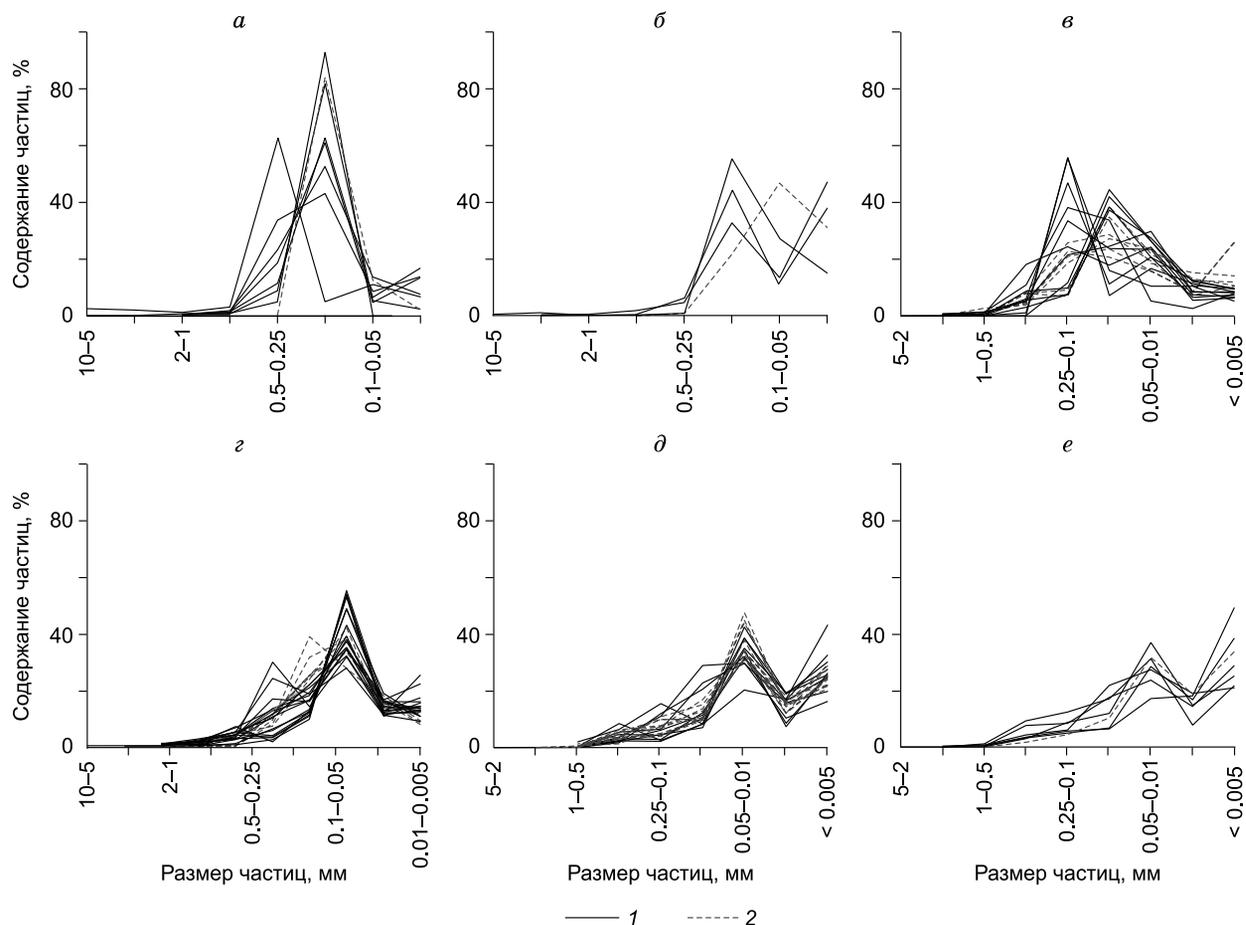


Рис. 4. Дифференциальные кривые гранулометрического состава пород низкой (1) и высокой (2) террас.

a – пески мелкие и средней крупности; *б* – пески пылеватые; *в* – супеси песчаные; *г* – супеси пылеватые; *д* – суглинки легкие пылеватые и песчаные; *е* – суглинки тяжелые пылеватые.

Показатели пластичности. Влажность на границе текучести (W_l) в супесях изменяется от 14 до 32 %, в суглинках – от 26 до 42 %. Влажность на границе раскатывания (W_p) в супесях варьирует от 12 до 26 %, в суглинках – от 17 до 31 %. Число пластичности (I_p) изменяется в широком диапазоне: в супесях – от 2 до 6.9 %, в суглинках – от 7 до 16 %.

Плотность (ρ) отложений изменяется от 0.9 до 2.1 г/см³, минимальные значения характерны для торфов, максимальные – для песков. Плотность скелета грунта (ρ_d) изменяется для песков от 0.82 до 1.68 г/см³, супесей – от 0.46 до 1.76 г/см³, суглинков – от 0.38 до 1.62 г/см³ и для торфов – от 0.09 до 0.81 г/см³.

Содержание органического вещества (I_r) в глинистых и песчаных отложениях изменяется от 0 до 25 %, в торфах – от 62 до 83 %.

Засоленность. Исследование засоленности пород (D_{sal}) выявило доминирование ионов хлора,

натрия и калия в породах с морским типом засоления. Диапазон изменения D_{sal} для всех исследуемых образцов 0–1 %. Анализ степени засоленности пород первой морской террасы показал, что наиболее засоленными отложениями являются суглинки (0.04–0.99 %), а наименее засоленными – пески (0.08–0.58 %).

Эквивалентное сцепление. В мерзлых образцах эквивалентное сцепление (C_{qt}) изменяется в широком интервале в зависимости от температуры и дисперсности. Наибольшие значения наблюдаются в песках, наименьшие – в суглинках. В супесях при температуре –3 °С величина C_{qt} изменяется от 0.063 до 0.131 МПа и увеличивается до 0.26 МПа с понижением температуры до –8 °С.

Осадка при оттаивании. Исследования показали, что значения осадки при оттаивании (A) в суглинках (от 0.225 до 0.268 д.е. при значениях влажности 59–112 %) выше, чем в супесях ($A = 0.052$ при $W = 48$ %).

Сжимаемость (m). Для супесчано-суглинистых отложений значения сжимаемости близки и изменяются от 0.19 до 0.25 МПа⁻¹.

Содержание незамерзшей воды (W_w). Основными факторами, влияющими на содержание незамерзшей воды в мерзлых породах, являются температура, дисперсность, засоленность, заторфованность и др. [Фазовый состав..., 1979; Чеве-рев, 2004].

На рис. 5 представлена зависимость влажности за счет незамерзшей воды (W_w – весовая) от температуры для всех исследуемых отложений.

Диапазон изменения содержания незамерзшей воды в мерзлых образцах очень широк, например, при температуре –1 °С W_w изменяется от нуля (в песках) до сотен процентов (в торфах), а при –15 °С – от 0 до 33 %.

Влияние гранулометрического состава отложений на содержание в них незамерзшей воды представлено на рис. 6. При температуре –4 °С в мелком песке $W_w = 0.6$ %, в пылеватых песках – от 0.8 до 1.5 %, в супесях песчанистых – от 1.1 до 3.4 %, в пылеватых супесях – от 2.5 до 4.8 %, а наибольшее количество незамерзшей воды наблюдается в суглинках (4.0–5.3 %).

Влияние содержания органического вещества показано для органоминеральных и органических разностей (рис. 7). Наибольшие значения характерны для хорошо разложившихся торфов рыжего цвета, наименьшие – для темно-бурых торфов. При среднегодовой температуре пород –4 °С W_w в мерзлых торфах изменяется от 13 до 40 %. В заторфованном песке $W_w = 3.6$ %, в супесях при $I_T = 6–14$ % содержание незамерзшей воды изменяется незначительно – от 3.2 до 5.0 %, в мерзлых

суглинках при $I_T = 5–25$ % составляет от 4.4 до 5.6 %.

Влияние засоленности. Наибольшее количество незамерзшей воды наблюдается в средне- и сильнозасоленных суглинках (рис. 8), W_w изменяется от 9.6 до 15.2 % при температуре –4 °С. Содержание незамерзшей воды в засоленных супесях составляет от 8.6 до 11.5 %, а с понижением температуры значения W_w снижаются до значений 6 % при температуре –14 °С, что связано с природным разнообразием исследуемых образцов. Содержание незамерзшей воды в слабозасоленных песках изменяется от 0.4 до 2.4 %, в сильнозасоленных песках – от 1.6 до 4.6 %.

Результаты лабораторных исследований фазового состава влаги мерзлых засоленных пород были сопоставлены с результатами обобщения, полученными ранее для этого региона [Природные условия..., 1997]. В засоленных песках результаты практически совпадают, а для супесей и суглинков выявленные диапазоны изменения W_w незначительно различаются из-за меньшего количества исследуемых нами образцов.

Температура начала замерзания пород (t_{bf}) зависит от тех же факторов, что и содержание незамерзшей воды. В исследованных незасоленных незаторфованных породах четко прослеживается влияние дисперсности и естественной влажности отложений на t_{bf} . В песках t_{bf} изменяется от –0.14 до –0.5 °С ($W_{tot} = 4–19$ %), в супесях – от 0 до –0.3 °С ($W_{tot} = 6–150$ %) и в суглинках – от –0.05 до –0.2 °С ($W_{tot} = 27–108$ %).

В заторфованных образцах и торфах температура начала замерзания близка к нулю из-за большой влажности этих пород. В торфах t_{bf} изменяет-

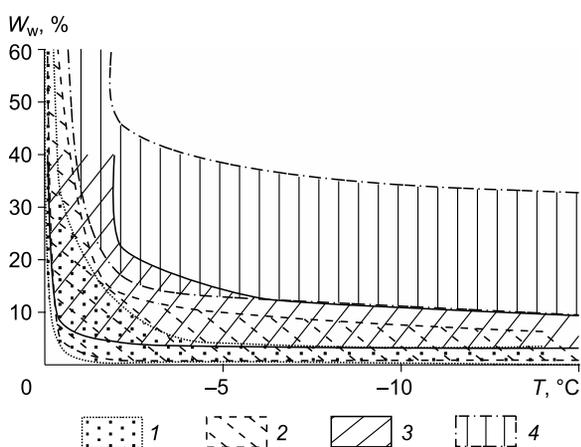


Рис. 5. Зависимость содержания незамерзшей воды W_w от температуры T для исследованных мерзлых отложений:

1 – пески; 2 – супеся; 3 – суглинки; 4 – торфы.

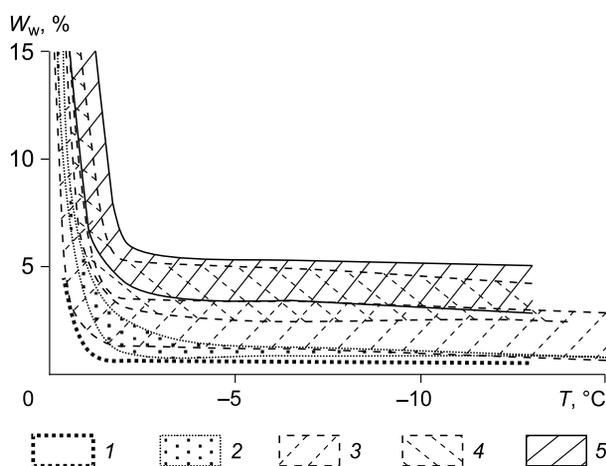


Рис. 6. Зависимости содержания незамерзшей воды W_w от температуры T мерзлых пород различного гранулометрического состава:

1 – песок мелкий; 2 – пески пылеватые; 3 – супеся песчанистые; 4 – супеся пылеватые; 5 – суглинки.

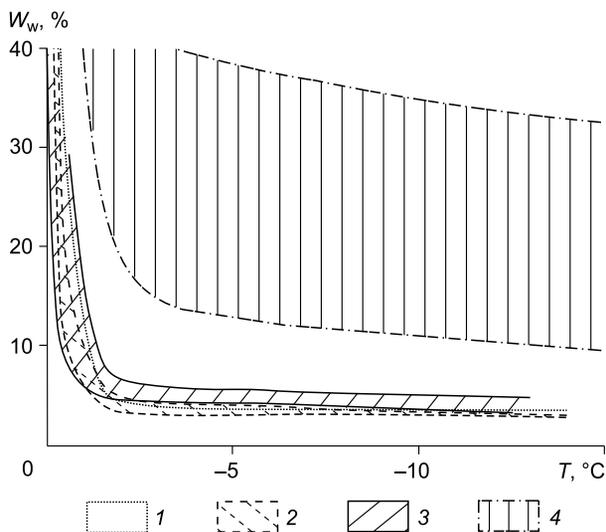


Рис. 7. Зависимости содержания незамерзшей воды W_w от температуры T мерзлых заторфованных отложений:

1 – песок; 2 – супеси; 3 – суглинки; 4 – торфы.

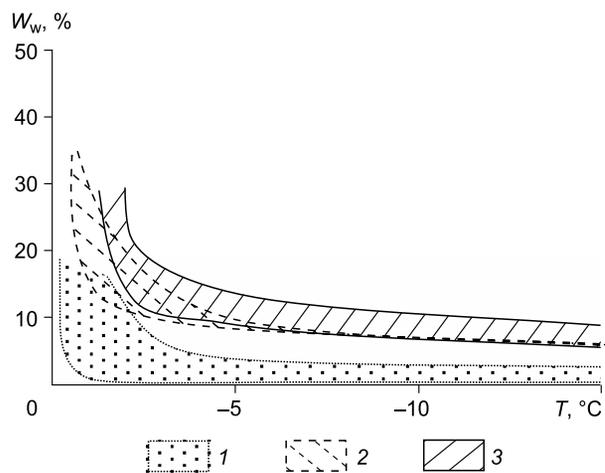


Рис. 8. Зависимости содержания незамерзшей воды W_w от температуры T мерзлых засоленных пород:

1 – пески; 2 – супеси; 3 – суглинки.

ся от 0 до -0.2 °C при влажности от 114 до 954 %, в заторфованных супесях и песке составляет -0.1 °C при $W_{tot} = 90-107$ %, в суглинках – от 0 до -0.25 °C при влажности от 30 до 230 %.

Влияние засоленности пород различного гранулометрического состава на температуру начала их замерзания представлено в виде зависимости t_{bf} от концентрации порового раствора (C_p). Для оценки полученных результатов на рис. 9 пунктирной линией представлена температура начала замерзания раствора морской соли [Мировой океан, 2015]. На рис. 9 видно, что зависимость практически линейная для всех исследуемых образцов.

Теплопроводность пород (λ). Природные значения влажности и плотности исследуемых образцов изменяются в широком диапазоне. Анализировать полученные результаты можно, например, в зависимости от объемной влажности (W_p) как обобщенного показателя, учитывающего влажность и плотность скелета породы.

На рис. 10 приведены зависимости теплопроводности всех исследуемых отложений от объемной влажности для мерзлого (λ_f) и талого (λ_{th}) состояния.

С увеличением влажности (от воздушно-сухого состояния до полного влагонасыщения) теплопроводность пород различного гранулометрического состава возрастает. При дальнейшем увеличении влажности скорость изменения λ в мерзлом состоянии замедляется, а в талом состоянии в супесях и суглинках отмечается понижение значений λ_{th} . Максимальные значения коэффициента теплопроводности характерны для песков, ми-

нимальные – для торфов. Разброс значений λ связан с природным разнообразием отложений, поэтому анализировать полученные результаты необходимо в зависимости от различных факторов.

Влияние содержания органического вещества в исследуемых отложениях на их теплопроводность связано с худшей способностью торфяных частиц проводить тепло, с большим содержанием незамерзшей воды в мерзлых образцах и др. С увеличением содержания органического вещества теплопроводность понижается в ряду “минеральные грунты–грунты с примесью торфа–грунты слабозаторфованные–торфы”. Понижение λ в ор-

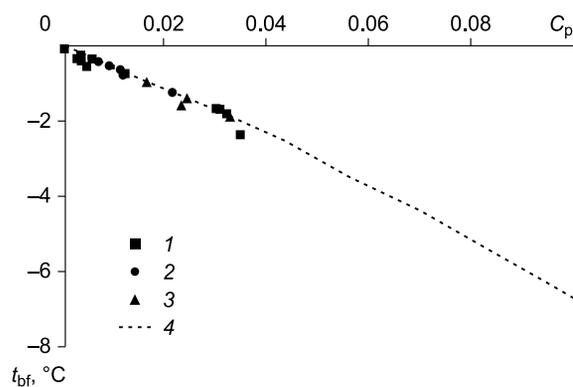


Рис. 9. Зависимость температуры начала замерзания t_{bf} от концентрации порового раствора C_p засоленных пород:

1 – пески; 2 – супеси; 3 – суглинки; 4 – раствор морской соли.

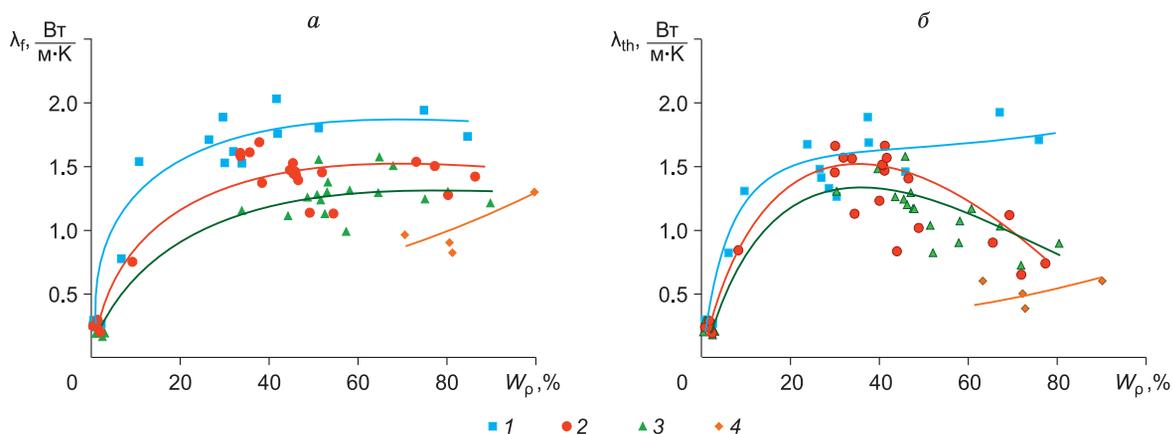


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопроводности λ от объемной влажности W_p отложений в мерзлом (а) и талом (б) состоянии:

1 – пески; 2 – супеси; 3 – суглинки; 4 – торфы.

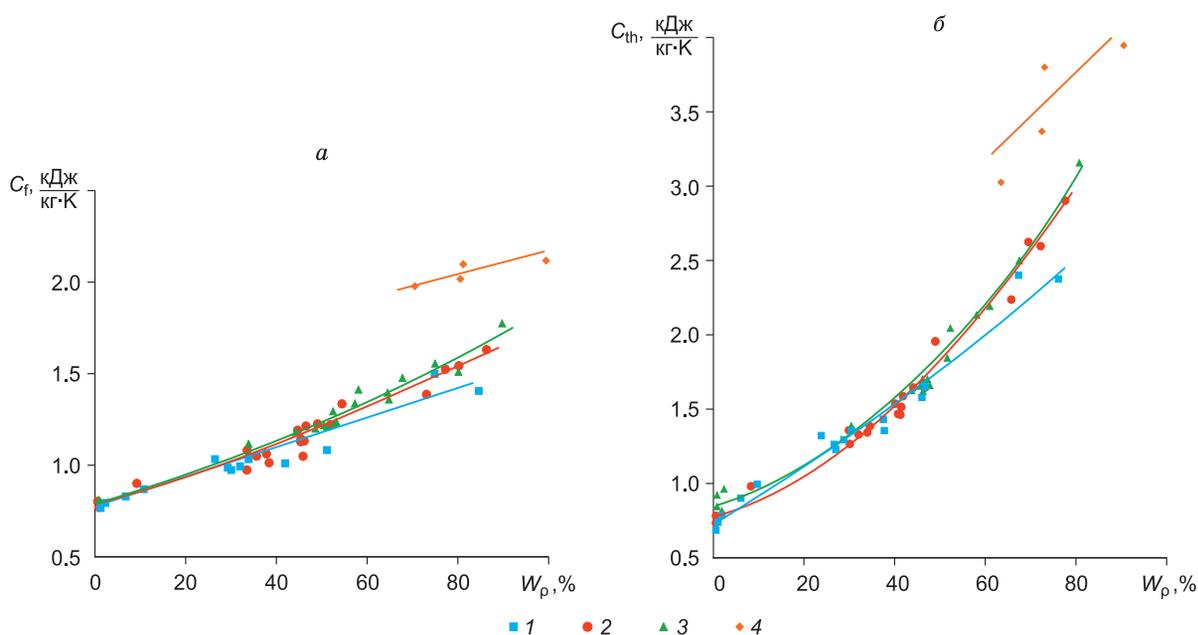


Рис. 11. Зависимость удельной теплоемкости C от объемной влажности W_p пород в мерзлом (а) и талом (б) состоянии:

1 – пески; 2 – супеси; 3 – суглинки; 4 – торфы.

ганоминеральных и органических грунтах отмечалось как для мерзлых, так и для талых образцов.

Влияние засоленности на коэффициент теплопроводности проявляется сильнее в мерзлом состоянии и практически не наблюдается в талом, приводя к понижению коэффициента теплопроводности в мерзлых песках и суглинках примерно на 20 % и более [Алексютина, Мотенко, 2016].

Теплоемкость пород (C). Результаты исследования удельной теплоемкости образцов в диапазоне изменения объемной влажности представле-

ны на рис. 11. Наибольшие значения удельной теплоемкости характерны для торфов: в талом состоянии до 3950 кДж/(кг·К), в мерзлом – 2350 кДж/(кг·К). Значения теплоемкости супесей и суглинков очень близки, но даже в заторфованных разностях ниже, чем для торфов.

Температуропроводность пород (а). На рис. 12, а, б приведены зависимости коэффициента температуропроводности пород различной дисперсности соответственно для мерзлого a_f и талого a_{th} состояния от объемной влажности.

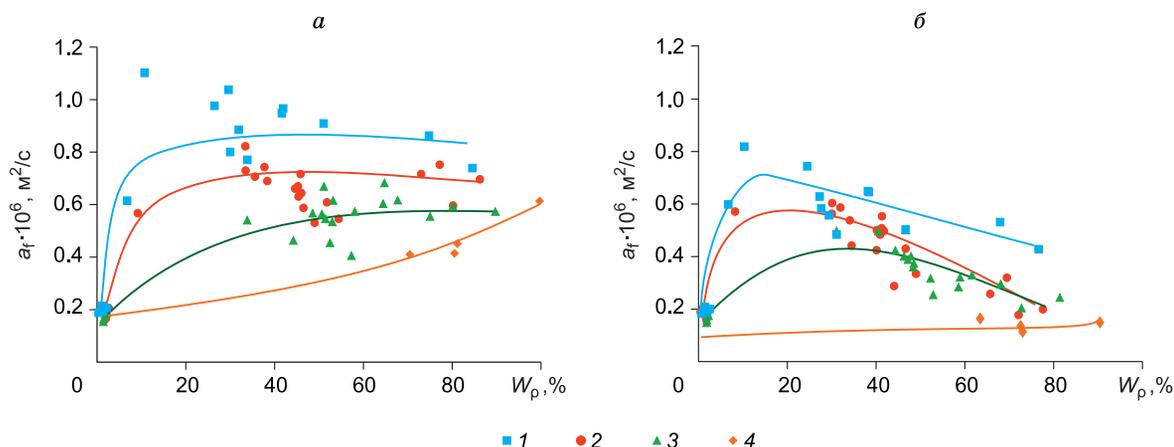


Рис. 12. Зависимость коэффициента температуропроводности a_f от объемной влажности W_p отложений в мерзлом (а) и талом (б) состоянии:

1 – пески; 2 – супеси; 3 – суглинки; 4 – торфы.

Коэффициент температуропроводности у талых отложений ниже, чем у мерзлых, для талых торфов он практически неизменен ($a_{th} = 0.15 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$). Максимальные значения температуропроводности (до $1.10 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$) характерны для мерзлых песков.

Оценка влияния содержания органического вещества на температуропроводность показала, что в мерзлых заторфованных суглинках и в суглинках с примесью торфа в диапазоне изменения объемной влажности от 49 до 90 % значения a_f очень близки ($0.57 \cdot 10^{-6}$ – $0.62 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$). В мерзлых минеральных суглинках a_f изменяется от $0.54 \cdot 10^{-6}$ до $0.69 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$ при $W_p = 34$ – 65 %.

Влияние засоленности пород. Для мерзлых пород сопоставление результатов исследования температуропроводности выявило, что засоление понижает a_f на 35–50 % [Алексютин, Мотенко, 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД ПО ГЛУБИНЕ

На рис. 13, 14 приведены сводные колонки скважин № 3 и 4, отражающие изменчивость характеристик отложений в талом и мерзлом состоянии в пределах низкой террасы. Скважина 3 расположена на поверхности террасы с отметкой устья 5.2 м над средним уровнем губы и вскрывает краевую часть ледяной жилы (см. рис. 13). Отложения террасы в этом месте представлены в основном супесями, суглинистый горизонт появляется лишь на отметке, соответствующей урезу воды. Скважина 4, располагающаяся в 60 м к северо-западу от предыдущей и имеющая отметку 4.8 м, пройдена в более суглинистых породах (см. рис. 14). Исследование физических характеристик верхней части разреза (первые 3 м от поверхнос-

ти) показало высокое льдосодержание (i_{tot} от 0.50 до 0.75 д.е.), при оттаивании грунты имеют весовую влажность от 45 до 150 % при плотности 1.2–1.7 г/см³. Нижняя часть разреза сложена менее влажными (W_{tot} варьирует от 19 до 40 %) и более плотными засоленными породами ($\rho < 2.0 \text{ г/см}^3$). Степень засоленности увеличивается с глубиной. Теплофизические свойства пород изменяются с глубиной, для незасоленных песков $\lambda_{th} = 1.7$ – 1.9 Вт/(м·К) , $\lambda_f = 1.8$ – 2.0 Вт/(м·К) , для засоленных – до 1.3 Вт/(м·К) в талом состоянии и до 1.6 Вт/(м·К) в мерзлом. В суглинках $\lambda_{th} = 1.1$ – 1.2 Вт/(м·К) , $\lambda_f = 1.3$ – 1.5 Вт/(м·К) . Отмечается понижение удельной теплоемкости с глубиной, что связано с уменьшением заторфованности и влажности. Для верхней части разреза, сложенного преимущественно суглинистыми грунтами и торфом, удельная теплоемкость в талом состоянии изменяется от 2000 до 3000 Дж/(кг·К), в мерзлом – от 1400 до 2000 Дж/(кг·К). С глубины 2.8 м разрез становится более песчаным, т. е. сложен преимущественно супесями и песками (см. рис. 14); значения C_{th} варьируют от 1300 до 1800 Дж/(кг·К), значения C_f – от 900 до 1300 Дж/(кг·К). Эквивалентное сцепление практически не изменяется с глубиной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изучение пород террас побережья Байдарацкой губы показало большое разнообразие их состава, строения и свойств. Выявлены диапазоны изменения характеристик отложений, а большое количество фактического материала позволяет анализировать, сопоставлять и обобщать различные параметры пород.

Из анализа данных теплофизических свойств отложений следует, что формальное разделение

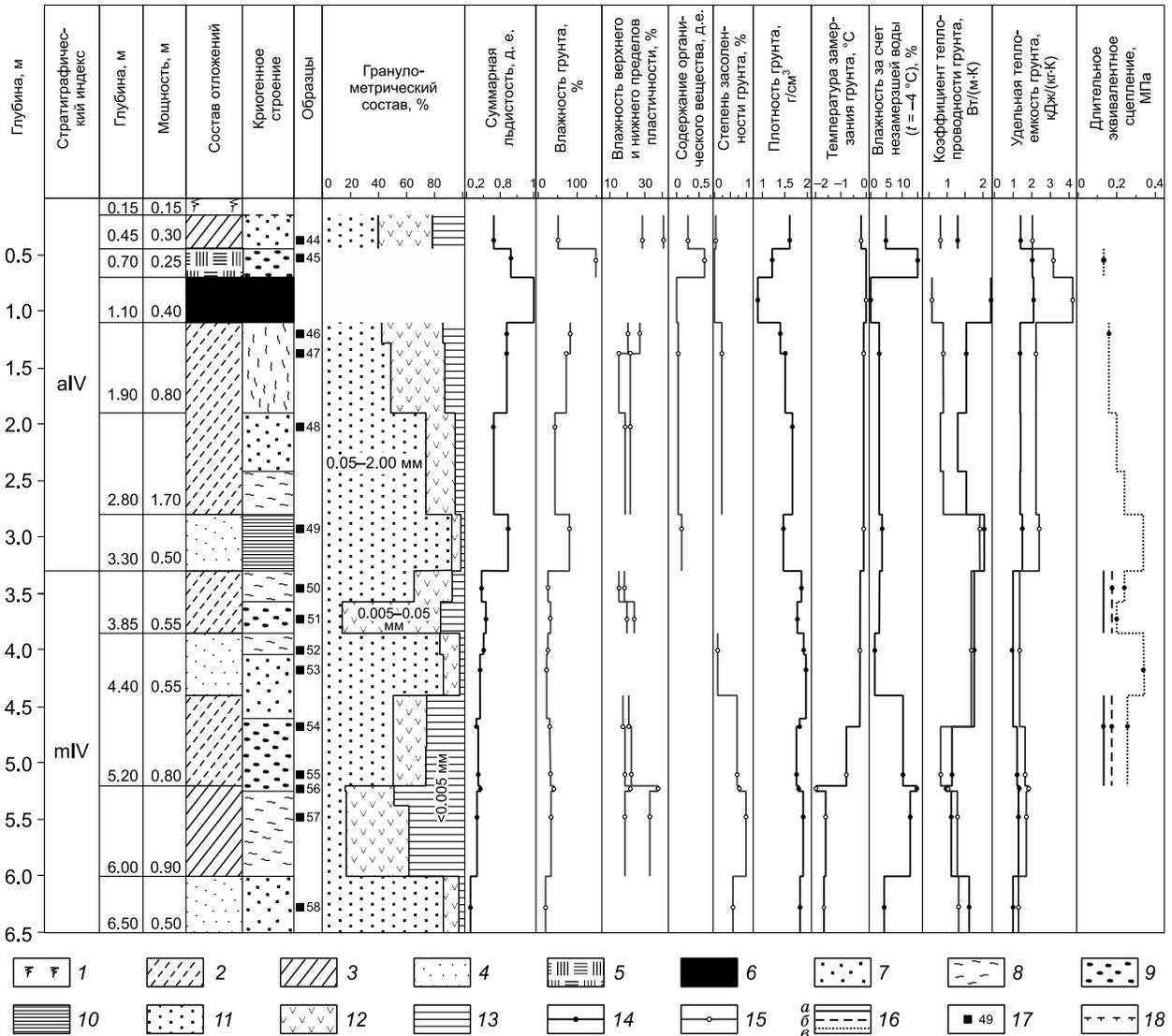


Рис. 13. Разрез по скважине № 3.

1–5 – литология пород (1 – почвенно-растительный слой, 2 – супесь, 3 – суглинок, 4 – песок, 5 – торф); 6 – лед; 7–10 – криогенные текстуры (7 – массивная, 8 – линзовидная, 9 – порфирировая, 10 – слоистая); 11–13 – суммарное содержание частиц (11 – песчаные размером 0.05–2 мм, 12 – пылеватые размером 0.005–0.05 мм, 13 – частицы менее 0.005 мм); 14 – мерзлые образцы; 15 – талые образцы; 16 – длительное эквивалентное сцепление при температурах –3, –5, –8 °С (а, б, в соответственно); 17 – точка отбора образца; 18 – граница талых и мерзлых пород.

отложений на пески, супеси, суглинки, выполненное по числу пластичности [ГОСТ 25100-2011, 2011], иногда может носить условный характер. Это проявляется, например, когда теплопроводность песчаной супеси близка к теплопроводности пылеватого песка, а пылеватой супеси – к теплопроводности легкого суглинка (см. рис. 10), или при сравнении данных по незамерзшей воде в мерзлых отложениях (см. рис. 6). Как показано выше, супеси и суглинки имели различные криогенные текстуры с видимыми ледяными шпирями, и при оттаивании весовая влажность этих отложе-

ний могла быть более 100 %. Исследование показало, что при высоких значениях объемной влажности теплопроводности супесей и суглинков близки и определяются теплопроводностью воды ($\lambda = 0.56$ Вт/(м·К)). Удельная теплоемкость хотя и является аддитивной величиной, но в случае обобщения всех данных для природных рыхлых отложений характер ее зависимости от влажности не прямолинейный. С повышением влажности C увеличивается, однако при значениях объемной влажности выше 50 % теплоемкость скелета породы оказывает меньшее влияние на удельную

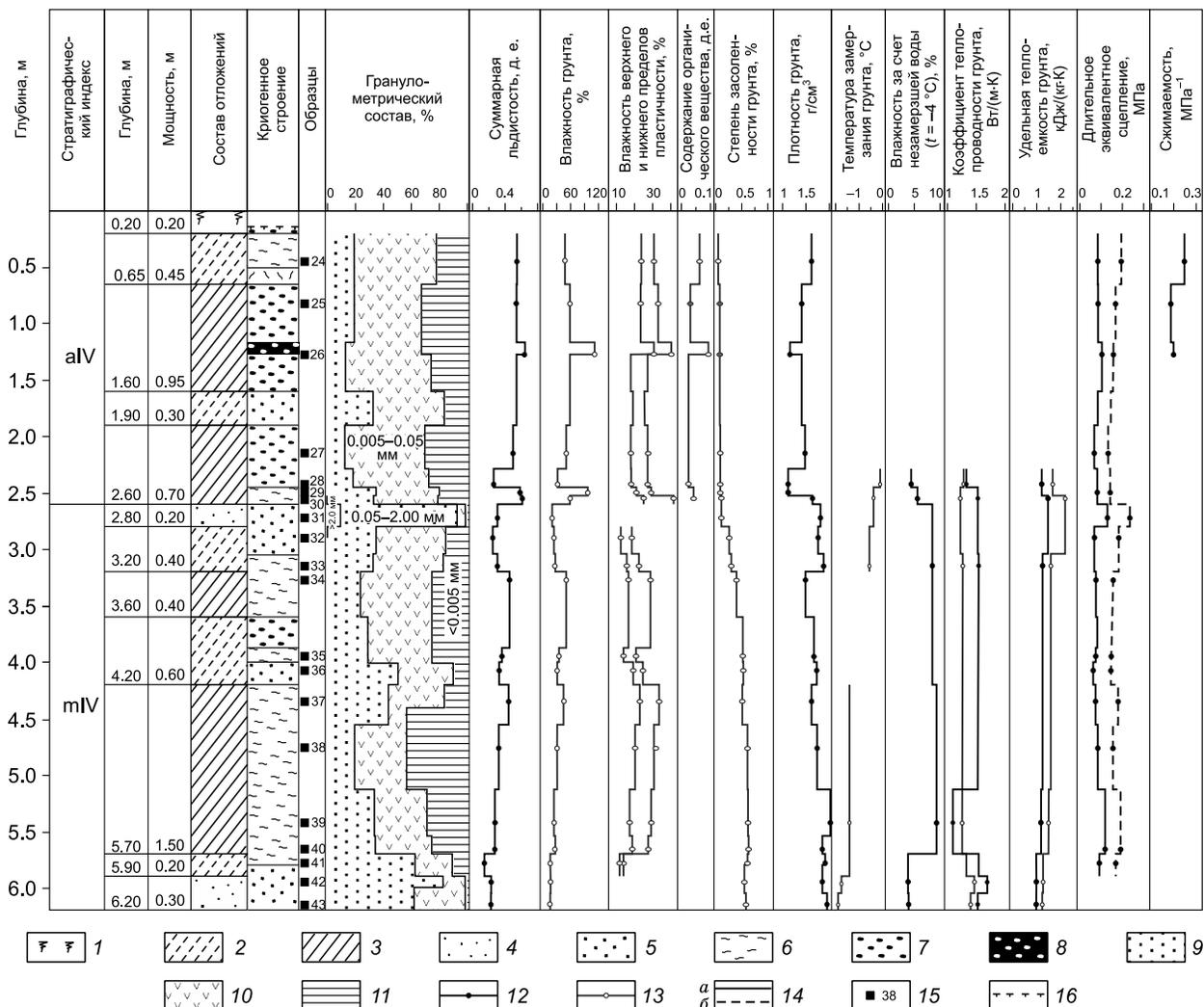


Рис. 14. Разрез по скважине № 4.

1–4 – литология пород (1 – почвенно-растительный слой, 2 – супесь, 3 – суглинок, 4 – песок); 5–8 – криогенные текстуры (5 – массивная, 6 – линзовидная, 7 – порфировая, 8 – атакситовая); 9–11 – суммарное содержание частиц (9 – песчаные размером 0.05–2 мм, 10 – пылеватые размером 0.005–0.05 мм, 11 – частицы менее 0.005 мм); 12 – мерзлые образцы; 13 – талые образцы; 14 – длительное эквивалентное сцепление при температурах $-3, -5^{\circ}\text{C}$ (а, б соответственно); 15 – точка отбора образца; 16 – граница талых и мерзлых пород.

теплоемкость породы, чем теплоемкость воды или льда.

При всем разнообразии изученных отложений побережья Байдарацкой губы полученные результаты исследования теплофизических свойств пород можно обобщить для каждого вида отложений одной кривой с отклонениями в значениях для отдельных образцов, что связано с засолением и содержанием органического вещества в данных разностях.

Полученные закономерности изменения теплофизических свойств, температуры начала замерзания и содержания незамерзшей воды в мерзлых породах в зависимости от различных факто-

ров аналогичны ранее описанным [Фазовый состав..., 1979; Теплофизические свойства..., 1984]. Эти данные для каждого конкретного образца отражают сразу несколько характеристик, анализ и сравнение которых позволяет оценить естественную изменчивость отложений в пространстве и по глубине.

Данные по засоленности и температуре начала замерзания позволяют выделить в разрезе низкой террасы две пачки отложений: верхняя сложена незасоленными породами предположительно континентального генезиса, нижняя представлена засоленными песчаными и супесчаными породами морского генезиса.

Детальное изучение отложений низкой террасы показало их значительное разнообразие, например, в гранулометрическом составе, льдистости и пр., даже в пределах нескольких десятков метров.

Отложения верхней части разреза (до отметок 2 м над современным уровнем губы) очень сильно различаются по дисперсности: в породах, вскрытых скважиной 3, преобладает песчаная фракция, в отложениях, располагающихся северо-западнее (скв. 4), – пылеватая. По данным [Природные условия..., 1997], в пределах низкой террасы в верхней части разреза повсеместно залегают озерно-болотные отложения мощностью до 4–10 м. Авторы предполагают, что породы здесь имеют аллювиальный генезис, но относятся к разным фациям, результатом чего является различное строение и состав отложений.

ВЫВОДЫ

Проведены полевые и лабораторные исследования, выявлены диапазоны изменения характеристик дисперсных пород, получены закономерности изменения состава, строения и свойств талых и мерзлых пород. Установлена связь всех исследуемых параметров между собой, а также в пространстве и по глубине.

По гранулометрическому составу отложения изменяются от тяжелых пылеватых суглинков до песков средней крупности, большая часть разреза морской террасы представлена супесями. Для всех рассматриваемых грунтов характерно большое содержание крупных пылеватых частиц (до 30–40 %).

Породы характеризуются широкими диапазонами изменения естественной влажности и плотности: в суглинках W_{tot} – от 19 до 205 % при плотности 1.1–1.7 г/см³; в супесях W_{tot} – от 9 до 162 % при $\rho = 1.2–2.1$ г/см³; в песках W_{tot} – от 5 до 90 % при $\rho = 1.5–2.0$ г/см³. Для органических грунтов получены максимальные значения естественной влажности $W_{tot} = 115–955$ % при изменении плотности от 0.9 до 1.2 г/см³.

Исследование засоленности пород нижней части разреза низкой террасы выявило морской тип засоления. Диапазон изменения D_{sal} для всех исследованных образцов 0–1 %, максимальные значения характерны для суглинков.

Заторфованные породы встречаются в основном в верхней части разреза, содержание органического вещества в песках до 11 %, в супесях – 15 %, суглинках – 25 %.

Выявлены закономерности изменения незамерзшей воды в мерзлых породах в зависимости от температуры, засоленности и заторфованности. Наибольшее количество незамерзшей воды наблюдается в органических грунтах, наименьшее –

в песках. При среднегодовой температуре пород (–4 °С) W_w в песках изменяется от 0.5 до 4.6 %, в супесях – от 1.1 до 11.5 %, в суглинках – от 4 до 15.2 %, в торфах – от 13 до 40 %.

Получены зависимости изменения теплофизических свойств грунтов от дисперсности, влажности, засоленности и заторфованности. Наибольшие значения теплопроводности установлены в песчаных и супесчаных отложениях. Коэффициент теплопроводности мерзлых пород изменяется от 0.80 до 2.03 Вт/(м·К) в песках, в супесях – от 0.75 до 1.65 Вт/(м·К), в суглинках – от 0.97 до 1.55 Вт/(м·К), в торфах – от 0.8 до 1.3 Вт/(м·К). В талом состоянии λ_{th} песков варьирует от 0.85 до 1.91 Вт/(м·К), супесей – от 0.8 до 1.65 Вт/(м·К), суглинков – от 0.8 до 1.57 Вт/(м·К), торфов – от 0.38 до 0.6 Вт/(м·К). Наибольшие значения теплоемкости наблюдались в торфах и заторфованных отложениях различной дисперсности. Удельная теплоемкость песков составляет 770–2400 Дж/(кг·К) в талом состоянии и до 1500 Дж/(кг·К) в мерзлом; в супесях C_{th} изменяется от 770 до 2900 Дж/(кг·К), C_f – до 1620 Дж/(кг·К); в суглинках C_{th} изменяется от 840 до 3150 Дж/(кг·К), C_f – до 1770 Дж/(кг·К).

Оценка изменчивости свойств пород в пространстве и по глубине выявило, что верхняя часть разреза низкой террасы сложена породами, вероятнее всего, аллювиального генезиса, а нижняя – морскими засоленными разностями.

Полученные данные по составу, строению и свойствам должны быть использованы в качестве входных параметров при моделировании характера и скорости разрушения берега.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам кафедры геокриологии МГУ: зав. кафедрой, д-ру геол.-мин. наук А.В. Брушкову за помощь и поддержку в организации данных работ; д-ру геол.-мин. наук Л.Т. Роман и канд. геол.-мин. наук М.Н. Царапову за консультации и ценные замечания; канд. геол.-мин. наук П.И. Котову и Л.Г. Семиколеновой за помощь в проведении экспериментальных работ по определению физико-механических свойств пород и частично физических свойств.

Работа выполнена в рамках международного проекта SAMcoT.

Литература

- Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г. Оценка влияния засоления и содержания органического вещества в мерзлых породах на западном побережье Байдарацкой губы, их теплофизические свойства и фазовый состав влаги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология, 2016, № 2, с. 59–63.
- Белова Н.Г. Пластовые льды юго-западного побережья Карского моря / Н.Г. Белова. М., МАКС Пресс, 2014, 180 с.

- Геоморфологическая** карта: R-(40)-42 (о. Вайгач–п-ов Ямал). Гос. геол. карта Российской Федерации. Нов. сер. Карта плиоцен-четвертичных образований, м-б: 1:1 000 000 / Ред. Л.Л. Подсосова. М., ВСЕГЕИ, 1999.
- Геоэкология** Севера (Введение в геокриоэкологию) / Под ред. В.И. Соломатина. М., Изд-во Моск. ун-та, 1992, 269 с.
- ГОСТ 25100-2011.** Грунты. Классификация. Введ. 2013-01-01. М., Стандарт-информ, 2011, 38 с.
- ГОСТ 5180-84.** Грунты. Методы лабораторного определения физических свойств. М., Госкомитет по делам стр-ва, 1984, 17 с.
- ГОСТ 12248-2010.** Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М., Стандартинформ, 2011, 109 с.
- ГОСТ 12536-2014.** Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М., Стандартинформ, 2015, 18 с.
- ГОСТ 27753.2-88.** Грунты тепличные. Метод приготовления водной вытяжки. М., Госагропром, 1988, 16 с.
- ГОСТ 26213-91.** Почвы. Методы определения органического вещества. М., Изд-во стандартов, 1992, 5 с.
- Дубиков Г.И.** Геокриологическое строение прибрежной зоны и дна Байдарацкой губы // Геокриологические исследования: Сб. науч. тр. М., МГУ, 1991, с. 124–130.
- Ершов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А., Смирнова Н.Н.** О применимости ряда методик определения теплофизических характеристик и фазового состава влаги для исследования засоленных пород // Там же, с. 117–123.
- Иванова А.М., Войцеховский В.Н.** Геологическая карта масштаба 1:200 000. Объяснит. зап. Сер. Североуральская. Лист R-XXXI-XXXII / Под ред. Ф.Г. Маркова. М., Госгеолтехиздат, 1959, 48 с.
- Инженерно-геологические** и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей / Отв. ред. В.П. Мельников, В.И. Спесивцев. Новосибирск, Наука, 1995, 195 с.
- Камалов А.М., Огородов С.А., Бирюков В.Ю., Совершова Г.Д., Цвечинский А.С., Архипов В.В., Белова Н.Г., Носков А.И., Соломатин В.И.** Морфолитодинамика берегов и дна Байдарацкой губы на трассе перехода магистральными газопроводами // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 3, с. 3–14.
- Методы** геокриологических исследований / Отв. ред. Э.Д. Ершов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 512 с.
- Мировой океан** // Физические характеристики морской воды, изменяющиеся с изменением солености. – URL: <http://www.oceanavt.ru/morskie-soli/1243-fizicheskie-kharakteristiki-morskoj-vody-izmenyayushchiesya-s-izmeneniem-solenosti.html> (дата обращения: 28.04.2015).
- Мотенко Р.Г.** Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых засоленных дисперсных пород: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1997, 195 с.
- Мотенко Р.Г., Комаров И.А.** Результаты экспериментальных исследований фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Материалы Первой конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, с. 287–292.
- Природные условия** Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал–Центр / В.В. Баулин, Г.И. Дубиков, И.А. Комаров и др. М., ГЕОС, 1997, 432 с.
- Теплофизические свойства** горных пород / Отв. ред. Э.Д. Ершов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1984, 204 с.
- Чеверев В.Г.** Природа криогенных свойств грунтов / В.Г. Чеверев. М., Науч. мир, 2004, 234 с.
- Фазовый состав** влаги в мерзлых породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979, 192 с.

*Поступила в редакцию
18 августа 2015 г.*