



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(выпускная квалификационная работа)

На тему **Разработка модели для**
оценки процессов оттаивания
мерзлых грунтов

Исполнитель Попов Георгий Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«12» июня 2023 г.

Санкт–Петербург
2023

Содержание

	2
Введение	2
1.Физико географическое описание	3
1.1Административное положение	3
1.2 Рельеф	4
1.3 Климат	4
1.4 Геологическое строение и гидрогеологические условия	7
2. Разработка математической модели оттаивания мерзлых грунтов	12
2.1 Построение конечно-разностных схем	12
2.2 Исходные данные	15
2.3 Построение графиков зависимости	37
2.4 Получение уравнения и апробация модели	41
2.5 Результаты	44
Заключение	48
Список использованных источников	49

Введение

Глобальное изменение климата оказывает существенное влияние как на окружающую среду, так и на деятельность человека в целом, поэтому возникает необходимость спрогнозировать будущие изменения.

Основная цель работы заключается в разработке модели прогноза оттаивания грунтов в зонах многолетней мерзлоты.

Задачи работы:

- Найти зависимости между переменными в массиве входных данных и проанализировать их.
- Вывести уравнение модели и выпустить прогноз.
- Проанализировать результат.

1. Физико географическое описание

1.1 Административное положение

Се́верная Земля – архипелаг на границе морей Карского и Лаптевых, к северу от п-ова Таймыр, в России, в Красноярском крае. Состоит из 4 крупных островов (Октябрьской Революции, Большевик, Комсомолец, Пионер) и мелких (Шмидта, Малый Таймыр, Старокадомского, Крупской и др.).



Рисунок 1.1 — Снимок со спутника. Июль 2001 года.

1.2 Рельеф

С конца миоцена архипелаг неоднократно подвергался покровным оледенениям. Преобладает платообразный (о. Большевик), низкогорно-холмистый (о. Пионер) рельеф с широким распространением высоких (до 200 м, о. Октябрьской Революции) и низменных (о. Комсомолец) равнин. Ледниковые купола (выс. 965 м). В прибрежных частях – террасированные низменные равнины, полого спускающиеся к морям и образующие отмелье берега с песчано-галечниковыми косами, пересыпями и лагунами. Известно 287 ледников; общая площадь 18,3 тыс. км². Островные ледниковые щиты состоят из куполов и выводных ледников, покрывающих плато и возвышенные равнины. Выводные ледники занимают части узких и глубоких фьордов на западном побережье о. Большевик и на восточном – о. Октябрьской Революции; крупнейший – Арктического института ледник (длина около 40 км) – находится на западном побережье о. Комсомолец. Общая площадь около 37 тыс. км². Берега местами скалисты и обрывисты (высотой до 300 м и более), изрезаны глубокими фьордами. Архипелаг представляет собой часть мезозойской Таймыро-Североземельской складчатой области.

1.3 Климат

Климат Арктических островов отличается суровостью. Тепло поступает лишь за счет атмосферной циркуляции и морских течений.

Рассматриваемая территория относится к климатическому району, охватывающему часть Карского моря и моря Лаптевых. Из-за сильного влияния сибирского антициклона здесь наблюдаются низкие температуры зимы и весны, незначительная облачность (4—6 баллов), слабые ветры и небольшие суммы среднегодовых осадков (94—126 мм). На Северной Земле среднемесячные температуры от 25 до 30 градусов Цельсия. В июле средняя температура не поднимается выше +2, максимальная температура не превышает +10 градусов Цельсия. Мощность снегового покрова на Северной Земле около 50—60 см. На архипелаге наблюдаются морозное выветривание, солифлюкционные и эрозионные процессы[4].

На сегодняшний день территорию Северной Земли охватывают наблюдения 3-х полярных метеорологических станций: Мыс Челюскина, Мыс Баранова, Остров Голомянный. Сопоставление сумм осадков, полученных на основе данных осадкомеров на рассматриваемых станциях за гидрологический год, а также отклонения (%) от климатической нормы за месяц по данным полярных станций Мыс Челюскин и Остров Голомянный позволяют выявить ряд закономерностей. Максимум отклонения осадков от климатической нормы

отмечается весной; за осенне–зимний период в среднем осадков выпадает около нормы (исключение составляет зима 2017 г. на станции Остров Голомянный). Минимумом характеризуется 2014–2015 гидрологический год, и он прослеживается в данных всех трех станций. На станции Остров Голомянный выпадает менее всего осадков, тогда как на о. Большевик сумма осадков за холодный период максимальна (исключение составляют 2016–2017 гидрологический год)[5].

Следует отметить, что жидкие осадки измеряются осадкомерами достаточно надежно, а твердые осадки из–за искажающего действия ветра — весьма приблизительно, особенно в условиях Арктики, где скорость ветра бывает весьма значительной (Брызгин, Швер, 1976). НИС «Ледовая база Мыс Баранова» находится в северной части о. Большевик, на берегу пролива Шокальского, разделяющего острова Большевик и Октябрьской Революции. Здесь ледовые купола с юга (ледник Ленинградский на о. Большевик, максимальная высота 935 м), с запада (ледник Карпинский на о. Октябрьской Революции, максимальная высота 965 м) и с юго–запада (ледник Университетский на о. Октябрьской Революции, максимальная высота 800 м) выполняют заградительную функцию для ветра южных и западных направлений. Это обстоятельство, а также

наличие располагающегося в юго-западном направлении пролива Шокальского, берега которого представляют собой в основном скальные обнажения высотой до 200 м, создают условия для переформирования направлений ветра южных и западных румбов в устойчивый юго западный ветер, наблюдающийся на станции во все сезоны. При этом протяженность пролива от траверса южной оконечности о. Октябрьской Революции до траверса НИС составляет около 90 км, что с учетом его ширины (20—40 км) обеспечивает разгон ветрового потока, который сказывается на увеличении скорости ветра, регистрируемого на НИС. Как следует из наблюдений, вероятность скорости ветра выше 5 м/с, при которой возникает метелевый перенос снега, превышает 50 %. При этом период 2016—2017 гг. характеризовался максимальным числом случаев с большой скоростью ветра и минимальной зарегистрированной суммой осадков[5].

1.4 Геологическое строение и гидрогеологические условия

Остров Большевик и восточная часть о. Октябрьской Революции сложены сильно метаморфизованными и дислоцированными породами верхнего протерозоя PR_3 v/g (гнейсы, гранитогнейсы, кристаллические сланцы, филлиты, метаалевролиты, метапесчаники), складчатыми терригеннокарбонатными толщами кембрия и гранитоидами различного возраста. Западная часть о. Октябрьской Революции, о. Комсомолец и о. Пионер образованы слабодислоцированными терригеннокарбонатными, а также эвапоритовыми отложениями кембрия, ордовика, силура и девона (песчаники, мергели, известняки, гипсы, доломиты). На о. Комсомолец на палеозое залегают песчаники олигоцена $KZ P_3$. На о. Большевик — россыпные месторождения золота (реки Студёная, Лагерная и др.). Типичны ландшафты арктических мохово-лишайниковых пустынь с пятнистым характером почвенно-растительного покрова[1].

Для территории Арктики характерно сочетание различных по происхождению и истории развития геологических структур Восточно-Европейской, Сибирской и Северо-Американской платформ и разделяющих их складчатых областей. Они слагаются терригенными, карбонатными, хемогенными и вулканогенными осадочными толщами от архейского до четвертичного возраста. Наиболее древние образования претерпели различный метаморфизм, вплоть до гранитизации. Широко развиты интрузии кислого и основного состава.

В Арктике широко представлены отложения палеозойской группы, участвующие в геологическом строении как материковых площадей, так и большинства островов арктического шельфа. По наличию характерных комплексов органических остатков, позволяющих обосновывать стратиграфические границы не только систем, но и их отделов и ярусов, выделяются кембрийские, ордовикские, силурийские, девонские,

каменноугольные и пермские отложения. Для первых трех систем характерны карбонатные и терригенные породы. В девонских отложениях часто присутствуют хемогенные и вулканогенные образования. Каменноугольные и пермские отложения являются преимущественно терригенными, нередко угленосными. На Сибирской платформе большую территорию занимает пермско-триасовая трапповая формация[4].

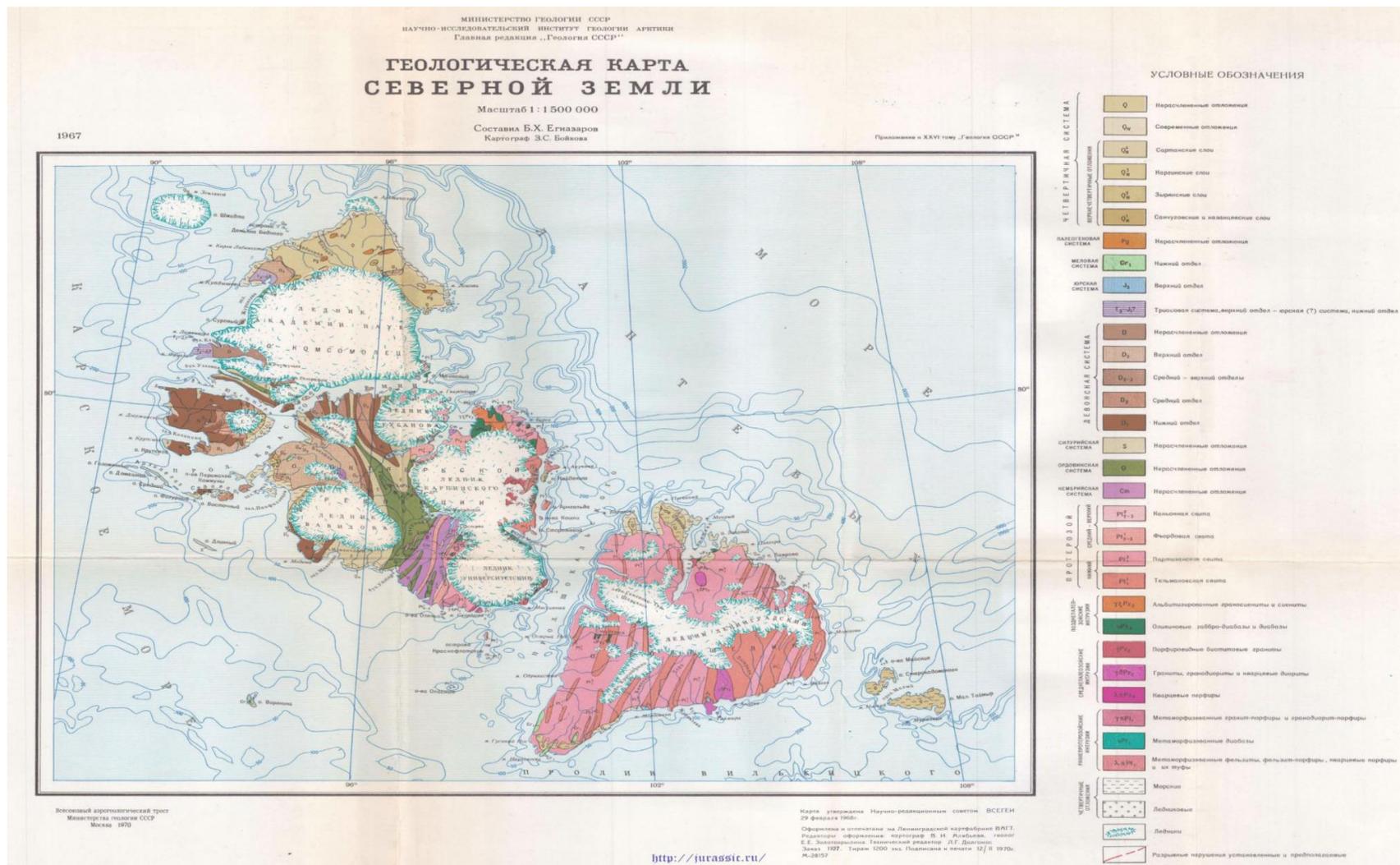


Рисунок 1.2 — Геологическая карта Северной Земли.

Территория Северной Земли, а конкретно о. Большевик относится к североземельской системе бассейнов трещинных вод вместе с островами архипелага Нордекшельда, Известий ЦИК и Сергея Кирова. Также является северным продолжением Таймырской системы бассейнов трещинных вод. Часть системы находится на субаэральном этапе развития в восточной части Северной Земли. Западная часть архипелага входит в Баренцеву группу артезианских бассейнов[4]. Талые ледниковые воды питают множество небольших рек (Ушакова, Озёрная и др.). Б. ч. крупных озёр (Географов, Фиордовое и др.) существует благодаря подпруживающему влиянию выводных ледников, перекрывающих устья фьордов[1].

Формирование и распространение многолетнемерзлых горных пород и сопутствующих им криогенных и посткриогенных образований Евразии зависят от широтного и высотного положения той или иной территории и океанического влияния на характер теплообмена горных пород с внешней средой.

Подземные льды по условиям залегания, форме и размерам включений подразделяются на текстуруобразующие (сегрегационные в рыхлых грунтах и жильные в скальных породах) и залежеобразующие (сегрегационные, инъекционные, повторножильные и погребённые первичноповерхностные).

На участках побережий северных морей, где развиты пестрофациальные морские и ледниково-морские отложения, промерзавшие эпигенетически, часто встречаются пластовые залежи льда сегрегационного и инъекционного генезиса. В некоторых районах их запасы сравнимы с запасами повторножильного льда. Реже встречаются

залежи погребенных льдов. Наиболее крупные скопления образуют погребенные концы ледников в районах современного оледенения[2].

Можно предполагать, что мощность многолетнемерзлых пород по побережью Северной Земли не превышает 100 м. В Восточно-Североземельской системе бассейнов трещенных вод, воды в пределах зоны выветривания полностью заморожены.

2. Разработка математической модели оттаивания мерзлых грунтов

2.1 Построение конечно-разностных схем

Разностные (сеточные) методы чаще всего применяют на практике, в частности даже для задач, которые редко удается решить классическими методами, например линейные уравнения с коэффициентами достаточно общего вида или линейные уравнения в областях сложной формы. Эти методы обладают универсальностью и поддержаны хорошо разработанной теорией.

Основа метода конечных разностей – дискретизация, т. е. замена непрерывной области совокупностью изолированных точек (сеткой), причем решение ищется только в узлах сетки. Производные аппроксимируются конечными разностями, и решение уравнения в частных производных сводится к решению системы алгебраических уравнений, которую называют разностной схемой.

Основные особенности получающейся разностной схемы определяются типом исходного уравнения в частных производных. Стационарные задачи обычно сводятся к системам алгебраических уравнений, которые приходится решать одновременно во всей расчетной области, учитывая заданные граничные условия; после сравнения решений на текущей и предыдущей итерациях вычисления повторяют до момента достижения заданной точности. Нестационарные (маршевые, или эволюционные) задачи сводятся к системе алгебраических уравнений,

которую решают на каждом временном слое, учитывая граничные условия. Весь процесс решения ДУЧП методом конечных разностей состоит из следующих этапов:

- 1) дискретизация расчетной области;
- 2) замена ДУЧП надежным конечно-разностным аналогом;
- 3) аппроксимация граничных и начальных условий;
- 4) проверка согласованности, устойчивости, сходимости выбранной схемы, оценка ее точности;
- 5) выбор метода решения полученной системы алгебраических уравнений;
- 6) построение и отладка программы, реализующей алгоритм решения полученной системы уравнений; оптимизация программы;
- 7) анализ полученного решения, сравнение с известными точными решениями, проверка интегрального баланса массы, теплоты, количества вещества и т. д.;
- 8) вывод результатов в виде таблиц и графиков.

Первый шаг метода конечных разностей – замена непрерывной области конечно-разностной сеткой, т. е. дискретизация (рис. 2.1). Необходимо построить конечно-разностный аналог уравнения на данной сетке, используя определенный шаблон (см., например, шаблоны на рисунке 2.2, б, в).

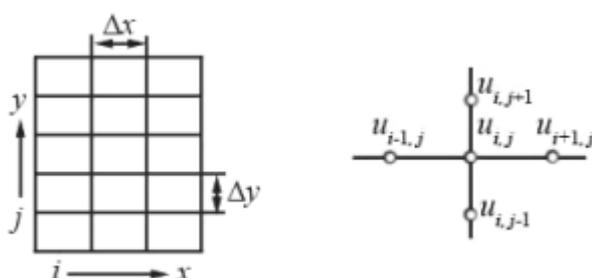


Рисунок 2.1—Пример конечно–разностной сетки для прямоугольной области.

Принятые обозначения ясны из рисунка 1:

$$u_{i,j} = u(x_0, y_0); u_{i+1,j} = u(x_0 + \Delta x, y_0); u_{i-1,j} = u(x_0 - \Delta x, y_0); u_{i,j+1} = u(x_0, y_0 + \Delta y); u_{i,j-1} = u(x_0, y_0 - \Delta y) \quad (1)$$

При решении нестационарных задач номер слоя принято обозначать верхним индексом (например u_j^{n+1}). Рассмотрим основные понятия разностных методов. Под разностной схемой понимают совокупность разностных уравнений, аппроксимирующих основное дифференциальное уравнение и дополнительные условия исходной дифференциальной задачи в области изменения переменных $G(x, y, z, t)$.

Сеткой на отрезке $[a, b]$ называется любое конечное множество точек этого отрезка. Равномерной сеткой на $[a, b]$ называется множество точек

$$\omega_h = \{x_i = a + ih, i = 0, 1, \dots, N\}, \quad (2)$$

где $h = (b-a)/N$ – шаг сетки.

Понятие сетки обобщается и на большее число измерений. Например, равномерная прямоугольная сетка в прямоугольной области изменения переменных $G(x, t)$ может быть образована пересечением линий, параллельных сторонам области и отстоящих друг от друга с равным шагом (см. рисунок. 2.2, а). а) б) в)

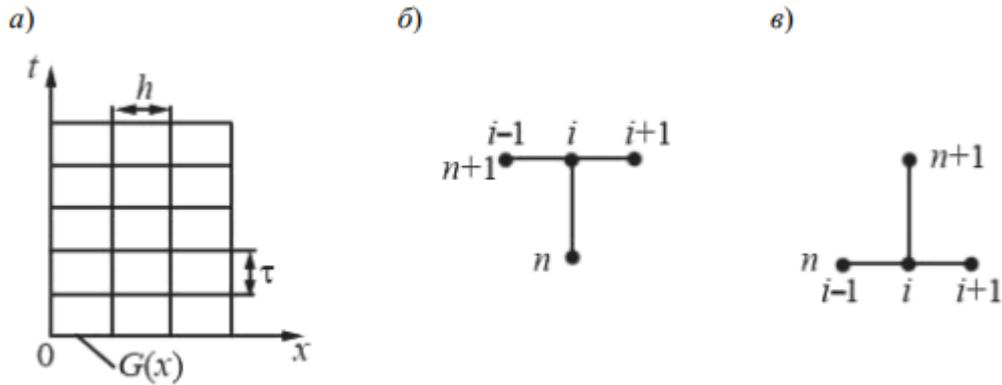


Рисунок 2.2—Геометрические элементы разностных методов: а – конечно–разностная сетка для прямоугольной области; б – шаблон неявной схемы; в – шаблон явной схемы.

Рассмотрим задачу о приближенном вычислении производных функции $u(x)$, определенной, непрерывной и гладкой на отрезке $[a, b]$. Введем сетку ωh и обозначим $u_i = u(x_i)$. Тогда разностные соотношения могут иметь следующий вид:

$$u_{x^-,t} = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{h}, \quad (3)$$

$$u_{x^+,t} = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_i = \frac{u_{i+1} - u_i}{h}, \quad (4)$$

$$u_{x^0,t} = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2h}, \quad (5)$$

Методы решения дифференциальных уравнений в частных производных и называются соответственно левой, правой и центральной разностными производными функции $u(x)$ в точке $x = x_i$ [6].

2.2 Исходные данные

Таблица 2.1 — Температуры почвы и оттаивание грунта в мерзлотомерах за теплый период 2017 года.

Дата	t воздуха	t почвы	к	ф	М1	М2	М3	М4	М5
1 июня	-3,5	-2	0,1	0					
2 июня	-3,2	-2	0,1	0					
3 июня	-5,6	-1	0,1	0					
4 июня	-4,7	0	0,1	0					
5 июня	-2,8	-1	0,1	0					
6 июня	-2,7	-1	0,1	0					
7 июня	-5,5	-2	0,1	0					
8 июня	-4,8	-2	0,1	0					
9 июня	-4,5	-2	0,1	0					
10 июня	-4,7	-2	0,1	0					
11 июня	-3,4	-2	0,1	0					
12 июня	-0,9	0	0,1	0					
13 июня	-0,7	0	0,1	0					
14 июня	-1,2	1	0,1	0					
15 июня	-1,5	1	0,1	0					
16 июня	-0,2	3	0,1	0					
17 июня	-0,6	2	0,1	0					
18 июня	-0,2	0	0,1	0					
19 июня	-0,5	1	0,1	0					
20 июня	-0,4	1	0,1	0					
21 июня	-0,9	3	0,1	0					
22 июня	-1,1	2	0,1	0					
23 июня	-1,4	2	0,1	0					

24 июня	-0,8	4	0,1	0					
25 июня	-1,9	1	0,1	0					
26 июня	-1,5	2	-0,5	0					
27 июня	-1,1	3	-1	0					
28 июня	1	5	-8	0					
29 июня	-0,4	3	-12	0					
30 июня	-0,8	1	-12	0					
1 июля	-1,3	2	-13	0,1					
2 июля	-0,4	3	-15	-17					
3 июля	-1,1	4	-17	-21					
4 июля	-0,3	5	-23	-21					
5 июля	-1	4	-26	-24					
6 июля	-1,1	3	-28	-31					
7 июля	1,5	5	-30	-33	-26	-26	-30	-27	-19
8 июля	1,7	7	-37	-35					
9 июля	4,7	9	-40	-39	-31	-33	-36	-33	-27
10 июля	3	5							
11 июля	0,8	6	-48	-43					
12 июля	1,6	7			-39	-39	-42	-37	-36
13 июля	0,8	5							
14 июля	1,2	4							
15 июля	4	5							
16 июля	1,5	4							
17 июля	1,7	5							
18 июля	1,8	5	-57	-52					
19 июля	2,5	7			-45	-46	-53	-40	-51
20 июля	2,5	5							
21 июля	2	3							
22 июля	2,2	4							

23 июля	1,1	4							
24 июля	0,7	3							
25 июля	0,4	2	-61	-58	-51	-55	-65	-45	-65
26 июля	0	2							
27 июля	0,6	2							
28 июля	1,2	4							
29 июля	0,2	4							
30 июля	-0,1	4	-67	-58	-51	-56	-67	-45	-68
31 июля	1	2							
1 августа	0,7	1							
2 августа	-0,6	0			-50	-56	-67	-45	-70
3 августа	-0,9	1							
4 августа	0,6	3							
5 августа	1	4							
6 августа	-0,1	1	-67	-61					
7 августа	0,7	5							
8 августа	1,8	5							
9 августа	1,3	4							
10 августа	-0,2	2							
11 августа	0,3	3	-64	-59	-50	-57	-69	-47	-71
12 августа	-1,3	0							
13 августа	0,1	2	-63	-58					
14 августа	0,3	2							
15 августа	-0,1	2							
16 августа	1,6	2	-62	-57					
17 августа	1,8	3							
18 августа	1,2	2	-62	-53					
19 августа	1,6	1							
20 августа	-0,2	1			-49	-57	-73	-46	-71

21 августа	-0,1	1							
22 августа	0,4	0							
23 августа	0,1	1							
24 августа	-0,4	0							
25 августа	-1,4	0							
26 августа	-2,9	-2							
27 августа	-2,1	-2	-59	-53					
28 августа	0,3	-1	-57	-53	-43			-43	-67
29 августа	-1,6	-2							
30 августа	-1,5	-2							
31 августа	0,5	0	-57	-47					
1 сентября	0,3	0	-57	-50					
2 сентября	-0,2	0	-57	-47					
3 сентября	-1	0	-56	-47					
4 сентября	-2,4	-1							
5 сентября	-2,1	-1	-56	-46	-38			-39	-59
6 сентября	-1,1	0	-55	-43					
7 сентября	-1,7	-1							
8 сентября	-1,7	-1	-49	-35					
9 сентября	-1,9	-3							
10 сентября	-2	-2							
11 сентября	-1,8	-2	0	0,1	0			0	-51
12 сентября	-3,5	-2	0	0					
13 сентября	-4,4	-2	0	0					
14 сентября	-4	-2	0	0					
15 сентября	-5,3	-3	0	0					
16 сентября	-6,7	-6	0	0					
17 сентября	-1,7	-2	0	0					
18 сентября	-1,1	-2	0	0					

19 сентября	-1,2	-2	0	0					
20 сентября	-2,4	-3	0	0					
21 сентября	-4,2	-5	0	0					
22 сентября	-4,1	-4	0	0					
23 сентября	-2,6	-3	0	0					
24 сентября	-2,9	-3	0	0					
25 сентября	-5,1	-4	0	0					
26 сентября	-4,4	-5	0	0					
27 сентября	-5,1	-5	0	0					
28 сентября	-10,3	-8	0	0					
29 сентября	-7	-8	0	0					
30 сентября	-1,9	-3	0	0					

к, ф — краткое обозначение мерлотомеров “ корейский павильон” и “финский домик” у НИС “Мыс Баранова.
М1, М2, М3, М4, М5 — мерлотомеры непосредственно в морфостворе р. Мушкетова.

Таблица 2.2— Температуры почвы и оттаивание грунта в мерзлотомерах за теплый период 2018 года

Дата	t воздуха	t почвы	ф	к	М1	М2	М3	М4	М5
1 июня	-4,0	-1,0							
2 июня	-4,3	-2,0							
3 июня	-4,7	-2,0							
4 июня	-4,6	-1,0							
5 июня	-0,2	0,0							
6 июня	-0,3	0,0							
7 июня	2,8	0,0							
8 июня	1,7	0,0							

9 июня	2,0	3,0							
10 июня	2,1	9,0							
11 июня	2,3	5,0							
12 июня	0,3	2,0							
13 июня	0,6	3,0							
14 июня	0,6	3,0							
15 июня	0,5	4,0							
16 июня	3,1	7,0							
17 июня	1,6	5,0	-33	0					
18 июня	-0,7	7,0							
19 июня	1,5	6,0			-35	-40	-36	-30	-37
20 июня	1,8	5,0							
21 июня	1,8	7,0							
22 июня	3,7	11,0	-55	-50					
23 июня	2,7	11,0							
24 июня	-0,4	6,0							
25 июня	2,1	10,0							
26 июня	4,4	9,0							
27 июня	4,5	6,0							
28 июня	1,7	3,0							
29 июня	4,6	6,0							
30 июня	3,9	5,0							
1 июля	1,0	3,0							
2 июля	1,1	5,0	-60	-55	-50	-56	-52	-45	-72
3 июля	0,6	3,0							
4 июля	0,2	2,0							
5 июля	0,7	3,0							
6 июля	0,3	2,0							
7 июля	1,1	6,0	-60	-56					
8 июля	2,6	10,0							
9 июля	2,1	7,0							
10 июля	0,7	3,0							

11 июля	0,7	3,0	-63	-57	-57	-59	-80	-49	-80
12 июля	0,5	3,0							
13 июля	1,7	4,0							
14 июля	0,2	2,0							
15 июля	0,4	2,0							
16 июля	-0,3	2,0							
17 июля	-0,4	3,0	-63	-57					
18 июля	1,7	3,0							
19 июля	0,1	1,0			-53	-59	-96	-47	-78
20 июля	-0,3	2,0							
21 июля	0,9	2,0							
22 июля	0,0	1,0							
23 июля	0,9	6,0	-61	-62					
24 июля	1,8	4,0							
25 июля	6,9	8,0							
26 июля	3,6	4,0							
27 июля	0,8	2,0							
28 июля	1,5	3,0							
29 июля	0,5	2,0			-52	-61	-110	-48	-80
30 июля	0,5	3,0	-63	-62					
31 июля	0,7	2,0							
1 августа	0,6	3,0							
2 августа	0,0	1,0							
3 августа	0,5	1,0							
4 августа	2,0	4,0							
5 августа	1,9	3,0							
6 августа	4,6	5,0							
7 августа	5,3	6,0	-74	-61					
8 августа	1,1	5,0							
9 августа	5,3	8,0							
10 августа	3,7	7,0							
11 августа	0,9	3,0							

12 августа	1,2	3,0							
13 августа	2,8	4,0							
14 августа	5,0	5,0	-71	-63	-55	-66	-133	-52	-90
15 августа	1,9	2,0							
16 августа	0,6	2,0							
17 августа	0,0	1,0	-74	-64	-55	-66	-140	-54	-85
18 августа	0,7	2,0							
19 августа	1,5	3,0	-72	-63					
20 августа	1,4	2,0							
21 августа	5,8	5,0							
22 августа	3,7	4,0							
23 августа	4,4	5,0							
24 августа	2,1	3,0							
25 августа	5,2	6,0							
26 августа	3,9	4,0			-59	-69	-132	-62	-88
27 августа	3,4	4,0							
28 августа	1,9	3,0	-74	-66					
29 августа	0,0	0,0							
30 августа	-0,6	0,0							
31 августа	1,0	1,0			-58	-68	-145	-63	-89
1 сентября	2,6	3,0							
2 сентября	0,2	0,0							
3 сентября	-0,6	0,0	-73	-63	-58	-67	-145	-61	-89
4 сентября	0,3	0,0							
5 сентября	-0,6	0							
6 сентября	-1,0	-1							
7 сентября	-0,4	-1	-70	-63	-54	-60	-145	-59	-87
8 сентября	-0,7	0							
9 сентября	-1,3	-1							
10 сентября	-1,7	-1							
11 сентября	-1,6	-1			-50	-57	-145	-54	-83
12 сентября	-3,6	-2							

13 сентября	-1,7	-1							
14 сентября	0,2	-1							
15 сентября	-1,4	-1							
16 сентября	-1,7	-1							
17 сентября	-1,0	-1							
18 сентября	-0,2	-1							
19 сентября	0,1	-1							
20 сентября	-0,6	-1							
21 сентября	-0,9	-1							
22 сентября	-1,1	-1							
23 сентября	-2,4	-2							
24 сентября	-5,1	-5							
25 сентября	-2,4	-3							
26 сентября	-0,3	-1							
27 сентября	0,9	-1							
28 сентября	0,9	0							
29 сентября	0,5	0							
30 сентября	-1,9	-2							

Желтым выделены ячейки с неточным значением.

Таблица 2.3— Температуры почвы и оттаивание грунта в мерзлотомерах за теплый период 2019 года.

Дата	t возд	t почвы	к	ф	M1	M2	M3	M4	M5
1 июня	-2,2	-2							
2 июня	0,8	0							
3 июня	-0,3	0							
4 июня	-0,7	0							
5 июня	2,9	0							
6 июня	0,4	0							
7 июня	-1,5	0							

8 июня	-1,9	0							
9 июня	-1,1	0							
10 июня	-0,9	0							
11 июня	-0,4	0							
12 июня	-0,1	0							
13 июня	-0,8	0							
14 июня	2,3	0							
15 июня	1,5	0							
16 июня	1,5	2							
17 июня	2,8	4							
18 июня	2,1	3							
19 июня	-0,4	1							
20 июня	1,1	4		-4	-15	-23	-35	-13	-18
21 июня	0,8	2			-17	-24	-36	-14	-19
22 июня	1,5	5	-23	-7					
23 июня	2,7	6	-26	-16	-18	-26	-37	-20	-26
24 июня	0,5	3							
25 июня	1,3	4	-28	-21					
26 июня	0,6	3			-25	-32	-41	-25	-36
27 июня	1,3	4	-34	-25					
28 июня	1,8	6							
29 июня	1,8	6							
30 июня	2,5	6	-40	-34					
1 июля	0,2	3							
2 июля	-0,2	5							
3 июля	1,8	4							
4 июля	0,7	3	-45	-40	-34	-42	-55	-33	-41
5 июля	0,0	2							
6 июля	-0,1	2							
7 июля	0,7	4							
8 июля	0,0	3	-44	-38					
9 июля	-0,3	1							

10 июля	0,2	1							
11 июля	0,1	5							
12 июля	0,5	3							
13 июля	1,2	4							
14 июля	1,4	3	-45	-40	-33	-43	-60	-32	-53
15 июля	2,9	6							
16 июля	2,5	8							
17 июля	0,3	7							
18 июля	1,1	7							
19 июля	3,1	6							
20 июля	1,8	5							
21 июля	1,6	5							
22 июля	2,6	4	-55	-52	-46	-57	-90	-44	-72
23 июля	1,4	2							
24 июля	1,2	2	-56	-52	-47	-58	-99	-46	-78
25 июля	0,1	1							
26 июля	-0,2	1							
27 июля	0,2	1							
28 июля	-0,1	2	-55	-52					
29 июля	0,2	3							
30 июля	1,5	5			-44	-57	-103	-44	-75
31 июля	2,6	8	-54	-53					
1 августа	2,8	8							
2 августа	0,3	5							
3 августа	0,4	2							
4 августа	-0,7	2							
5 августа	0,0	4							
6 августа	2,3	7							
7 августа	-0,8	2							
8 августа	1,4	3							
9 августа	2,8	4			-49	-61	-114	-51	-78
10 августа	6,7	8							

11 августа	6,0	8	-60	-59	-51	-63	-115	-53	-79
12 августа	3,8	6							
13 августа	6,4	7							
14 августа	1,5	4							
15 августа	4,1	7	-62	-62	-54,5	-65	-132	-58	-83
16 августа	5,6	5							
17 августа	2,4	4							
18 августа	4,4	5							
19 августа	0,4	3							
20 августа	1,9	4			-56	-70	-145	-61	-85
21 августа	4,1	5	-64	-63					
22 августа	4,3	5							
23 августа	4,3	5							
24 августа	2,2	3							
25 августа	-0,8	0							
26 августа	0,3	3	-65	-65	-59	-69	-145	-65	-89
27 августа	-1,9	0							
28 августа	-1,6	0							
29 августа	1,0	1	-64	-64	-57	-69	-145	-64	-87
30 августа	2,8	3							
31 августа	1,3	2							
1 сентября	1,3	3							
2 сентября	1,2	1							
3 сентября	-2,8	0							
4 сентября	-0,2	-1							
5 сентября	1,5	0							
6 сентября	0,2	1	-62	-58					
7 сентября	-0,8	0							
8 сентября	-2,5	-2							
9 сентября	-2,2	-2	-60	-55					
10 сентября	-5,9	-8			-43	-34	-26	-37	-63
11 сентября	-6,0	-7	-61	-54					

12 сентября	-2,5	-3	-56	-54					
13 сентября	-1,9	-2							
14 сентября	-2,3	-2							
15 сентября	-3,8	-4							
16 сентября	-4,0	-4			0	0		-5	-48
17 сентября	-2,1	-2	-49	-40					
18 сентября	-0,8	-3	0	0					
19 сентября	-1,2	-3							
20 сентября	-2,4	-4							
21 сентября	-0,6	-2							
22 сентября	-0,9	-1							
23 сентября	-1,0	-1							
24 сентября	-0,5	-1							
25 сентября	-0,1	0							
26 сентября	0,2	0							
27 сентября	-0,4	-1							
28 сентября	-1,0	-2							
29 сентября	-1,3	-2							
30 сентября	-2,6	-3							

Таблица 2.4— Температуры почвы и оттаивание грунта в мерзлотомерах за теплый период 2020 года.

Дата	t воздуха	t почвы	к	ф	M1	M2	M3	M4	M5
1 июня	-2,8	2							
2 июня	-1,4	3							
3 июня	-1,0	2							
4 июня	-0,2	1							
5 июня	0,2	3	-5	0					
6 июня	-0,5	3							

7 июня	-0,3	3	-15	-3	-23	-23	-26	-4	-14
8 июня	-1,0	2							
9 июня	-0,4	1							
10 июня	1,5	4							
11 июня	-1,2	2	-28	-4					
12 июня	0,0	6							
13 июня	-0,3	4	-36	-7					
14 июня	1,1	2							
15 июня	0,0	3	-39	-7					
16 июня	-1,6	2							
17 июня	0,1	3	-41	-7					
18 июня	0,2	3							
19 июня	0,5	5	-43	-9					
20 июня	1,7	5							
21 июня	0,9	6	-47	-14					
22 июня	3,6	6			-44	-41	-52	-31	-48
23 июня	2,8	5							
24 июня	0,8	3	-54	-33					
25 июня	1,0	3							
26 июня	1,1	3	-55	-35					
27 июня	0,8	3							
28 июня	0,7	5	-56	-40					
29 июня	0,8	3							
30 июня	2,4	5							
1 июля	3,6	5			-49	-48	-71	-37	-65
2 июля	4,2	5							
3 июля	1,8	4							
4 июля	4,6	9	-62	-54					
5 июля	5,9	9							
6 июля	5,0	9							
7 июля	1,8	5	-66	-63					
8 июля	2,2	5							

9 июля	2,5	4							
10 июля	1,2	3	-67	-65	-58	-59	-104	-52	-77
11 июля	2,8	4							
12 июля	1,7	3							
13 июля	2,5	3							
14 июля	3,8	6	-69	-65					
15 июля	3,1	4							
16 июля	4,9	5							
17 июля	3,8	6							
18 июля	2,6	4	-71	-69					
19 июля	1,7	3							
20 июля	0,7	2			-60	-61	-114	-59	-90
21 июля	2,4	5							
22 июля	1,2	5							
23 июля	2,8	8	-73	-70					
24 июля	2,2	4							
25 июля	0,1	1							
26 июля	0,6	4	-74	-71					
27 июля	4,0	6							
28 июля	5,5	9			-62	-63	-130	-63	-93
29 июля	2,7	8							
30 июля	2,1	8							
31 июля	5,5	10	-78	-74					
1 августа	7,6	12							
2 августа	5,4	9							
3 августа	3,8	9	-82	-81					
4 августа	9,3	13			-66	-69	-130	-71	-99
5 августа	7,1	8							
6 августа	5,1	6							
7 августа	4,0	5	-86	-82					
8 августа	1,7	3							
9 августа	0,7	3							

10 августа	0,3	0							
11 августа	0,0	1	-85	-81					
12 августа	-0,3	1							
13 августа	0,8	3							
14 августа	5,0	8	-84	-78					
15 августа	7,6	11							
16 августа	5,9	6	-87	-81					
17 августа	1,8	5							
18 августа	2,0	4			-69	-70	-130	-80	-104
19 августа	2,5	6							
20 августа	2,0	5							
21 августа	0,7	4	-87	-82					
22 августа	1,5	3							
23 августа	3,0	6							
24 августа	4,2	6							
25 августа	5,5	7							
26 августа	6,6	7	-89	-82	-70	-76	-130	-83	-107
27 августа	5,6	6							
28 августа	5,6	6							
29 августа	4,7	6							
30 августа	2,5	5							
31 августа	1,7	4	-88	-85	-72	-77	-130	-86	-109
1 сентября	2,2	3							
2 сентября	3,6	5							
3 сентября	2,7	3							
4 сентября	1,6	3							
5 сентября	3,2	3							
6 сентября	4,1	4							
7 сентября	4,2	4	-92	-91					
8 сентября	4,7	5							
9 сентября	5,0	5							
10 сентября	3,9	5							

11 сентября	3,2	3			-74	-78	-130	-88	-111
12 сентября	2,3	2	-93	-91					
13 сентября	4,8	4							
14 сентября	4,7	4			-74	-78	-130	-89	-112
15 сентября	4,3	5							
16 сентября	2,5	3							
17 сентября	3,5	3	-94	-86					
18 сентября	0,4	1							
19 сентября	0,8	1							
20 сентября	2,2	2							
21 сентября	2,7	3			-75	-78	-130	-91	-113
22 сентября	4,9	3	-93	-87					
23 сентября	6,0	4							
24 сентября	3,9	3							
25 сентября	2,8	2							
26 сентября	3,0	2							
27 сентября	0,6	0	-93	-89					
28 сентября	0,1	0			-75	-78	-130	-90	-115
29 сентября	-0,7	-1							
30 сентября	-1,6	-2	-91	-87					

Таблица 2.5—Температуры почвы и оттаивание грунта в мерзлотомерах за
теплый период 2021 года.

Дата	t воздуха	t почвы	к	ф	м1	м2	м3	м4	м5
1 июня	0,6	1							
2 июня	-0,4	2	-11	-25					
3 июня	-0,6	2	-11	-35					
4 июня	-1,8	1	-11	-34					
5 июня	-1,2	1	-11	-34					

6 июня	-1,0	3	-11	-34					
7 июня	-2,0	0	-11	-34					
8 июня	-1,9	0	-11	-34					
9 июня	-1,5	1	-11	-34					
10 июня	-0,2	2	-11	-34					
11 июня	-0,4	2							
12 июня	-0,9	1							
13 июня	-0,3	2							
14 июня	-1,4	2							
15 июня	-0,6	2	-18	-35			-27	-60	-66
16 июня	1,2	3							
17 июня	0,2	2							
18 июня	1,8	3							
19 июня	-0,2	2							
20 июня	-0,5	3	-28	-34			-40	-60	-68
21 июня	-0,9	4							
22 июня	-0,9	3							
23 июня	-1,2	4							
24 июня	0,2	4							
25 июня	0,3	3	-45	-44	-47	-47	-48	-60	-65
26 июня	-0,1	3							
27 июня	-0,4	5							
28 июня	-0,1	4							
29 июня	-0,9	6							
30 июня	-0,4	5	-57	-45					
1 июля	2,3	7							
2 июля	5,5	8			-50	-56	-68	-60	-65
3 июля	3,5	5							
4 июля	0,4	1							
5 июля	-0,1	0	-72	-60					
6 июля	0,5	1							
7 июля	0,1	1							

8 июля	0,4	1							
9 июля	-0,3	1	-69	-60					
10 июля	-0,6	1							
11 июля	-0,9	0							
12 июля	0,1	2			-49	-56	-90	-60	-80
13 июля	2,7	5							
14 июля	1,0	2							
15 июля	-0,2	0	-72	-60					
16 июля	0,0	1							
17 июля	0,9	3							
18 июля	2,1	4			-51	-60	-82	-60	-83
19 июля	5,2	7							
20 июля	2,9	4	-76	-61					
21 июля	2,9	5							
22 июля	5,1	6							
23 июля	2,4	4							
24 июля	3,5	4							
25 июля	1,5	2	-85	-65					
26 июля	2,1	3							
27 июля	4,1	5							
28 июля	3,5	6							
29 июля	4,3	6			-60	-81	-105	-71	-91
30 июля	1,8	4	-87	-67					
31 июля	5,7	6							
1 августа	4,4	5							
2 августа	4,3	5	-90	-70					
3 августа	2,6	4							
4 августа	4,7	7							
5 августа	9,6	9							
6 августа	7,3	8			-70	-82	-140	-84	-100
7 августа	8,3	9							
8 августа	5,0	6							

9 августа	3,5	4	-91	-75					
10 августа	2,1	3							
11 августа	0,6	1							
12 августа	-0,3	0							
13 августа	-0,4	1			-73	-81	-140	-87	-105
14 августа	0,8	1							
15 августа	1,7	2							
16 августа	4,1	4	-95	-74					
17 августа	0,6	1							
18 августа	-0,1	1							
19 августа	-0,5	0							
20 августа	-0,9	0			-71	-92	-140	-88	-105
21 августа	0,7	1							
22 августа	2,6	3	-95	-72					
23 августа	2,4	3							
24 августа	-0,3	1							
25 августа	-1,0	0							
26 августа	-1,5	0							
27 августа	-2,5	-1							
28 августа	0,5	1							
29 августа	0,1	2							
30 августа	0,1	1	-90	-71					
31 августа	-0,7	0			-65	-90	-140	-85	-104
1 сентября	-1,5	0,0							
2 сентября	-1,4	0,0							
3 сентября	-1,3	-1,0							
4 сентября	-1,2	-1,0	-86	-63					
5 сентября	0,5	0,0							
6 сентября	-1,5	-1,0	-83	-65					
7 сентября	-0,7	0,0							
8 сентября	1,9	2,0							
9 сентября	1,2	1,0							

10 сентября	2,4	2,0			-60	-85	-140	-82	-101
11 сентября	-0,1	1,0							
12 сентября	-0,2	0,0	-80	-61					
13 сентября	-0,1	0,0							
14 сентября	0,0	1,0							
15 сентября	-1,3	0,0							
16 сентября	-2,5	-1,0	-78	-56					
17 сентября	-3,5	-2,0							
18 сентября	-1,3	-1,0							
19 сентября	-2,1	-1,0	-74	-55					
20 сентября	-3,9	-5,0							
21 сентября	-2,9	-3,0			-8	-5	-26	-77	-91
22 сентября	-1,8	-2,0							
23 сентября	-2,3	-2,0							
24 сентября	0,0	0,0							
25 сентября	0,1	0,0							
26 сентября	0,8	0,0							
27 сентября	0,0	0,0							
28 сентября	0,2	0,0							
29 сентября	-0,2	0,0							
30 сентября	-1,7	-1,0							

Таблица 2.6 — Отметки и координаты мерзлотомеров на морфостворе р.
Мушкетова.

№ м-ра	Отметка грунта в местной СВ	Отметка в БСВ	Горизонтально е проложение, м	Широта	долгота
1	12,996	13,724		79.13'33.52827"N	101.45'14.91864"E
2	8,714	9,442	76,23	79.13'31.09718"N	101.45'16.84660"E
3	5,858	6,586	62,89	79.13'29.09636"N	101.45'18.60061"E

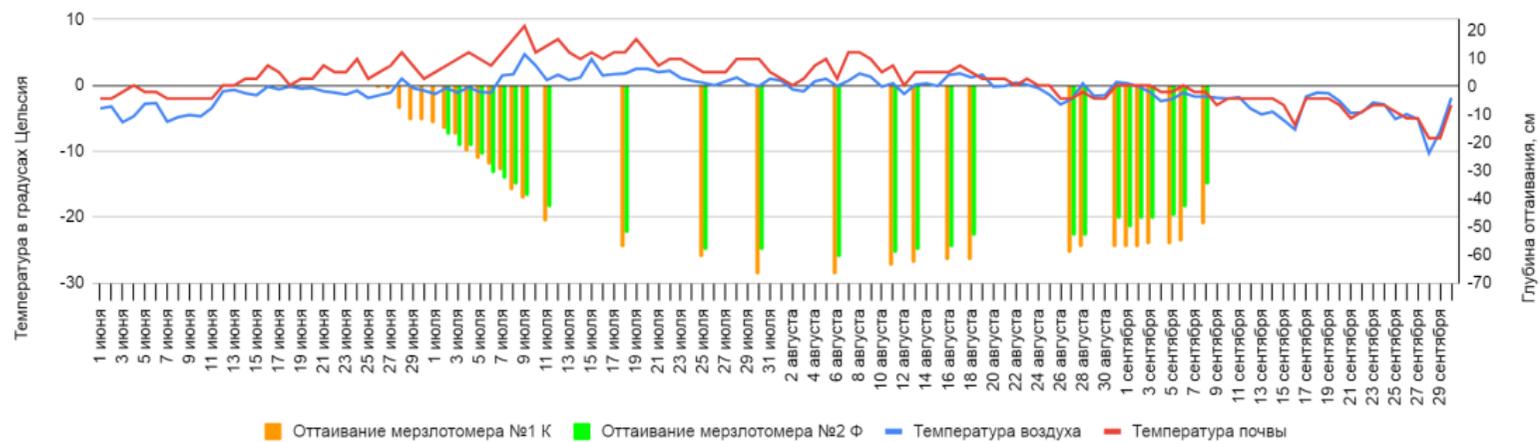
4	6,502	7,23	60,95	79.13'27.36852"N	101.45'23.50780"E
5	11,135	11,863	58,54	79.13'25.84694"N	101.45'29.55088"E

2.3 Построение графиков зависимости

По значениям температуры и оттаивания (таблицы 2.1—2.5) были построены общие графики зависимости оттаивания от температур почвы и воздуха.

Глядя на полученные зависимости можно судить о том, что оттаивание по всем участкам имеет тенденцию к накоплению. Это говорит об инерционности процесса. В период резкого увеличения температуры растёт и глубина оттаивания, но когда температура начинает падать значения глубины не изменяются, а в ряде случаев растут до окончания теплого периода.

Комплексный график зависимости глубины оттаивания по мерзлотомерам вблизи НИС от температуры за 2017 год



Комплексный график зависимости глубины оттаивания по мерзлотомерам вблизи НИС от температуры за 2018 год

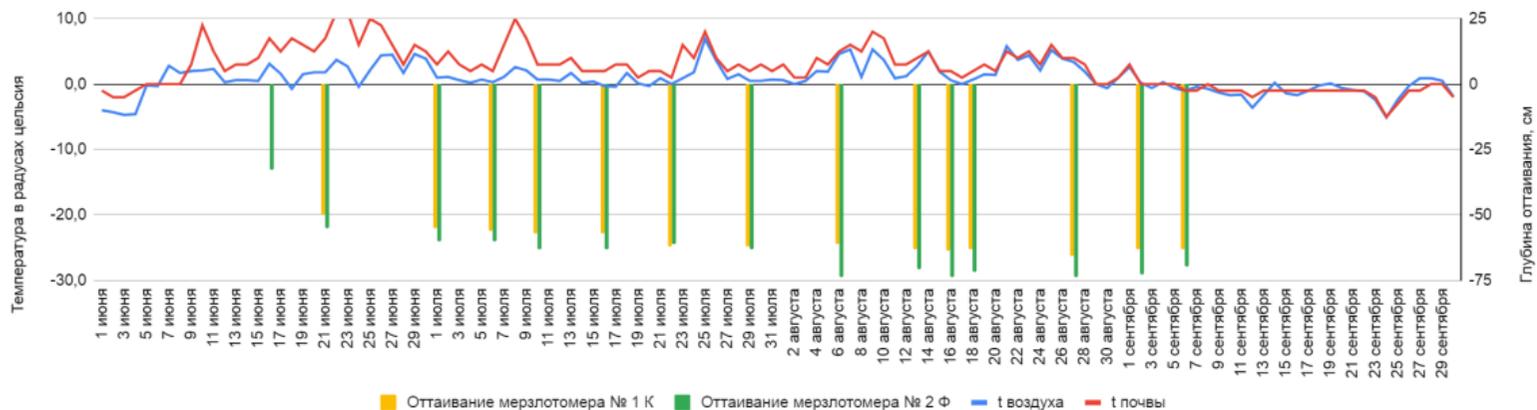
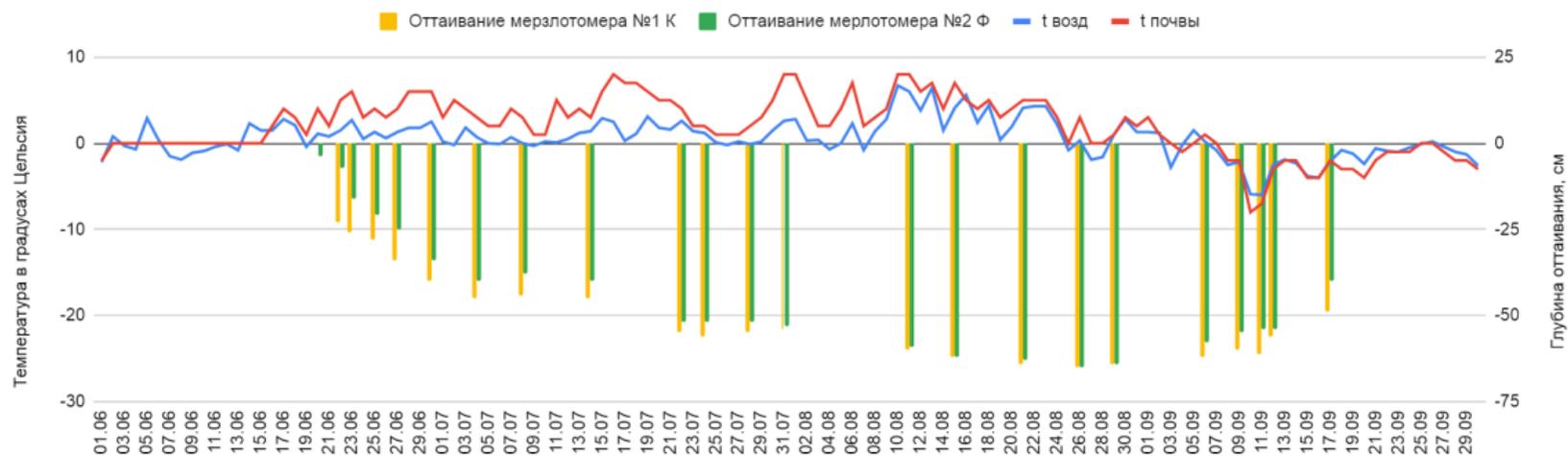


Рисунок 2.3—График зависимости оттаивания от температуры почвы и воздуха в 2018 году за теплый период.

Комплексный график зависимости глубины оттаивания по мерзлотомерам вблизи НИС от температуры за 2019 год



Комплексный график зависимости глубины оттаивания по мерзлотомерам вблизи НИС от температуры за 2020 год

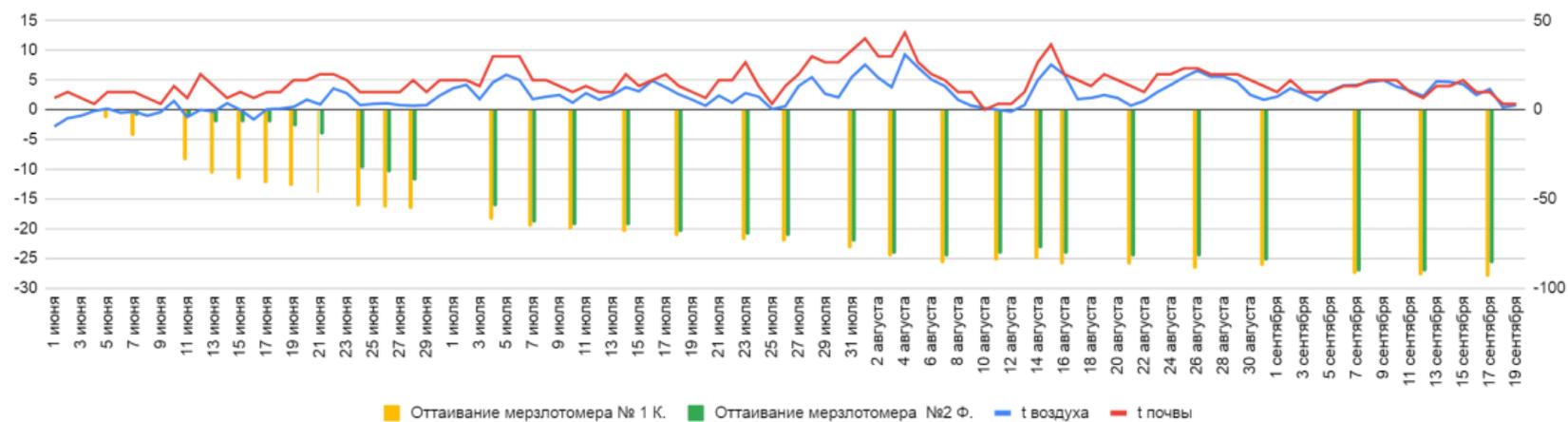


Рисунок 2.4—Графики зависимости оттаивания от температуры почвы и воздуха в 2019 и 2020 годах.

Комплексный график зависимости глубины оттаивания по мерзлотомерам вблизи НИС от температуры за 2021 год

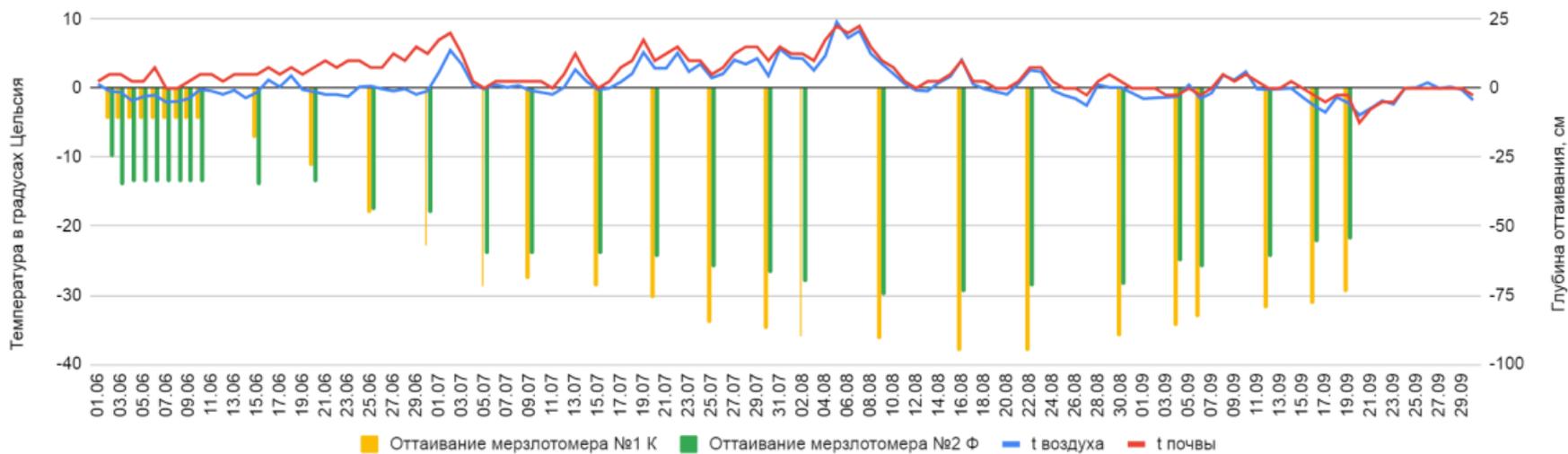


Рисунок 2.5—График зависимости оттаивания от температуры почвы и воздуха в 2021 году за теплый период.

2.4 Получение уравнения и апробация модели

$$d\vec{Y}(\vec{x}, t) = d\vec{\xi}(\vec{x}, t) \quad (6)$$

где

$$d = \frac{\partial}{\partial t} dt + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} d\vec{x} \quad (7)$$

\vec{Y} – вектор состояния системы в нашем случае \vec{H} – оттаивание см.

$\vec{\xi}$ – вектор внешних воздействий в конкретном случае температура $T_{ноч}; T_{боз}$

В частных производных

$$\frac{\partial}{\partial t} dt + \frac{\partial}{\partial \vec{x}} d\vec{x} = d\vec{\xi} | \div dt \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \frac{\partial}{\partial \vec{x}} = \vec{\xi} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\vec{H}, \vec{U})}{\partial \vec{x}} = \vec{U} \frac{\partial \vec{H}}{\partial \vec{x}} + \vec{H} \frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{x}} \quad (10)$$

где $\vec{U} = \frac{\partial \vec{x}}{\partial t}$ – скорость оттаивания; $\vec{\xi} = \frac{d\xi}{dt}$ – скорость изменения температуры.

По закону сохранения:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \text{div}(\vec{H}, \vec{U}) = \vec{\xi} \quad (11)$$

Необходимо найти эмпирическую связь в отношении:

$$(\vec{H}, \vec{U}) = f(\vec{\lambda}, \vec{H}, \vec{x}, t) \quad (12)$$

где

$\vec{\lambda}$ – вектор задаваемых параметров

Исходя из общей методики прогноза:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{H(t) - H(t_0)}{(t - t_0)} \quad (13)$$

получаем:

$$\begin{aligned}
\vec{H}(t) &= H(t_0) - \operatorname{div} \left(f(\vec{\lambda}, \vec{H}, \vec{x}, t) \right) * (t - t_0) + \vec{\xi}(t \\
&\quad - t_0) \quad (14) \frac{H_{t+l,x} - H_{t,x}}{\Delta t} \\
&\quad + K \frac{H_{t,x} - H_{t,x-l}}{\Delta x} \\
&= p \xi_{t,x} \quad (15)
\end{aligned}$$

где p – коэффициент перевода °C в единицы измерения системы.

K – коэффициент скорости изменения процесса см/сут.

Для эксперимента были использованы значения оттаивания в 2019 году так, как они обладали наилучшей дискредитацией.

Также было принято решение провести апробацию данной модели по переменному шагу времени и расстояния.

Таблица 2.7—Интерполяция значений М1–М2.

	1-е сутки	2-е сутки	4-е сутки	7-е сутки	15-е сутки	25-е сутки
М1	15	17	18	25	34	33
H _{t,x}	16,6	18,4	19,6	26,4	35,6	35
H _{t,x+1}	18,2	19,8	21,2	27,8	37,2	37
-	19,8	21,2	22,8	29,2	38,8	39
-	21,4	22,6	24,4	30,6	40,4	41
М2	23	24	26	32	42	43

Таблица 2.8—Интерполяция значений М4–М5.

	1-е сутки	2-е сутки	4-е сутки	7-е сутки	15-е сутки	25-е сутки
М4	13	14	20	25	33	32
H _{t,x}	14	15	21,2	27,2	34,6	36,2
H _{t,x+1}	15	16	22,4	29,4	36,2	40,4
-	16	17	23,6	31,6	37,8	44,6
-	17	18	24,8	33,8	39,4	48,8

M5	18	19	26	36	41	53
----	----	----	----	----	----	----

Таблица 2.9—Прогноз $H_{t+1,x}$ с переменным t для мерлотомеров 1 и 2.

	Δt	Δx	L	M2-M1	ΔH	k	$t^{\circ}\text{C}$	Прогноз $H_{t+1,x}$	Данные $H_{t+1,x}$	S
2-е сутки	1	15,246	76,23	8	1,6	21,0	4	20,5	18,4	11,4
4-е сутки	2			7	1,4	15,2	2	22,2	19,6	13,3
7-е сутки	3			8	1,6	35,6	6	37,3	26,4	41,2
15-е сутки	8			7	1,4	20,1	3	49,7	35,6	39,5
25-е сутки	10			8	1,6	29,2	3	64,6	35,0	84,4

$$S = \frac{H_{\phi} - H_n}{H_{\phi}} * 100\%$$

Значения коэффициента k получены с помощью поиска решения путем минимизации S .

Таблица 2.10—Прогноз $H_{t+1,x}$ с переменным t для мерлотомеров 4 и 5.

	Δt	Δx	L	M2-M1	ΔH	k	$t^{\circ}\text{C}$	Прогноз $H_{t+1,x}$	Данные $H_{t+1,x}$	S
2-е сутки	1	11,708	58,54	5	1	35,1	4	17,9	15,0	19,4
4-е сутки	2			5	1	0,0	2	18,8	21,2	11,2
7-е сутки	3			6	1,2	39,0	6	38,9	27,2	43,0
15-е сутки	8			11	2,2	11,0	3	49,7	34,6	43,6

25-е сутки	10			8	1,6	20,8	3	63,2	36,2	74,7
------------	----	--	--	---	-----	------	---	------	------	------

Таблица 2.13—Прогноз $H_{t+l,x}$ с переменным x для мерлотомеров с 1 по 5.

	Δt	Δx	$t^{\circ}\text{C}$	k	Прогноз $H_{t+l,x}$	Данные $H_{t+l,x}$	S
М1-М2	1	76,23	4	28,6	26,9	25	12,1
М2-М3		62,89		15,7	38,8	36	7,8
М3-М4		60,95		0,0	17,4	14	24,0
М4-М5		58,54		35,1	21,9	19	15,3

2.5 Результаты

В ходе эксперимента был посчитан коэффициент устойчивости прогноза для переменного шага по времени и расстоянию. Результаты представлены в таблицах ниже.

Таблица 2.11—Расчет коэффициента устойчивости для прогноза $H_{t+l,x}$ с переменным t для мерлотомеров 1 и 2.

	$\Delta t/\Delta x$	$K_{уст}$
2-е сутки	0,066	1,375
4-е сутки	0,131	2,000
7-е сутки	0,197	7,000
15-е сутки	0,525	10,571
25-е сутки	0,656	19,125

Таблица 2.12—Расчет коэффициента устойчивости для прогноза $H_{t+l,x}$ с переменным t для мерлотомеров 4 и 5.

	$\Delta t/\Delta x$	$K_{уст}$
2-е сутки	0,085	3,000
4-е сутки	0,171	0,000
7-е сутки	0,256	10,000
15-е сутки	0,683	7,545
25-е сутки	0,854	17,750

Таблица 2.14—Расчет коэффициента устойчивости для прогноза $H_{t+l,x}$ с переменным x .

	$\Delta t/\Delta x$	$K_{уст}$
M2	0,013	0,375
M3	0,016	0,250
M4	0,016	0,000
M5	0,017	0,600

Так как коэффициент устойчивости изменяется в пределах от 0 до 1, то результаты прогноза $H_{t+l,x}$ с переменным t можно считать неудовлетворительными.

Таблица 2.15—Сводная таблица результатов прогноза.

сутки	Прогноз с переменным Δt для профиля M1-M2			Прогноз с переменным Δt M4-M5			Прогноз с переменным Δx M1-M5			
	прогноз	факт	S	прогноз	факт	S		прогноз	факт	S
2	20,5	18,4	11,4	17,9	15,0	19,4	M2	26,9	24,0	12,1
4	22,2	19,6	13,3	18,8	21,2	11,2	M3	38,8	36,0	7,8
7	37,3	26,4	41,2	38,9	27,2	43,0	M4	17,4	14,0	24,0
15	49,7	35,6	39,5	49,7	34,6	43,6	M5	21,9	19,0	15,3
25	64,6	35,0	84,4	63,2	34,6	74,7				

**Таблица 2.16—Сводная таблица результатов
погрешности прогноза и оптимизации коэффициентов
для прогноза $H_{t+l,x}$ с переменным t для мерлотомеров 1 и 2.**

	S	S'	k	k'	p
2-е сутки	$5,44 \cdot 10^{-8}$	$5,44 \cdot 10^{-8}$	20,9632499	20,9632499	1,0000000
4-е сутки	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$6,17 \cdot 10^{-8}$	15,2459998	15,2459995	1,0000000
7-е сутки	$2,15 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-7}$	35,573998	35,573997	0,9999999
15-е сутки	$7,41 \cdot 10^{-6}$	$6,06 \cdot 10^{-8}$	20,14650	20,14649	0,9999998
25-е сутки	$3,18 \cdot 10^{-5}$	$2,81 \cdot 10^{-7}$	29,15796	29,15791	0,9999978

где S —погрешность прогноза при оптимизации только k , S' — погрешность при оптимизации k и p , k' —значение k при оптимизации p .

**Таблица 2.17—Сводная таблица результатов
погрешности прогноза и оптимизации коэффициентов
для прогноза $H_{t+l,x}$ с переменным t для мерлотомеров 4 и 5.**

	S	S'	S''	k	k'	p
2-е сутки	19,4	$5,28 \cdot 10^{-8}$	$1,17 \cdot 10^{-8}$	35,123999	35,123998	0,99999995
4-е сутки	11,2	10,4	$9,85 \cdot 10^{-6}$	0	0	1,55
7-е сутки	43,0	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$5,73 \cdot 10^{-6}$	39,02665	39,02664	0,9999995
15-е сутки	43,6	$1,41 \cdot 10^{-5}$	$8,04 \cdot 10^{-6}$	11,042769	11,042767	0,9999995
25-е сутки	74,7	$2,41 \cdot 10^{-7}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$	20,781700	20,781699	0,99999997

**Таблица 2.18—Сводная таблица результатов
погрешности прогноза и оптимизации коэффициентов
для прогноза $H_{t+l,x}$ с переменным x**

	S	S'	S''	k	k'	p
M1-M2	12,1	$6,4 \cdot 10^{-8}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$	28,5862499	28,5862499	1
M2-M3	7,8	$2,44 \cdot 10^{-9}$	$2,44 \cdot 10^{-9}$	15,7225000	15,7225000	1

M3-M4	24,0	21,43	1,23*10 ⁻⁵	0,00	0,00	0,25
M4-M5	15,3	4,17*10 ⁻⁷	0,27*10 ⁻⁹	35,123999	35,123998	0,99999995

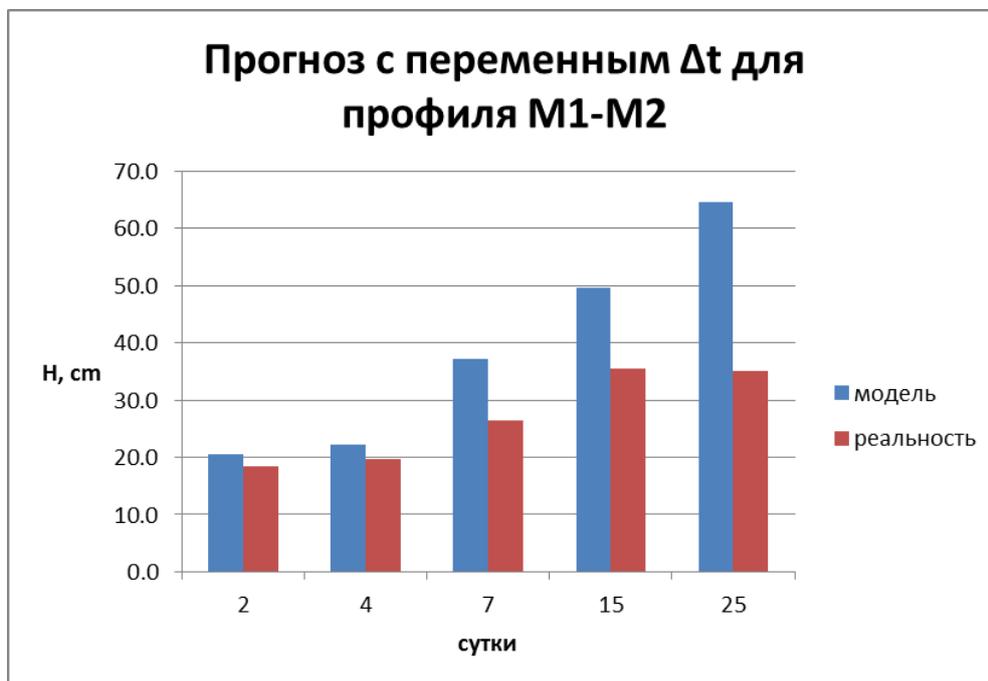


Рисунок 2.6—Гистограмма результатов моделирования с переменным Δt по мерзлотомерам 1 и 2.

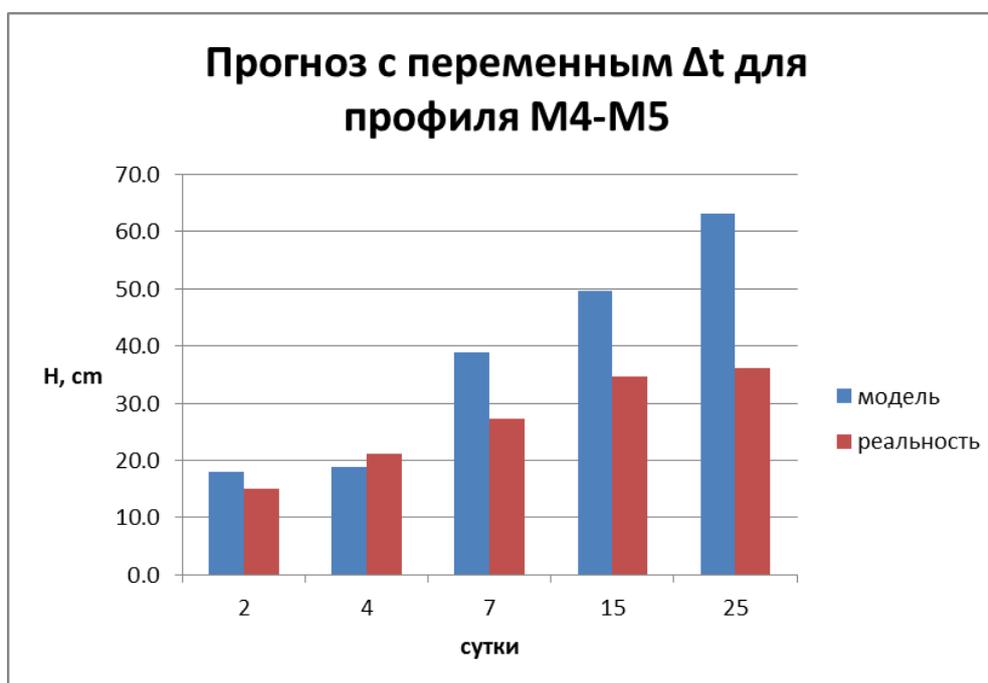


Рисунок 2.7—Гистограмма результатов моделирования с переменным Δt по мерзлотомерам 1 и 2.

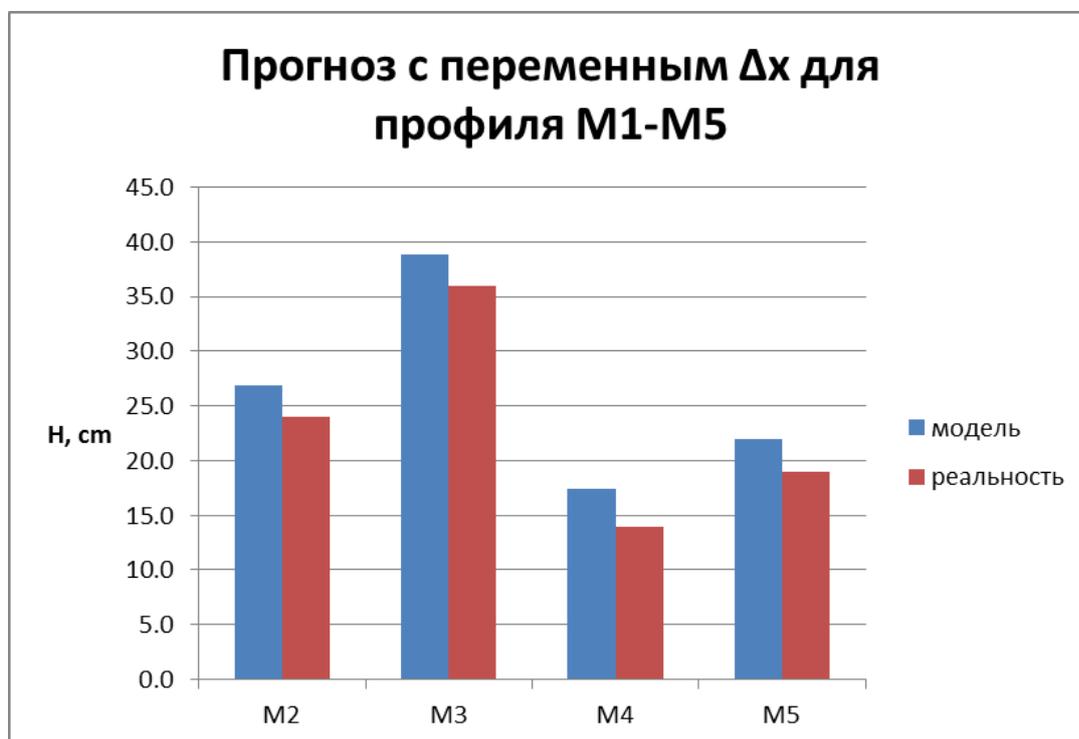


Рисунок 2.8—Гистограмма результатов моделирования с переменным Δx .

Заключение

В ходе работы была разработана модель прогноза оттаивания грунтов в зонах многолетней мерзлоты.

Были найдены и проанализированы зависимости между переменными в массиве входных данных. Выведено уравнение модели и выпущен прогноз.

В среднем для профиля М1–М2 погрешность составляет 38 %, для профиля М4–М5 – 34 %. Следует отметить, что при увеличении шага по времени (заблаговременности) погрешность прогноза увеличивается. Данные результаты получены только при переменном временном шаге и являются неудовлетворительными.

При прогнозе и с переменным временем, и переменным расстоянием погрешность составила 15 % при минимальном значении 7 %, максимальном – 24 %. Максимальные погрешности характерны для мерзлотомера М4. Данные по мерзлотомеру М1 выступали в качестве граничного условия при решении модели конечными разностями.

Список использованных источников

1. Северная Земля [Электронный ресурс]: Большая российская Энциклопедия. — Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/3543518>
2. Атлас Арктики. — М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1985. — 168174 с.
3. Геологическая карта Северной Земли. Масштаб 1:1500000. 1967 г. Составил Б.Х. Егиазаров. Приложение к тому XXVI (26) "Геология СССР" / Министерство геологии СССР. Научно-исследовательский институт геологии Арктики. Главная редакция "Геология СССР"
4. Гидрогеология СССР. Сводный том. Выпуск 1. — М.: Недра, 1976. — 223238 с.
5. Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база Мыс Баранова». Под общей редакцией физ.мат наук А.П. Макштаса и В.Т. Соколова. — СПб.: АНИИ, 2021. — 172–178 с.
6. Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Численные методы в гидрологии. Учебное пособие. — СПб.: РГГМУ, 2019. — 112 с.