

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.345

Д.М. Алексютина¹, Р.Г. Мотенко²**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАСОЛЕНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ НА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВЛАГИ**

Приведены результаты лабораторных исследований состава, строения и свойств пород на прибрежном участке западного побережья Байдарацкой губы. Обсуждаются результаты обобщения экспериментальных данных о незамерзшей воде и теплофизических свойствах пород разного гранулометрического состава. Оценена роль химико-минерального состава отложений в виде зависимостей исследуемых свойств пород от степени засоления и содержания в них органического вещества.

Ключевые слова: мерзлые породы, теплофизические свойства, незамерзшая вода, засоленность, содержание органического вещества.

The paper considers laboratory results of the composition, structure and properties for frozen and thawed soils at west coast of Baydara Bay. Experimental data of unfrozen water content and thermal properties are discussed and summarized for different soils. The roles of soil salinity and organic matter content on these data were estimated for frozen and thawed soils.

Key words: frozen soils, thermal properties, unfrozen water, soil salinity, organic matter amount.

Введение. Исследование Арктического побережья в настоящее время актуально из-за того, что на нем расположены крупные скопления природных ресурсов, используемых человеком. Побережья Арктики представляют многокомпонентную динамичную систему, геокриологическое состояние которой зависит от ряда факторов, включающих основные характеристики и свойства отложений, формирующих берега.

Исследования проводились в рамках международного проекта SAMCoT (Sustainable Arctic Marine and Coastal Technology), направленного на изучение особенностей природной среды и ее изменчивости при техногенном воздействии. Для выполнения прогнозных расчетов при моделировании геокриологической обстановки, например, температурного режима пород, глубины оттаивания и др., необходимо знание входных параметров, к которым, в частности, относятся теплофизические свойства отложений и содержание в них незамерзшей воды.

Нашей целью было определение диапазонов изменения теплофизических свойств и фазового состава влаги пород, а также выявление закономерностей их изменения в зависимости от гранулометрического и химико-минерального состава.

Объект исследований и методика его изучения. Исследования проводились на западном побережье

Байдарацкой губы, на 5 км юго-восточнее дельты р. Нгоюяха. В ходе полевых работ пробурено 6 скважин глубиной до 6,5 м, вскрывших современные четвертичные отложения, представленные различными литологическими разностями. В целом 1-я морская терраса в верхней части разреза до глубины 3 м сложена озерно-болотными заторфованными породами, практически повсеместно перекрывающими засоленные морские отложения. Наиболее представительные грунты были отобраны для дальнейших лабораторных исследований, включавших определение влажностных и плотностных характеристик, гранулометрического и химико-минерального состава, содержания незамерзшей воды и льда при определенных значениях температуры, а также теплофизических свойств [Алексютина, Мотенко, 2013]. В ходе экспериментальных исследований использованы разные методы определения состава и свойств пород. Для характеристики химико-минерального состава отложений определяли степень засоленности (D_{sal}) и относительное содержание органического вещества (ОВ) (I_p) по стандартным методикам (ГОСТ 27753.2-88, ГОСТ 26213-91) более чем на 100 образцах.

В результате анализа водных вытяжек выявлен морской тип засоления грунтов 1-й морской террасы со следующими значениями степени за-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, аспирант; *e-mail:* aleksyutina@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, канд. геол.-минерал. н., доцент, ст. науч. с.; *e-mail:* rmotenko@mail.ru

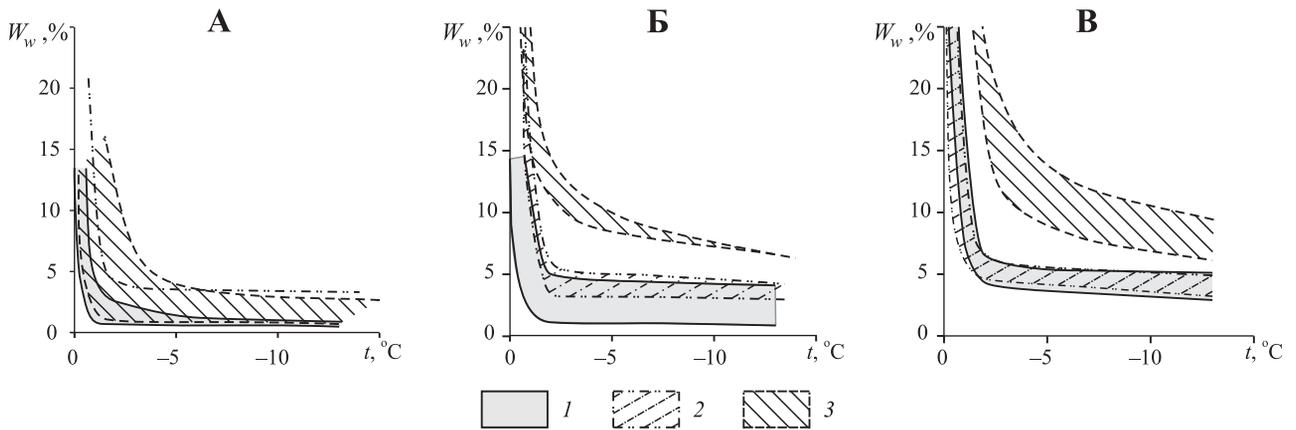


Рис. 1. Результаты изучения содержания незамерзшей воды (W_w) в зависимости от температуры (t) в мерзлых песках (А), супесях (Б) и суглинках (В): 1 — минеральные незасоленные грунты; 2 — органоминеральные незасоленные грунты; 3 — минеральные засоленные грунты

соленности D_{sal} (ГОСТ 25100-2011): в песках от 0,08 до 0,58%, в супесях — от 0,13 до 0,71%, в суглинках — от 0,4 до 1%. Содержание ОВ I_r (ГОСТ 25100-2011) в органоминеральных глинистых и песчаных отложениях изменяется в широком диапазоне: в песке $\leq 11\%$, в супесях от 6 до 14%, в суглинках от 5 до 25%.

Теплофизические свойства и содержание незамерзшей воды определяли на 48 монолитах по отработанным и используемым на кафедре геофизиологии МГУ имени М.В. Ломоносова экспериментальным методикам с двойной повторностью [Ершов и др., 1991; Методы..., 2003]. Исследование теплофизических свойств включало определение значений коэффициентов тепло- и температуропроводности и теплоемкости пород в талом и мерзлом состоянии. Теплофизические свойства грунтов исследованы двумя методами: методом регулярного режима I рода и с помощью термического зонда «KD2 Pro». Точность определе-

ния теплофизических свойств составляла $\pm 7\div 10\%$. Содержание незамерзшей воды (W_w) определяли контактными и криоскопическими методами при 5–7 значениях отрицательной температуры, изменяющейся в диапазоне от 0 до -20°C .

Результаты исследований и их обсуждение.

Содержание незамерзшей воды в мерзлых породах зависит от таких параметров состава и строения пород, как величина удельной активной поверхности, геометрия капилляров и пор, концентрация в поровом растворе ионов солей и др. К основным факторам, влияющим на содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах, относятся их температура, гранулометрический состав, засоленность, заторфованность и др. [Брушков, 1998; Ершов и др., 1999; Чевеверев, 2004].

На рис. 1 представлены результаты определения содержания незамерзшей воды в диапазоне отрицательных температур для песков (рис. 1, А), супесей (рис. 1, Б) и суглинков (рис. 1, В) с разными значениями засоленности и заторфованности.

Проанализируем полученные данные при температуре пород -4°C . В незасоленных незаторфованных песках содержится $< 0,5\%$ незамерзшей воды, в заторфованном песке — 3,4%, в слабозасоленных песках W_w варьирует от 0,7 до 2,1%, в сильнозасоленных — от 1,3 до 2,9%. В минеральных супесях содержание незамерзшей воды изменяется от 1,1 до 4,2%, в заторфованных — от 2,9 до 4,4%, максимальные значения ($W_w = 7\div 7,5\%$) характерны для засоленных образцов. Диапазоны изменения содержания незамерзшей воды в заторфованных и незаторфованных суглинках приблизительно одинаковы, и W_w изменяется от 2,9 до 5,2%, а для засоленных суглинков — от 7,8 до 10,5%.

По мере увеличения температуры, дисперсности, засоленности и заторфованности наблюдается увеличение количества незамерзшей воды. Рассмотрим содержание незамерзшей воды в грунтах разного гранулометрического состава в зависимости от содержания в них ОВ (рис. 2).

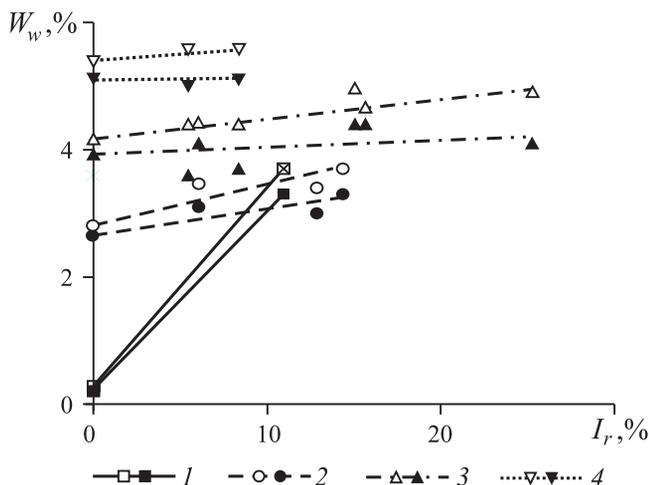


Рис. 2. Зависимость изменения количества незамерзшей воды (W_w) от заторфованности (I_r) и температуры (t) в грунтах разного гранулометрического состава: 1 — пески; 2 — супеси; 3 — суглинки легкие, пылеватые; 4 — суглинки тяжелые, пылеватые. Белые значки — при температуре -4°C , черные — при -10°C

С увеличением количества органического вещества в грунтах повышается содержание незамерзшей воды [Фазовый..., 1979]. Для исследуемых грунтов с разной дисперсностью значения W_w увеличиваются в ряду суглинок тяжелый пылеватый → суглинок легкий пылеватый → супесь → песок. С понижением температуры роль органической составляющей снижается для всех грунтовых разностей. Рассмотрим изменение W_w при температуре -4 и -10 °С. При температуре -4 °С с увеличением содержания ОВ от 0 до 11% в песке W_w увеличивается в 16 раз, в супесях W_w возрастает на 35%, в суглинках легких пылеватых — на 8%, в суглинках тяжелых пылеватых — на 5%. При температуре -10 °С в песке W_w увеличивается в 9 раз, в супесях — на 20%, в легких пылеватых суглинках — на 4%, а в тяжелых пылеватых суглинках заторфованность практически не влияет на W_w .

Наибольшее количество незамерзшей воды выявлено в засоленных грунтах. На рис. 3 представлено влияние засоленности на содержание незамерзшей воды в суглинистых и песчаных грунтах при различной температуре: $-2, -4$ и -10 °С.

С повышением засоленности содержание незамерзшей воды пропорционально увеличивается во всех дисперсных грунтах. Увеличение значений D_{sal} от 0 до 0,8% при температуре -10 °С повышает содержание незамерзшей воды в 10 раз в песках и в 2,5 раза в суглинках; при температуре -2 °С — в 35 и в 6 раз соответственно. При температуре -4 °С W_w увеличивается в песках в 12 раз, в суглинках — в 4 раза.

Теплофизические свойства талых и мерзлых пород на побережье Байдарацкой губы также зависят от множества факторов, таких, как гранулометрический состав, влажность, плотность, температура, засоленность, заторфованность и др.

Максимальные значения коэффициента теплопроводности характерны для песчаных грунтов, а минимальные — для глинистых. Коэффициент

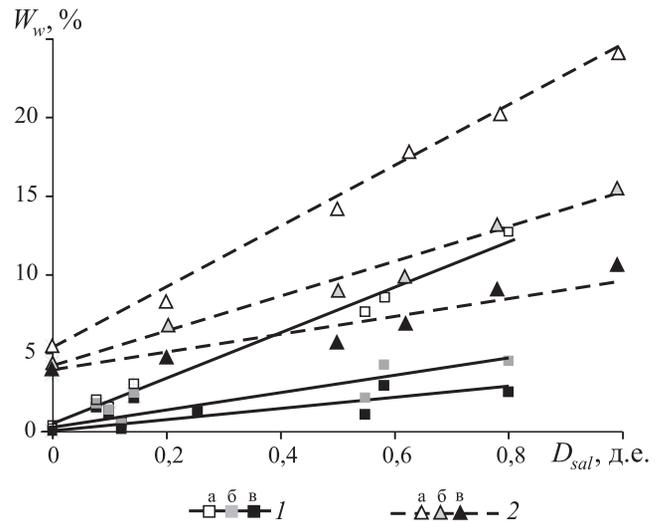


Рис. 3. Зависимость содержания незамерзшей воды (W_w) от засоленности (D_{sal}) в песках (1) и в суглинках (2) при температуре (t): а — -2 °С; б — -4 °С; в — -10 °С

теплопроводности талых песков (λ_{th}) изменяется от 0,24 до 1,91 Вт/м·К, мерзлых (λ_p) — от 0,24 до 2,1 Вт/м·К. В талых суглинках λ_{th} варьирует от 0,18 до 1,53, в мерзлых — от 0,18 до 1,58 Вт/м·К. Коэффициент теплопроводности супесей достаточно близок к значениям λ для песков в диапазоне влажности, соответствующей неполному влагонасыщению, а при дальнейшем увеличении влажности значения теплопроводности супесей сближаются с значениями λ суглинок.

Так как исследования проводились на породах с природными значениями влажности и плотности, изменяющимися в широком диапазоне, результаты исследования теплопроводности пород были обобщены в виде зависимостей от объемной влажности W_p .

Наличие органических остатков в отложениях приводит к уменьшению их теплопроводности. Влияние заторфованности на теплопроводность рассмотрено для наиболее представительных грун-

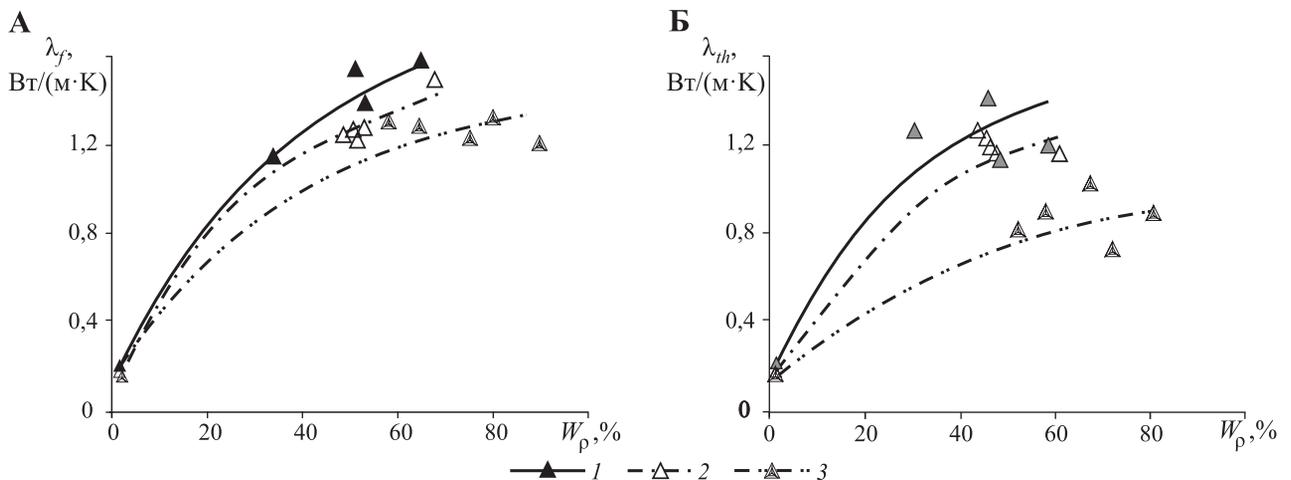


Рис. 4. Зависимость значений коэффициента теплопроводности (λ) суглинок с разным содержанием органического вещества (ОВ) (I_r) от объемной влажности (W_p) в мерзлом (А) и талом (Б) состоянии: 1 — минеральные грунты ($I_r < 3\%$); 2 — суглинки с примесью торфа ($3 < I_r < 5\%$); 3 — суглинки заторфованные ($I_r > 5\%$)

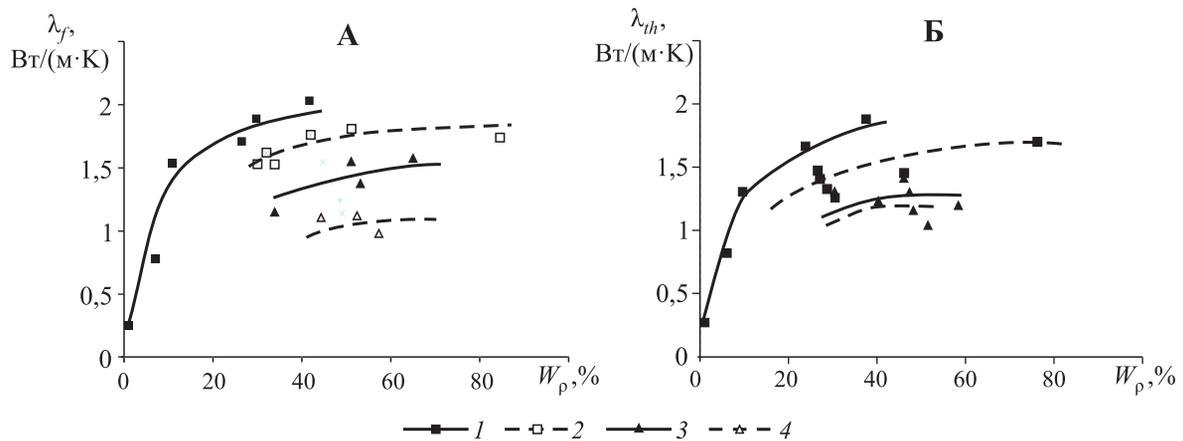


Рис. 5. Зависимость значений коэффициента теплопроводности (λ) засоленных и незасоленных пород от объемной влажности (W_p) в мерзлом (А) и в талом (Б) состоянии: 1 — пески незасоленные ($D_{sal} < 0,05\%$), 2 — пески засоленные ($D_{sal} > 0,05\%$), 3 — суглинки незасоленные ($D_{sal} < 0,2\%$), 4 — суглинки засоленные ($D_{sal} > 0,2\%$)

товых разностей, к которым относятся суглинки. В песчаных и супесчаных грунтах коэффициент теплопроводности подчиняется тем же закономерностям, что и в суглинках. Зависимость значений коэффициента теплопроводности для суглинков с разным содержанием ОВ от объемной влажности показана на рис. 4 для мерзлого (рис. 4, А) и талого (рис. 4, Б) состояния.

Органическое вещество характеризуется более высокими значениями активной удельной поверхности и меньшими значениями теплопроводности по сравнению с минеральными частицами [Фазовый состав, 1979; Роман, 1987; Гаврильев, 2004]. Перечисленные выше особенности ОВ приводят к увеличению количества незамерзшей воды и понижению теплопроводности λ_f . На рис. 4 видно, что теплопроводность в талых слабозаторфованных суглинках (при $3 < I_r < 5\%$) ниже, чем в минеральных на 20% (рис. 2, Б), а в мерзлом состоянии разница составляет $< 15\%$ (рис. 2, А). Роль заторфованности проявляется в талых суглинках значительно, чем в мерзлых, поскольку в исследованных суглинках ОВ незначительно влияет на W_w , и при сильном влагонасыщении преобладает совместное влияние низкотеплопроводной воды и органического вещества.

Кроме того, исследовали влияние засоленности пород на их теплопроводность в зависимости от объемной влажности для мерзлого (рис. 5, А) и талого (рис. 5, Б) состояния.

С увеличением влажности повышается теплопроводность грунта. При засолении увеличивается содержание низкотеплопроводной жидкой фазы, что вызывает понижение коэффициента теплопроводности в мерзлом состоянии [Теплофизические свойства..., 1984]. Например, при влажности 40% в засоленных песках и суглинках значения λ_f на 20% ниже, чем в незасоленных грунтах (рис. 3, А). В талых грунтах наблюдается большой разброс значений λ_{th} и меньшее влияние засоленности (рис. 3, Б).

В грунтах с разной дисперсностью наибольшие значения теплоемкости наблюдались для заторфованных разностей. Значения удельной теплоемкости минеральных суглинков и суглинков с примесью торфа практически не отличаются и варьируют от 840 до 1470 Дж/кг·К в мерзлом состоянии и до 2200 Дж/кг·К в талом.

В талых грунтах теплоемкость засоленных и незасоленных грунтов схожая, а в мерзлых засоленных — повышается из-за увеличения содержания незамерзшей воды. Например, теплоемкость C_f засоленных суглинков варьирует от 1200 до 1380 Дж/кг·К, незасоленных — от 1170 до 1330 Дж/кг·К в диапазоне изменения W_p от 55 до 65%.

Заключение. В результате исследования теплофизических свойств и фазового состава влаги мерзлых пород с разным гранулометрическим составом выявлены диапазоны вариации этих характеристик и получены закономерности изменения теплофизических свойств и фазового состава влаги в зависимости от температуры, засоленности и заторфованности, кроме того, оценена роль химико-минерального состава пород в формировании изучаемых свойства.

Так, в исследованных грунтах при температуре -4°C увеличение засоленности приводит к повышению содержания незамерзшей воды в песках до 6 раз, в супесях до 6,5, а в суглинках — более чем в 2 раза.

Установлено, что заторфованность песчаных грунтов сильно влияет на содержание незамерзшей воды, увеличивая ее в 7 раз; в суглинках влияние заторфованности (в изученном диапазоне) практически не наблюдалось. Воздействие засоления на теплофизические свойства проявилось сильнее в мерзлых грунтах, а заторфованности — в талых. Засоление привело к снижению значений коэффициента теплопроводности в мерзлых грунтах приблизительно на 20% и более; заторфованность понизила теплопроводность, например, в талых

суглинках до 20%, а в мерзлых до 15%. С повышением дисперсности и понижением температуры влияние перечисленных факторов снижается.

Установленные закономерности изменения теплофизических свойств и фазового состава влаги

используются при прогнозных геокриологических оценках, например, для характеристики природной обстановки этой территории и динамики ее изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексютин Д.М., Мотенко Р.Г. Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых грунтов Уральского берега Байдарацкой губы // Инженерная геология. 2013. № 3. С. 36–43.

Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья их происхождение и свойства. М., 1998. 332 с.

Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: Справ. пособие. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 146 с.

Ершов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Геоэкология. 1999. № 3. С. 232–242.

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 // Геокриологические исследования: М., 1991. С. 117–123.

Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 512 с.

Роман Л.Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Новосибирск: Наука, 1987. 219 с.

Теплофизические свойства горных пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.

Фазовый состав влаги в мерзлых породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 192 с.

Чевеверев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. М.: Научный мир, 2004. 234 с.

Поступила в редакцию
01.09.2015