

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЛУБИНЫ ПРОТАИВАНИЯ ПЕСЧАНЫХ ПОРОД В РАЙОНЕ МЕТЕОСТАНЦИИ МАРРЕСАЛЕ

Аннотация. В работе представлен алгоритм расчета глубины сезонно-талого слоя многолетнемерзлых грунтов, учитывающий периодические изменения температуры поверхности грунта, среднегодовую температуру на подошве сезонно талого слоя, теплофизические характеристики, состав, плотность и влажность грунта. Проведено вычисление глубины сезонно-талого слоя для песчаных пород Западного Ямала в районе метеостанции Марресале за период с 1915 по 2015 гг.

Ключевые слова: математическое моделирование, температура поверхности грунта, глубина протаивания, сезонно-талый слой, Ямал.

Введение

Климатические изменения последних десятилетий усилили внимание к оценке геокриологических условий. По данным [1] потепление климата привело к увеличению температуры многолетнемерзлых пород (ММП) на $0,5-2,0^{\circ}$ за последние 20-30 лет. Оценка межгодовой динамики глубины сезонно-талого слоя (СТС) возможна с помощью многолетних рядов метеорологических данных методами математического моделирования. Для решения задачи о протаивании грунтов использованы формулы Кудрявцева [2]. Они учитывают периодические изменения температуры поверхности грунта, среднегодовую температуру на подошве СТС, теплофизические характеристики, состав и плотность грунта, влажность [2]. Рассмотрена реакция тундровых ландшафтов в районе метеостанции

Марресале, сложенных с поверхности песчаными породами разной суммарной влажности в период с 1915 по 2015 гг.

Методика

Процессы промерзания и протаивания грунтов описываются задачей переноса тепла в сплошной среде с фазовыми переходами (задача Стефана) [3]. Для современных региональных оценок реакции мерзлоты на изменения климатических условий используют приближенные формулы Кудрявцева [4]. Выражение для определения глубины СТС [5], учитывающее периодические колебания температуры на поверхности и температурную сдвигку, имеет следующий вид

$$\xi = \frac{2(A_{\Pi} - T_M) \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot P \cdot C}{\pi}} + \frac{(2A_M \cdot C \cdot \xi_M + L_v \cdot z_T) \cdot L_v \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot P}{\pi \cdot C}}}{2A_M \cdot C \cdot \xi_M + L_v \cdot z_T + (2A_M \cdot C + L_v) \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot P}{\pi \cdot C}}}, \quad (1)$$

где ξ – глубина СТС, м;

T_M – среднегодовая температура многолетнемерзлых пород на подошве СТС, °С, рассчитывается по формуле (2);

A_{Π} – амплитуда годовых колебаний на поверхности грунта, °С, определяется по формуле (3);

λ – приведенная теплопроводность грунта, Вт/(м·°С), вычисляется по формуле (5);

C – объемная теплоемкость грунта, Вт·ч/(м³·°С);

P – продолжительность года в часах, $P = 8760$ ч;

L_v – теплота таяния грунта, Вт·ч/(м³), определяется по формуле (6);

A_M – амплитуда годовых колебаний на подошве СТС, °С, вычисляется по формуле (7);

ξ_M – глубина сезонного промерзания за счет незамерзшей воды, м, рассчитывается по формуле (8).

$$T_M = \frac{0,5 \cdot T_{\Pi} \cdot (\lambda_M + \lambda_T) + A_{\Pi} \cdot \frac{\lambda_T - \lambda_M}{\pi} \cdot \left(\frac{T_{\Pi}}{A_{\Pi}} \cdot \sin^{-1} \frac{T_{\Pi}}{A_{\Pi}} + \sqrt{1 - \frac{T_{\Pi}^2}{A_{\Pi}^2}} \right)}{\lambda^*}, \quad (2)$$

где T_{Π} – среднегодовая температура поверхности грунта, °С, определяется по формуле (3); λ_T и λ_M — коэффициенты теплопроводности талой и мерзлой зоны, а $\lambda^* = \lambda_M$, если числитель меньше нуля, и $\lambda^* = \lambda_T$, если числитель больше нуля.

Температура поверхности грунта T_{Π} и среднегодовая амплитуда ее колебаний A_{Π} определяются через соответствующие параметры воздуха T_B и A_B

$$\begin{aligned} T_{\Pi} &= T_B + \Delta T_{\text{сн}} + \Delta T_{\text{рп}} \\ A_{\Pi} &= A_B - \Delta A_{\text{сн}} - \Delta A_{\text{рп}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta T_{\text{сн}}$, $\Delta A_{\text{сн}}$, $\Delta T_{\text{рп}}$, $\Delta A_{\text{рп}}$ – поправки, учитывающие влияние снежного покрова и растительности. Для упрощения расчетов принято, что растительный покров отсутствует, а поправки, связанные с утепляющим эффектом снежного покрова рассчитываются следующим образом

$$\Delta T_{\text{сн}} = \Delta A_{\text{сн}} = A_B \cdot \left(1 - \exp\left(-H_{\text{сн}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot c_{\text{сн}} \cdot \rho_{\text{сн}}}{P \cdot \lambda_{\text{сн}}}}\right)\right), \quad (4)$$

где $H_{\text{сн}}$ – средняя за зимний период высота снежного покрова, $c_{\text{сн}}$, $\rho_{\text{сн}}$ и $\lambda_{\text{сн}}$ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность снега; P – продолжительность года.

$$\lambda = \frac{\lambda_T \cdot (A_{\Pi} + T_M) + \lambda_M \cdot (A_{\Pi} - T_M)}{2A_{\Pi}}. \quad (5)$$

$$L_v = L_0 \cdot (w_{\text{tot}} - w_w) \cdot \rho_d, \quad (6)$$

где L_0 – значение удельной теплоты фазовых превращений вода-лёд, $L_0 = 93$ Вт·ч/кг; w_{tot} и w_w – суммарная и влажность за счет незамерзшей воды соответственно, доли ед.; ρ_d – плотность сухого грунта, кг/м³.

$$A_M = \frac{A_{\Pi} - T_M}{\ln\left(\frac{A_{\Pi} + L_v/2C}{T_M + L_v/2C}\right)} - \frac{L_v}{2C}, \quad (7)$$

$$\xi_M = \frac{2(A_{\Pi} - T_M) \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot P \cdot C}{\pi}}}{2A_M \cdot C + L_v}. \quad (8)$$

С помощью уравнений (1)-(8) можно рассчитать сезонную глубину протаивания ММП.

Климатические условия района исследования

Район исследования расположен на побережье Карского моря в арктической зоне типичной тундры, характеризуется суровыми климатическими условиями и сплошным распространением многолетней мерзлоты. По данным метеостанции Марресале (69,7° с.ш., 66,8° в.д., 24 м.) [6]: снежный покров сохраняется девять месяцев в году, со средней высотой 15 см, а многолетняя продолжительность периода отрицательных температур составляет 242 дня. На рис. 1а. изображено изменение температуры воздуха на метеостанции Марресале с начала наблюдений и до 2017 года. Красные точки означают годы с пропусками наблюдений (1918, 1919, 1920, 1921, 1973, 1974, 1975, 1976, 2000, 2002, 2004, 2007). Пропуски массивов данных замены десятилетними скользящими средними значениями. Чтобы проанализировать изменение температуры воздуха, был построен ее многолетний ход (рис. 1б.) за период наблюдений (скользящие средние десятилетние). Анализируя совместно рис. 1а и рис. 1б видно, что весь период разбивается на несколько интервалов: потепление до 1945, похолодание с 1946 по 1980, еще одно потепление с 1980 по 2000 и современное потепление – с 2001 года по настоящее время. Многолетняя среднегодовая температура на метеостанции Марресале равна $-7,74^{\circ}$ (красная линия рис. 1б), тогда как максимальная и минимальная равны $-5,35$ в 2016 и $-11,09$ в 1958 соответственно.

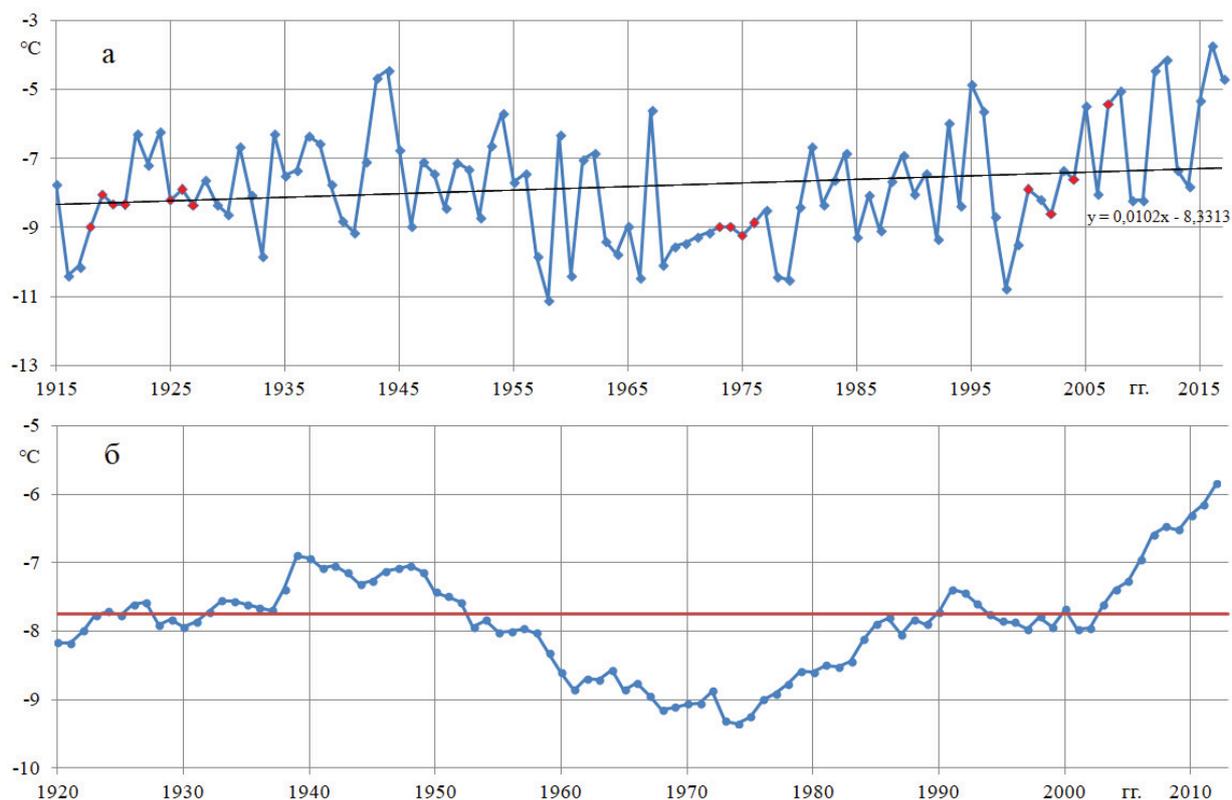


Рис. 1. Изменение температуры воздуха (а) и ее многолетний ход (скользящее среднее десятилетнее) на метеостанции Марресале за весь период наблюдений до 2017 года.

Результаты

Для использования формул Кудрявцева, необходимо наличие установившихся периодических колебаний температуры воздуха. Это возможно только при усреднении месячных значений температуры воздуха за несколько лет. Учитывая выделенные интервалы похолодания и потеплений, период наблюдений был разбит на десять равных частей (табл. 1).

Таблица 1. Средние десятилетние значения температуры воздуха T_B , амплитуды ее колебаний A_B , температуры поверхности $T_{П}$, высоты снежного покрова $H_{сн}$.

№	Годы	T_B , °C	A_B , °C	$T_{П}$, °C	$H_{сн}$, см
1	1915-1925	-8,21	29,16	-7,31	13,98

2	1925-1935	-7,91	26,18	-7,10	14,06
3	1935-1945	-6,88	26,24	-6,29	10,17
4	1945-1955	-7,50	28,22	-6,83	10,74
5	1955-1965	-8,70	29,36	-7,63	16,72
6	1965-1975	-9,07	29,58	-8,20	13,26
7	1975-1985	-8,54	29,34	-7,64	13,85
8	1985-1995	-7,56	29,68	-6,45	17,14
9	1995-2005	-7,96	29,56	-6,88	16,76
10	2005-2015	-6,39	27,78	-5,55	13,65

Расчет глубины сезонно-талого слоя проводился для пород, сложенных с поверхности песком с суммарной влажностью $w_{tot} = 0,05, 0,1$ и $0,2$ и плотностью $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$. Теплофизические параметры взяты из СНиП 2.02.04-88 [7]. На рис. 2 изображено изменение глубины сезонно-талого слоя с 1915 по 2015 гг. в районе метеостанции Марресале для песков с суммарной влажностью $w_{tot} = 0,1$. Глубина сезонно-талого слоя изменяется от 93 до 132 см со средним значением $\xi_{av} = 110$ см. Наблюдаются два минимума в 1925-1935 и 1965-1975 и два максимума в 1985-1995 и 2005-2015 гг. Несмотря на то, что в 1935-1945 средняя температура воздуха была близка к современной, глубина СТС оказалась немного выше среднего значения. В этом случае прослеживается влияние высоты снежного покрова и амплитуды колебаний температуры воздуха.

При изменении значения суммарной влажности, меняются и теплофизические параметры. Увеличение суммарной влажности до $w_{tot} = 0,2$ приводит к уменьшению глубины сезонно-талого слоя на 8-9 см, а уменьшение до $w_{tot} = 0,05$ – к увеличению СТС на 1-2 см.

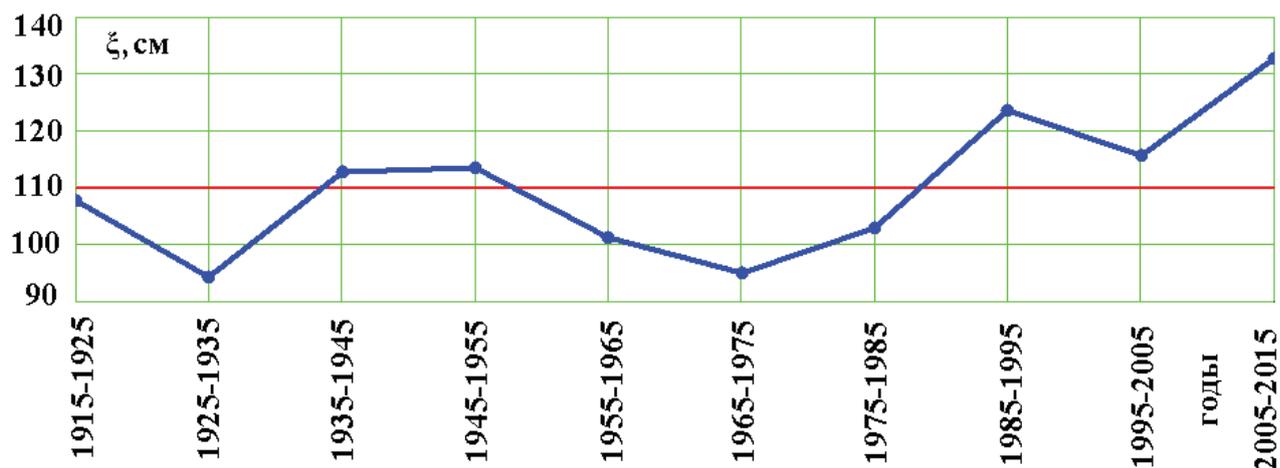


Рис. 2. Изменение глубины СТС для песчаных пород плотностью $\rho = 1400$ кг/м³ и суммарной влажностью $w_{\text{tot}} = 0,1$ в районе метеостанции Марресале за период с 1915 по 2015 годы

Заключение

Полученное изменение глубины сезонно-талого слоя для пород, сложенных с поверхности песками изменяется софазно с многолетним ходом температуры воздуха, но за счёт влияния амплитуды её колебаний и высоты снежного покрова некоторые экстремумы оказались более сглаженными. Например, в эпоху 1935-1945 гг. со средней температурой $T_B = -6,88^\circ$, амплитудой $A_B = 26,24$ и высотой снежного покрова $H_{\text{сн}} = 10,17$, глубина СТС оказалась меньше на 10 см, чем в эпоху 1985-1995 гг. с меньшей температурой воздуха $T_B = -7,56^\circ$, но большими амплитудой $A_B = 29,68$ и высотой снежного покрова $H_{\text{сн}} = 17,14$.

При одинаковой плотности песка $\rho = 1400$ кг/м³ и при разных значениях его суммарной влажности ($w_{\text{tot}} = 0,05, 0,1$ и $0,2$) результаты следующие: увеличение суммарной влажности с $0,1$ до $0,2$ приводит к снижению глубины сезонно-талого слоя на 8-9 см, а ее уменьшение до $0,05$ – к увеличению глубины на 1-2 см.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания Рег.№ НИОКТР АААА-А17-117051850062-6; при поддержке гранта РФФИ № 18-55-11005 Механизмы, траектории и пятнистость изменений Арктических экосистем, вызванных потеплением климата (ClimEko).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H. Permafrost thermal state in the Polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: a Synthesis // Permafrost and Periglacial Processes, 2010, vol. 21, p. 106–116.

2. Общее мерзлотоведение (геокриология): учебник – 2-е изд. / В.А. Кудрявцев. – М.: Изд-во МГУ, 1978, 464 с.

3. Ершов Э.Д. Общая геокриология: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.

4. Кудрявцев В.А. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / В.А. Кудрявцев, Л.С. Гарагуля, К.А. Кондратьева, В.Г. Меламед. М., Изд-во Моск. ун-та, 1974, 431 с.

5. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем; под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 511 с.

6. Всероссийский научно_исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИГМИ_МЦД). URL: <http://meteo.ru/data>.

7. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: ЦИПТ Госстроя СССР, 1990. 56 с.