

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ШЕЛЬФЕ И ПОБЕРЕЖЬЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

УДК 551.345.2

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(39-46)

НОВООБРАЗОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД
НА НИЗКИХ ЛАЙДАХ КАРСКОГО МОРЯА.А. Васильев^{1,2}, Г.Е. Облогов^{1,2}, И.Д. Стрелецкая³, Р.С. Широков¹¹Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,
625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; al.a.vasiliev@gmail.com, oblogov@mail.ru²Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

Низкие аккумулятивные поверхности лайд являются областями новообразования многолетнемерзлых пород. Проведены длительные наблюдения за температурным режимом верхних горизонтов мерзлых пород на двух участках – Марре-Сале (западное побережье п-ова Ямал) и Сопочная Карга (западное побережье п-ова Таймыр). Среднегодовые температуры отложений составляют от -3.5 до -4.5 °C на первом участке и от -4.8 до -7.7 °C на втором. Рассчитаны величины тепловых потоков из атмосферы в грунт, которые в верхней части промерзающей толщи достигают 3.4 Вт/м². Установлена высокая корреляция между тепловыми потоками и аномалиями среднегодовых температур воздуха.

Лайды, многолетнемерзлые породы, среднегодовая температура, градиент температуры, тепловой поток

PERMAFROST AGGRADATION IN TIDAL FLATS OF THE KARA SEA

A.A. Vasiliev^{1,2}, G.E. Oblogov^{1,2}, I.D. Streletskaia³, R.S. Shirokov¹¹Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS,
P/O box 1230, Tyumen, 625000, Russia; al.a.vasiliev@gmail.com, oblogov@mail.ru²Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia³Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

The low accumulative laidas (tidal flats) are the areas of the permafrost aggradation. Long-term observations of the thermal regime of upper permafrost have been carried out at the two sites – Marre-Sale (western coast of the Yamal peninsula), and Sopochnaya Karga (western coast of the Taymyr peninsula). Mean annual ground temperature is -3.5 ... -4.5 °C at Marre-Sale, and -4.8 ... -7.7 °C at Sopochnaya Karga. Heat flow from atmosphere to the upper permafrost can reach 3.4 W/m². A high correlation between the heat flows and the average annual air temperature anomalies has been established.

Laidas (tidal flats), permafrost, mean annual temperature, temperatures gradient, heat flow

ВВЕДЕНИЕ

Оценка тенденций и скорости эволюции многолетнемерзлых пород (ММП) в условиях меняющегося климата в последние десятилетия стала одним из приоритетных научных направлений в Арктике. Активно разрабатываются модели и анализируются изменения криолитозоны, включая ее пространственное распространение, температурный режим пород и т. д. [Павлов, 2003; Васильев и др., 2008; Romanovsky et al., 2011; Streletskiy et al., 2014]. При этом подавляющее число работ направлено на исследование процессов деградации мерзлоты. В настоящей статье акцентируется внимание на том, что одновременно с деградацией криолитозоны в субарктических условиях наблюдаются процессы ее новообразования на современных морских лайдах арктических морей, которые пока остаются недостаточно изученными.

Морские лайды – приморские низменные аккумулятивные поверхности, периодически затопляемые во время высоких приливов, ветровых нагонов и штормов. Такие образования широко распространены на побережье Карского моря. К ним можно отнести системы низких островов и кос Марресальских и Шариповых Кошек, поверхности мыса Скуратова, северной части о. Белый и другие морские аккумулятивные образования. Различают низкие лайды с абсолютными отметками до 1.5 м и высокие лайды с превышением 1.5–3 м над уровнем моря. Помимо морских аккумулятивных форм в устьях рек также могут быть развиты аккумулятивные аллювиально-морские низменности.

Уникальное исследование термического режима ММП в мелководной части дельты р. Мак-

кензи (Канада) в годичном цикле было выполнено С. Соломоном в 2005–2006 гг. [Solomon et al., 2008]. Среднегодовая температура верхних горизонтов пород составляла от -2.4 до -3.7 °С. Следует подчеркнуть, что новообразование мерзлоты наблюдалось в пресноводных условиях дельты крупной реки, где температура фазовых переходов близка к 0 °С. Методика измерений и обработка данных представляют большой интерес при организации аналогичных наблюдений в морских условиях. Измерения температуры пород в мелководной зоне в 20-метровой скважине при глубине моря около 4.5 м в районе Марре-Сале в 2014–2015 гг. проведены В.А. Дубровиным с соавт. [2015]. Скважина пробурена на удалении примерно 800 м от берега в талике, отделяющем берег от массива субкавальных многолетнемерзлых пород. Температура на глубине 20 м составила -1.3 °С при температуре фазовых переходов $-1.4...-1.8$ °С. По криогенному состоянию породы относятся к охлажденным. Температура и мощность промерзающих современных морских отложений в районе Шариповых и Марресальских Кошек на западном побережье п-ова Ямал были определены по результатам зимнего бурения Н.Ф. Григорьевым [1987]. При мощности мерзлоты от 5 до 10 м зафиксирована относительно низкая (до -5 °С на глубине 8–10 м) температура. Выявлено чередование твердо- и пластичномерзлых прослоев в разрезе.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА РАБОТ

В качестве объектов изучения процессов новообразования ММП на низких аккумулятивных лайдах Карского моря были выбраны два участка,

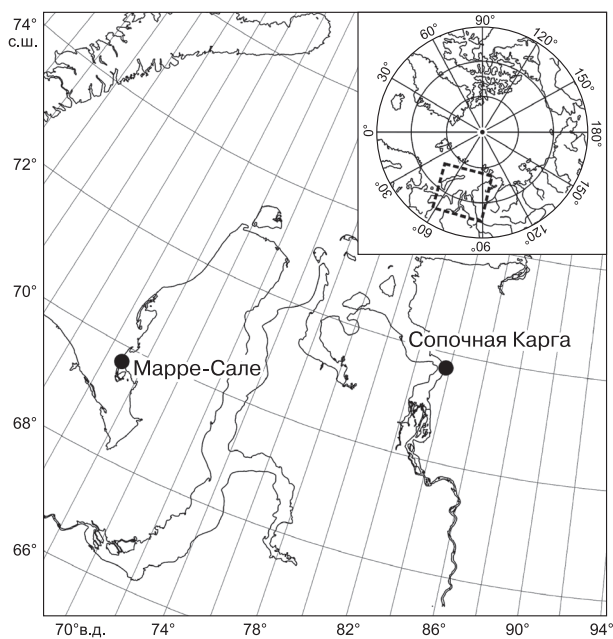


Рис. 1. Местоположение ключевых участков.

принципиально отличающихся по условиям промерзания морских лайд (рис. 1).

Участок *Marre-Sale* ($69^{\circ}42'$ с.ш.; $66^{\circ}49'$ в.д.) расположен на западном побережье п-ова Ямал возле одноименной метеостанции. По данным метеостанции, среднегодовая температура воздуха с 1961 по 1990 г. (климатическая норма) составляет около -7.7 °С. Мощность твердомерзлых пород в субаэральных условиях достигает 100 м, их среднегодовая температура изменяется в пределах $-4.0...-6.5$ °С в зависимости от ландшафтных условий [Васильев и др., 2008].

Примерно в 12 км к югу от метеорологической станции находится низкая аккумулятивная поверхность – лайда. Высота лайды над уровнем моря составляет примерно 0.6 м. Разрез морских отложений на лайде представлен переслаиванием не полностью консолидированных суглинков, супесей и песков (рис. 2). С глубиной степень консолидации отложений увеличивается. Ниже слоя сезонного оттаивания, мощность которого около 1.5 м, встречаются твердомерзлые песчаные горизонты мощностью 0.2–0.4 м, содержащие тонкие линзы и отдельные кристаллики льда и отрицательно-температурные супесчано-суглинистые пластично-мерзлые горизонты мощностью 0.2–0.4 м без видимых ледяных включений. Засоленность аккумулятивных отложений (D_{sal}) около 1.0–1.5 % соответствует морскому режиму осадконакопления (состав солей хлоридно-натриевый). Аналогичные особенности криогенного состояния пород при новообразовании мерзлоты в районе Марре-Сале ранее установлены Н.Ф. Григорьевым [1987].

Скорость современной седиментации на лайде меняется в широких пределах. Обычно на поверхности лайды накапливается 1–6 мм/год современных супесчаных наносов. После экстремального по продолжительности и интенсивности шторма осенью 2009 г. вся поверхность лайды была покрыта слоем песчаных наносов толщиной до 0.4 м.

Участок *Сопочная Карга* ($71^{\circ}53'$ с.ш.; $82^{\circ}42'$ в.д.) расположен на западном побережье п-ова Таймыр в южной части Енисейского залива на границе р. Енисей и собственно Енисейского залива. Он представляет собой низкую песчано-гравийно-галечниковую косу, выдвинутую в море (рис. 3). На аккумулятивной косе сформировались два типа лайды: низкая лайда – плоская выровненная поверхность высотой не более 0.3 м над уровнем Енисейского залива, и высокая лайда, соответствующая неявно выраженному береговому валу высотой до 1.5 м, на котором расположена метеостанция Сопочная Карга. Низкая лайда сложена супесями с включениями гравийно-галечникового материала. Высокая лайда сложена исключительно среднезернистыми хорошо сортирован-

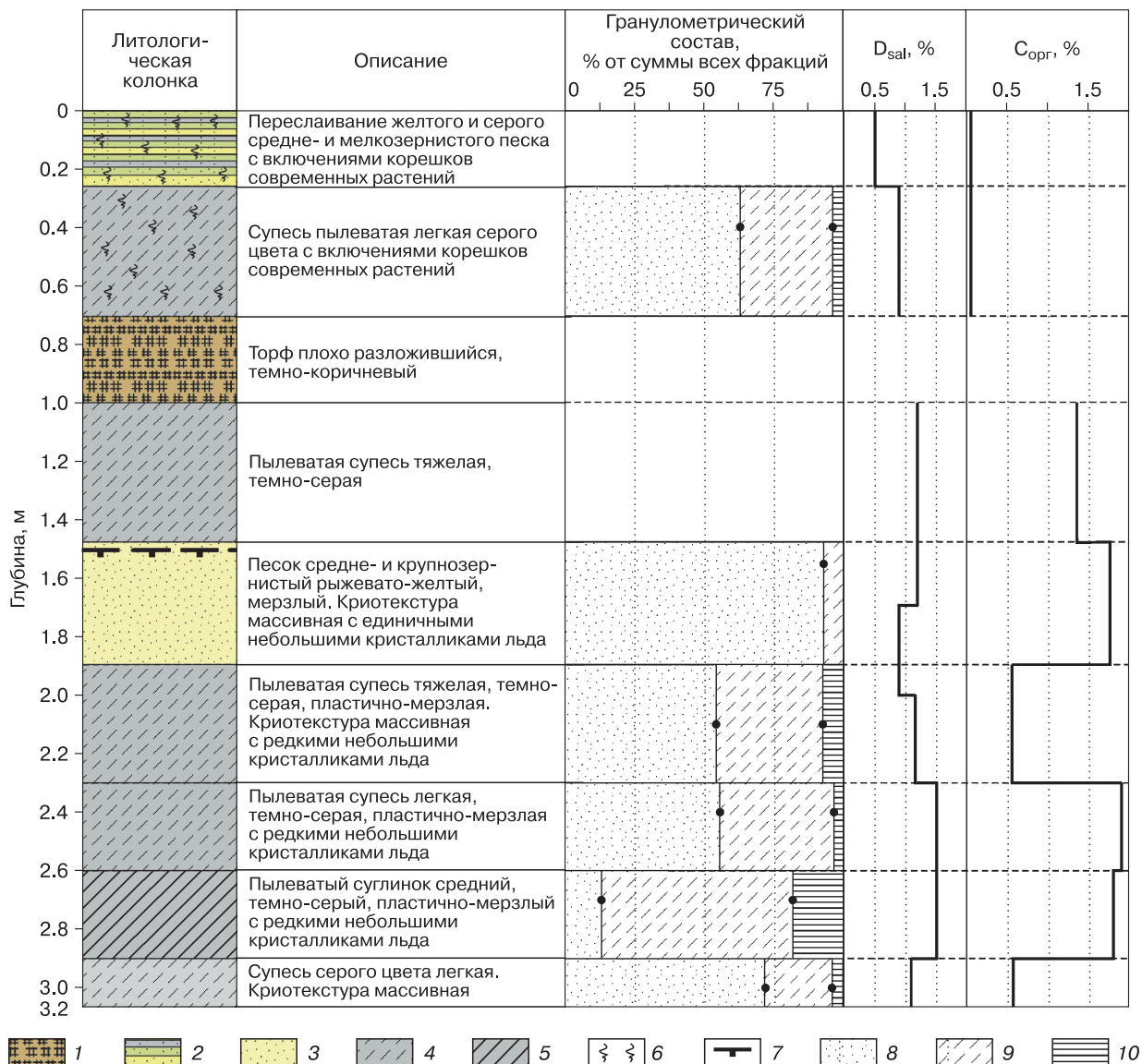


Рис. 2. Разрез отложений низкой морской лайды в районе Марре-Сале с данными опробования пород на гранулометрический состав, содержание органического углерода (C_{орг}), содержание водорастворимых солей (D_{sal}).

1 – торф; 2 – переслаивание мелкозернистого песка; 3 – песок крупнозернистый; 4 – супесь; 5 – суглинок; 6 – включения корней современных растений; 7 – граница мерзлых и талых отложений; 8–10 – содержание частиц гранулометрических фракций по классификации В.В. Охотина: 8 – песчаная фракция; 9 – пылеватая фракция; 10 – глинистая фракция.

ными песками. Скорость современной седиментации на мысе Сопочная Карга понижена по сравнению с Марре-Сале и, вероятно, редко достигает первых миллиметров в год. Вода в этой части Енисейского залива практически пресная, ее соленость немного повышается кратковременно, только в период сильных северных нагонов. Поэтому современные морские аккумулятивные отложения практически пресные (D_{sal} ≤ 1%). Среднегодовая температура воздуха за период 1961–1990 гг. (климатическая норма), по данным метео-

станции Сопочная Карга, равна –11.1 °С. Мощность ММП на водоразделе высотой до 35 м составляет около 300 м, среднегодовая температура пород в субэаральных условиях изменяется от –7.5 до –9.7 °С в зависимости от ландшафта. На основной водораздельной поверхности глубина сезонного оттаивания составляет примерно 0.5 м, на низкой лайде не превышает 0.7 м, а на высокой – 1.5 м. Новообразование ММП на лайде начинается еще на мелководье при глубине моря меньше толщины морского льда, достигающей

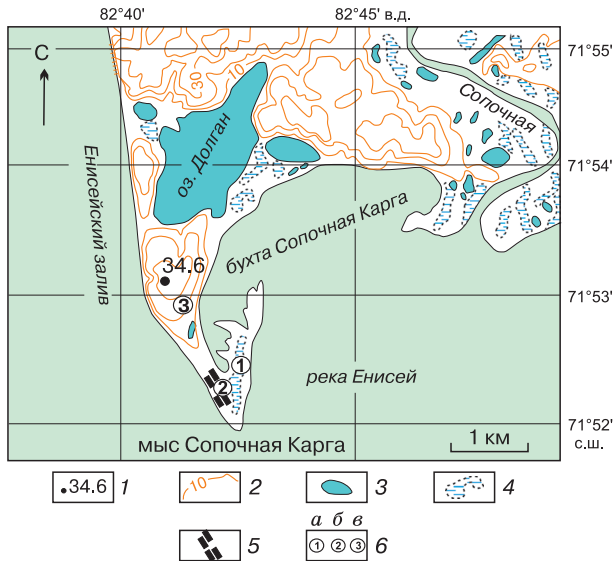


Рис. 3. Карта-схема местоположения логгеров в районе Сопочной Карги.

1 – высотная отметка; 2 – изогипсы; 3 – озера; 4 – заболоченные низкие поверхности; 5 – здания метеостанции; 6 – местоположения скважин с логгерами: а – на низкой поверхности лайды, б – в пределах берегового вала (высокой лайды), в – на водораздельной поверхности.

1.5 м. Мерзлые породы обнаружены в современной морской лагуне при глубине моря около 0.5 м. Разрез на лайдах и в лагуне в районе Сопочной Карги представлен твердомерзлой толщей без прослоев охлажденных пород.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Новообразование многолетнемерзлых пород на морских лайдах происходит при промерзании сверху, поэтому для изучения температурного режима были организованы продолжительные наблюдения в верхних горизонтах промерзающих толщ.

Для изучения температурного режима промерзающих отложений в 2007 г. на участке Марре-Сале на поверхности низкой морской лайды до глубины 3.2 м пробурена скважина и обсажена металлической трубой диаметром 76 мм. Наблюдения за температурой с помощью автономных логгеров НОВО Water Temperature Pro v2 производились на глубинах 0.03, 0.6, 1.1, 1.6, 2.0, 2.5 и 3.0 м. Погрешность измерения температуры логгером такого типа равна ± 0.2 °С. Измерения проводились четыре раза в сутки. В отдельные годы не удавалось извлечь нижние логгеры из скважины, в этих случаях их разбуривали, извлекали и взамен старых устанавливали новые.

При бурении скважины на лайде в Марре-Сале отбирали образцы на определение влажности

пород, гранулометрического состава, содержания и состава солей и общее содержание органического углерода.

Наблюдения за температурным режимом промерзающих отложений на участке Сопочная Карга также начаты в 2007 г. в скважине без обсадки на поверхности высокой лайды, пробуренной до глубины 1.5 м. Здесь был установлен 4-канальный логгер НОВО U12 Outdoor. Погрешность измерения температуры логгерами такого типа равна ± 0.2 °С. Датчики логгера расположены на глубинах 0.2, 0.5, 0.8 и 1.1 м, т. е. в пределах слоя сезонного оттаивания. Измерения проводились четыре раза в сутки. Наблюдения остановлены в 2010 г. В 2009 г. начаты измерения температуры в скважине глубиной 0.8 м, расположенной на низкой лайде, в гравийно-галечниковых отложениях с супесчаным заполнителем. Скважина обсажена пластиковой трубой диаметром 40 мм. Глубина установки автономных логгеров НОВО Water Temperature Pro v2 составила 0.15, 0.32, 0.53 и 0.75 м. Частота измерений также составляла четыре раза в сутки. При этом нижний датчик установлен ниже подошвы слоя сезонного оттаивания. Для сравнения особенностей формирования температурного режима в условиях современного новообразования мерзлоты с сентября 2010 г. были установлены четыре автономных логгера в сезонном слое на водораздельной поверхности. Глубины установки логгеров составляли 0.06, 0.27, 0.4 и 0.6 м, нижний датчик также был установлен ниже глубины сезонного оттаивания. Изучение температурного режима на лайде и водоразделе завершено летом 2014 г.

В процессе исследований в точках установки логгеров также отбирали образцы на определение влажности пород, гранулометрического состава, содержания и состава солей.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Анализ многолетних климатических данных по метеостанциям Марре-Сале и Сопочная Карга показывает, что начиная с 1970-х гг. на побережье Карского моря наблюдается хорошо выраженное потепление климата (рис. 4). Средняя за 45 лет величина повышения среднегодовой температуры воздуха составила для Марре-Сале около 2.6 °С, для Сопочной Карги около 2.4 °С. Как следует из рис. 4, скорость увеличения температуры воздуха возросла после 2000 г. В среднем для региона с 1970 г. скорость повышения среднегодовой температуры воздуха составляет примерно 0.06 °С/год. Столь высокая реальная скорость потепления соответствует самым негативным сценариям потепления климата для западного сектора Арктики [Анисимов, Белолуцкая, 2002]. По данным наблюдений в скважинах, потепление климата в изучаемых районах фактически не останавливает про-

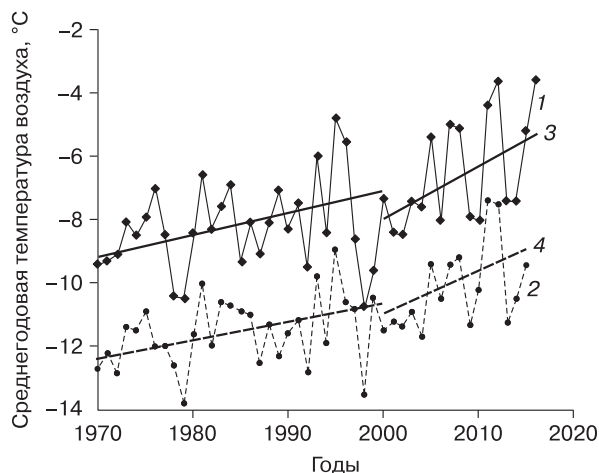


Рис. 4. Среднегодовые температуры воздуха (1, 2) и их линейные тренды (3, 4) после 1970 г. по данным метеостанции Марре-Сале (1, 3) и Сопочная Карга (2, 4).

цесс промерзания и новообразования современной мерзлоты, но тормозит его (рис. 5).

В результате многолетнего мониторинга температурного режима в сезонноталом слое и верхних горизонтах ММП в скважинах на лайдах в районах Марре-Сале и Сопочная Карга получены продолжительные ряды изменения температуры ММП на разных глубинах. Детальные данные дают возможность определить основные особенности изменения температурного режима.

Анализ распределения среднегодовой температуры пород по глубине для участка Марре-Сале (рис. 6) показывает, что глубина нулевых годовых амплитуд температуры промерзающих отложений не превышает 3–4 м. Среднегодовая температура мерзлых пород на глубине 3.5 м составляет $-3.5...-4.5$ °С. Это примерно на 1.5 °С выше, чем в скважинах на поверхности третьей морской террасы [Васильев и др., 2008]. Малая мощность слоя нулевых годовых амплитуд объясняется затратами тепла на фазовые переходы в толще промерзающих засоленных пород с температурой фазовых переходов около -4 °С. По данным Н.Ф. Григорьева [1987], на лайде о. Болотный, расположенного в нескольких километрах от скважины, среднегодовая температура пород на глубине 5 м составляла $-4.0...-5.0$ °С. Глубина нулевых годовых амплитуд температуры (по его данным) достигает 4–5 м. При этом мощность ММП составляет 5–10 м. Следовательно, на морских лайдах в районе Марре-Сале происходит новообразование сравнительно низкотемпературной мерзлоты со среднегодовой температурой ниже -4 °С.

На основе данных многолетних наблюдений можно рассчитать среднегодовую температуру по показаниям температурных датчиков для каждой

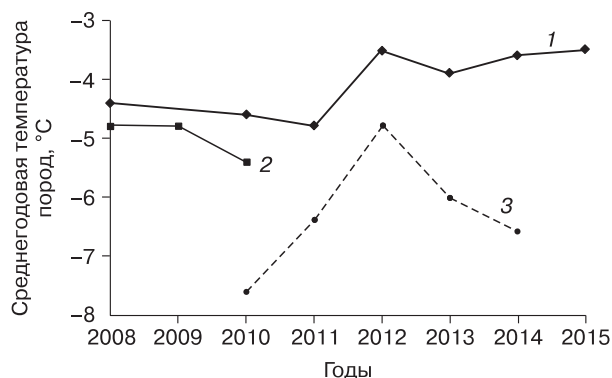


Рис. 5. Межгодовой ход среднегодовых температур верхних горизонтов многолетнемерзлых пород:

1 – Марре-Сале, низкая лайда (глубина 1.6 м); 2 – Сопочная Карга, высокая лайда (глубина 1.1 м); 3 – Сопочная Карга, низкая лайда (глубина 0.65 м).

глубины установки датчика. Далее для каждого года наблюдений можно определить градиенты среднегодовых температур пород в сезонноталом слое в верхнем горизонте ММП и оценить тепловые потоки, осредненные за год. В качестве первого приближения для расчета градиентов температуры использована линейная интерпретация.

Как следует из рис. 6, для разных лет разница среднегодовых температур по глубине (градиент) различна. Максимальный градиент для Марре-Сале отмечался в 2008 г. и достигал 1.6 °С/м. Минимальные градиенты среднегодовой температуры характерны для 2010, 2013 и 2014 гг. В эти годы они имеют отрицательные значения в доли градуса или близки к нулю. Следует также отметить, что именно в эти годы среднегодовая температура воздуха была близка к климатической норме.

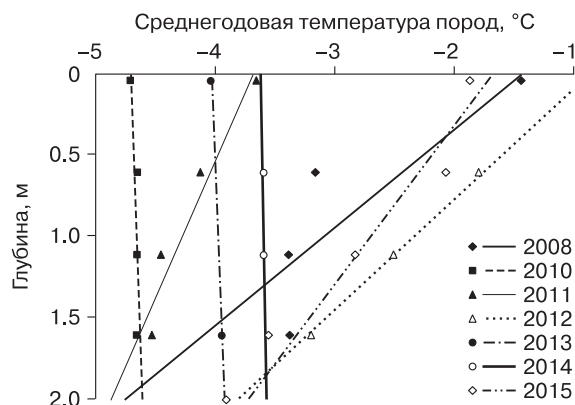


Рис. 6. Распределение среднегодовой температуры в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород по глубине, Марре-Сале (низкая лайда).

Величины аномалий температуры воздуха и градиентов температуры пород в верхних горизонтах промерзающей толщи

Участок	Параметр	2008 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Марре-Сале	Аномалии температуры воздуха, °С	2.6	-0.3	3.3	4.1	0.3	0	2.4
	Градиент температуры пород, °С/м	1.7	-0.2	0.6	1.6	-0.1	0	1.0
Сопочная Карга	Аномалии температуры воздуха, °С	-	1.0	3.8	3.7	0	0.7	-
	Градиент температуры пород, °С/м	-	0.38	0.81	1.0	0.25	0.5	-

Тепловой поток рассчитывается как произведение градиента температуры $\text{grad}T$ [°С/м] на коэффициент теплопроводности λ [Вт/(°С·м)]. Исходные данные для расчетов аномалий температуры воздуха (как разницы среднегодовой температуры за конкретный год и климатической нормы) и величин градиентов температуры в верхних горизонтах промерзающей толщи низких лайд для Марре-Сале и Сопочной Карги приведены в таблице. Градиенты температуры определены на основании трендов среднегодовых температур (см. рис. 6, 7, а). Значения коэффициента теплопроводности приняты по справочным данным [СНУП 2.02.04-88, 2001]. Для мерзлых водонасыщенных супесей λ_f составляет 1.98 Вт/(°С·м), для талых $\lambda_m = 1.86$ Вт/(°С·м). При оценке тепловых потоков учитывали, что около девяти месяцев в году породы в верхнем слое находятся в мерзлом состоянии и только три месяца – в талом. В расчетах использована средневзвешенная за год величина коэффициента теплопроводности $\lambda_{av} = 1.96$ Вт/(°С·м).

Тепловой поток сверху, расходуемый на прогрев верхнего горизонта мерзлой толщи на участке Марре-Сале, в максимально теплые годы более чем в 50 раз превышает величину теплового потока снизу, которая в мелководной части Карского моря составляет 0.045–0.058 Вт/м² [Мельников, Спесивцев, 1995]. В целом за период наблюдений величина теплового потока в верхней части промерзающей толщи изменялась от -0.4 до 3.4 Вт/м².

В более суровых климатических условиях в районе Сопочная Карга при распространении пресных морских отложений происходит новообразование еще более низкотемпературных ММП. Новообразование мерзлоты начинается еще на мелководье. Среднегодовая температура верхнего горизонта ММП на низкой лайде за время наблюдений изменялась от -4.8 до -7.7 °С. Высокая лайда характеризуется величинами среднегодовой температуры пород от -4.8 до -5.4 °С.

В условиях Сопочной Карги не удалось установить глубину слоя нулевых годовых амплитуд.

Распределение и градиенты среднегодовых температур по глубине для каждого года наблюдения отдельно для низкой и высокой лайды Сопочной Карги приведены на рис. 7, а, б соответственно. Обращает на себя внимание различие в значениях градиентов для низкой и высокой лайды, т. е. на разных типах ландшафтов градиенты температур могут различаться по величине. В условиях низкой лайды для всего периода наблюдаются положительные либо близкие к нулю градиенты. Для высокой лайды градиенты среднегодовой температуры по глубине везде отрицательны. В 2010 г. на низкой лайде наблюдалось незначительное отопление и небольшой положительный градиент среднегодовых температур (0.38 °С/м), на высокой лайде – отрицательный градиент среднегодовых температур (-0.4 °С/м).

Как и для Марре-Сале, максимальные величины тепловых потоков сверху превышают тепло-

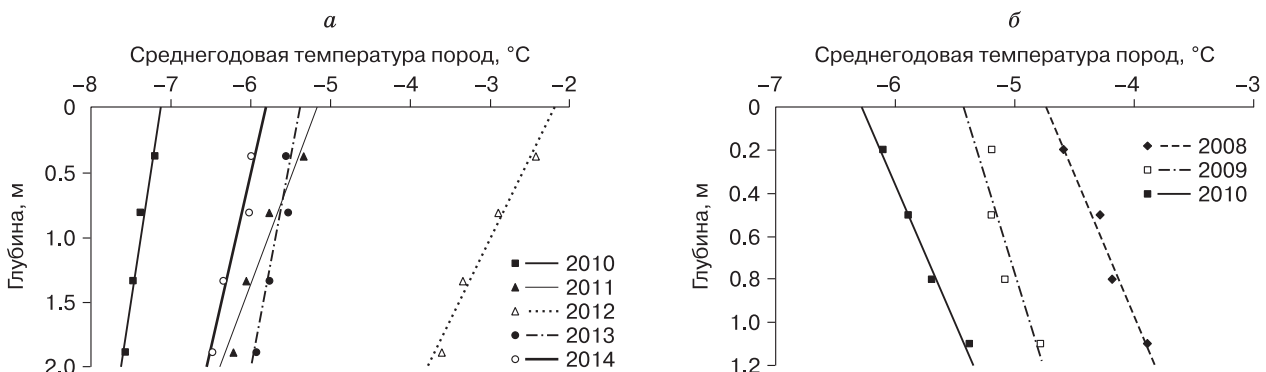


Рис. 7. Распределение среднегодовой температуры в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород по глубине, Сопочная Карга.

а – низкая лайда; б – высокая лайда.

вой поток снизу и изменяются от года к году в пределах 0–2 Вт/м².

Анализ изменения величин среднегодовой температуры и их градиентов в промерзающей толще засоленных и пресных отложений позволяет сделать вывод, что в целом температурный режим при новообразовании ММП отвечает климатической норме. При превышении этой нормы наблюдается отепление мерзлоты и замедление новообразования ММП, а при ее понижении – охлаждение мерзлой толщи и ускоренное промерзание.

Сравнение величин тепловых потоков с аномалией среднегодовой температуры воздуха, рассчитанной как разница между среднегодовыми температурами за текущий год и климатической нормой, показывает их достаточно высокую корреляцию (рис. 8). Радиус корреляции (R^2) для Марре-Сале составляет 0.74, для Сопочной Карги – 0.89. Таким образом, проведенные наблюдения позволяют оценивать тепловые потоки в мерзлый грунт в области новообразования ММП в зависимости от фактических или прогнозных аномалий температуры воздуха.

Это дает возможность упростить модельные расчеты термического состояния промерзающих толщ. Обычно при моделировании термического состояния многолетнемерзлых пород используется температура на дневной поверхности, т. е. граничное условие первого рода. Влияние растительного и снежного покровов учитывается путем введения слоя с заданным тепловым сопротивлением. Однако использование граничных условий первого рода в расчетах новообразования мерзлоты затруднено из-за неизвестных свойств и закономерностей изменения растительного и снежного покровов во времени. Использование величин тепловых потоков в качестве граничного условия второго рода позволяет обойти эту проблему, поскольку тепловой поток в грунт зависит только от аномалий среднегодовой температуры воздуха.

ВЫВОДЫ

Проведены длительные мониторинговые наблюдения за температурным режимом верхних горизонтов засоленных и пресных промерзающих отложений в условиях современных морских лайд Карского моря для двух участков (Марре-Сале на Западном Ямале и Сопочная Карга на Западном Таймыре), различающихся по условиям промерзания.

На фоне общего повышения температуры воздуха в Арктике на низких морских лайдах происходит новообразование ММП по сингенетическому типу криогенеза.

Полученные авторами ряды детальных непрерывных наблюдений позволили оценить средне-

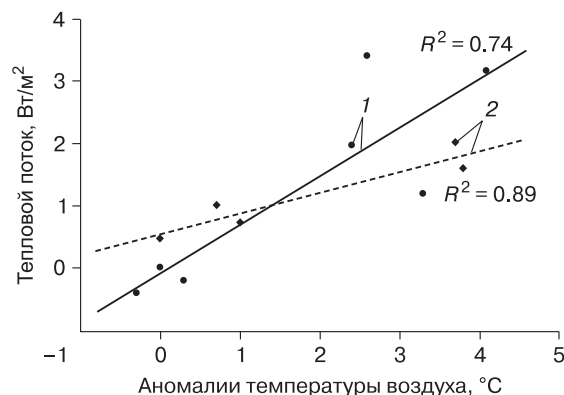


Рис. 8. Корреляция между аномалиями температуры воздуха и тепловыми потоками на низких лайдах.

1 – Марре-Сале; 2 – Сопочная Карга.

годовые температуры верхних горизонтов ММП. В районе Марре-Сале среднегодовая температура пород на лайде составляет –3.5...–4.5 °С. Глубина сезонного оттаивания достигает 1.8 м, а мощность слоя нулевых годовых амплитуд не превышает 3–4 м. Мощность ММП на участках новообразования мерзлоты менее 10 м. Разрез представлен чередованием мерзлых засоленных пород с тонкими линзами и гнездами льда и охлажденных пластичных пород.

На участке Сопочная Карга современное новообразование ММП начинается еще на морском мелководье при глубине моря менее 1.5 м, что соответствует максимальной толщине морского льда. Здесь формируется мерзлая толща со среднегодовыми температурами пород –4.8...–7.7 °С на низкой лайде и –4.8...–5.4 °С на высокой лайде. Разрез представлен пресными монолитными мерзлыми породами с массивной и микролинзовидно-слоистой криогенной текстурой.

Рассчитаны величины тепловых потоков в грунт сверху, которые в отдельные годы превышают тепловые потоки снизу в 50 раз. Установлено, что тепловые потоки близки к нулю, если среднегодовая температура воздуха соответствует климатической норме. Таким образом, можно говорить, что тепловой режим промерзающих пород в целом отвечает климатической норме.

Установлена тесная корреляционная связь тепловых потоков с температурными аномалиями, что позволяет упростить модельные расчеты термического состояния промерзающих толщ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60004). Данные по физическим свойствам отложений получены в рамках проекта РФФИ (№ 16-05-00612 А).

Литература

Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // *Метеорология и гидрология*, 2002, № 6, с. 15–22.

Anisimov, O.A., Belolutskaia, M.A., 2002. Estimation of effect of climate change and permafrost degradation on infrastructure in northern regions of Russia. *Meteorologia i Gidrologia*, No. 6, 15–22.

Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // *Криосфера Земли*, 2008, т. XII, № 2, с. 10–18.

Vasiliev, A.A., Drozdov, D.S., Moskalenko, N.G., 2008. Temperature dynamics of permafrost in Western Siberia in the context of climate change. *Earth's Cryosphere XII* (2), 10–18.

Григорьев Н.Ф. Криолитозона прибрежной части Западного Ямала. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1987, 172 с.

Grigoriev, N.F., 1987. Cryolithozone of Littoral near Western Yamal. Permafrost Institute Press, Yakutsk, 172 pp. (in Russian)

Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Полякова Е.И. Температура, состав и возраст отложений шельфа Карского моря в районе геокриологического стационара Марре-Сале // *Криосфера Земли*, 2015, т. XIX, № 4, с. 3–16.

Dubrovin, V.A., Kritsuk, L.N., Polyakova, E.I., 2015. Temperature, composition and age of the Kara sea shelf sediments in the area of the Marre-Sale geocryological station. *Earth's Cryosphere XIX* (4), 3–16.

Мельников В.П. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей /

В.П. Мельников, В.И. Спесивцев. Новосибирск, Наука, 1995, 198 с.

Melnikov, V.P., Spesivtsev, V.I., 1995. Engineering-geological and Geocryological Conditions of the Barents and Kara Shelf. Nauka, Novosibirsk, 198 pp. (in Russian)

Павлов А.В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз // *Изв. РАН. Сер. геогр.*, 2003, № 6, с. 22–29.

Pavlov, A.V., 2003. Permafrost and climate changes in the north of Russia: observations and forecast. *Izv. RAN, ser. geograf.*, No. 6, 22–29.

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Госстрой России. М., ГУП ЦПП, 2001, 52 с.

SNiP, 2001. Bases and foundations in permafrost. Building Code 2.02.04-88. GUP TsPP, Gosstroy Rossii, Moscow, 52 pp. (in Russian)

Romanovsky, V., Drozdov, D., Oberman, N., et al. Thermal state of permafrost in Russia // *Permafrost and Periglacial Processes. Special Issue: The International Polar Year, 2011*, vol. 21, No. 2, p. 136–155.

Solomon, S.M., Taylor, A.E., Stevens, Ch.W. Nearshore ground temperatures, seasonal ice bonding, and permafrost formation within the bottom-fast ice zone, Mackenzie Delta, NWT // *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost* (Fairbanks, June 29–July 3, 2008). Fairbanks, Instit. Northern Eng., Univ. Alaska, 2008, vol. 2, p. 1675–1680.

Streletskiy, D.A., Anisimov, O.A. Vasiliev, A.A. Permafrost degradation // *Snow and Ice-Related Risks, Hazards and Disasters* / W. Haeberli, C. Whiteman (Ed.). Oxford, Elsevier, 2014, p. 303–344.

*Поступила в редакцию
27 мая 2018 г.*