



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Исследование вертикальной структуры профиля температуры в
Арктическом регионе»

Исполнитель Яковлев Михаил Андреевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)
Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

« » мая 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Содержание

Введение.....	2
Глава 1. Методы и средства получения вертикальных профилей температуры	4
1.1 Комплексное температурно-ветровое зондирование атмосферы	4
1.2 Информационные ресурсы Интернета.....	9
Глава 2. Формирование архива вертикальных профилей температуры в арктическом регионе.....	14
2.1 Выбор станций аэрологического зондирования атмосферы в в арктическом регионе.....	14
2.2 Формирование таблиц с данными в Excel	18
Глава 3 Анализ вертикальной структуры профиля температуры в арктическом регионе.....	29
3.1 Сезонная изменчивость вертикальной структуры профиля температуры в арктическом регионе.....	29
3.2 Пространственная изменчивость вертикальной структуры профиля температуры в арктическом регионе.....	35
Заключение	42
Список литературы	Error! Bookmark not defined.

Введение

Целью выпускной квалификационной работы является анализ вертикальной структуры профиля температуры в Арктическом регионе на примере четырех станций для зимнего и летнего сезона 2021 года.

Тема работы актуальна, поскольку для решения многих инженерных задач требуются данные о распределении в нижних слоях атмосферы таких метеорологических элементов, как ветер и температура. Они составляют одну группу, в которую входят вопросы, связанные с обеспечением безопасности и оптимальных условий посадки и взлета самолетов и вертолетов.

Для выполнения цели были выполнены следующие задачи:

1. Сформировать архив данных вертикальных профилей температуры для выбранных станций за 2021 год;
2. Выявить закономерность сезонной изменчивости вертикальной структуры профиля температуры для каждой выбранной станции в 2021 году;
3. Оценить пространственную изменчивость вертикальной структуры профиля температуры в арктическом регионе.

Анализ данных для выполнения бакалаврского проекта был выполнен по данным зондирования атмосферы с сайта Университета Вайоминга за январь и июль 2021 года.

Выпускная квалификационная работа состоит из трех глав, 7 таблиц и 24 рисунков.

В первой главе описываются методы и средства получения вертикальных профилей температуры, в том числе рассмотрено комплексное температурно-ветровое зондирование атмосферы и описаны основные информационные ресурсы Интернета для получения данных.

Вторая глава посвящена формированию архива вертикальных профилей температуры в арктическом регионе. Здесь рассказана методология получения данных и их обработка для приведения к удобному для работы формату.

В третьей главе представлены результаты анализа вертикальной структуры профиля температуры. Рассмотрена сезонная и пространственная изменчивость вертикальной структуры профиля температуры в арктическом регионе.

Глава 1. Методы и средства получения вертикальных профилей температуры

1.1 Комплексное температурно-ветровое зондирование атмосферы

Для изучения характеристик свободной атмосферы, в том числе температурного, влажностного и ветрового режимов используются различные виды дистанционного зондирования: акустическое, лазерное, ракетное, самолетное, спутниковое и другие. Несмотря на большое разнообразие средств измерений, пожалуй, самым распространенным и системным видом получения метеорологической информации в верхних слоях атмосферы является метод аэрологического радиозондирования. [1]

Аэрологическое зондирование – определение свойств воздуха и характеристик некоторых атмосферных процессов с помощью поднимаемых в атмосферу приборов или дистанционными методами.

Идеи исследования больших слоев атмосферы были высказаны в первый раз величавым русским научным работником Михаилом Васильевичем Ломоносовым. Самые первые полеты на аэростатах с научной целью в РФ были осуществлены академиком Я. Д. Захаровым (1804 г.), вслед за тем метеоролог (в последствии академиком и директором Главной геофизической обсерватории) М. А. Рыкачевым (1868–1873 гг.) и величавым химиком Д. И. Менделеевым (1887 г.).

Начиная с 90-х годов XIX века для изучения атмосферы, научные работники стали использовать автоматические приборы, которые подымались на огромную высоту с поддержкой змеев и шаров-зондов, к которым привешивался легковесный устройство – метеорограф, регистрирующий главные метеорологические составляющие – температуру, влажность, нажим. Систематические исследования производить было нелегко: в большинстве случаев приборы терялись, совместно с устройствами гибли и зарегистрированные ими данные.

Первый в мире удачный пуск радиозонда был совершен Молчановым Павлом Александровичем 30 января 1930 года с земли Аэрологической обсерватории в Павловске. Радиозонд был прикреплен к связке резиновых шаров, заполненных водородом.

Аэрологическая сеть России является неотъемлемой частью Глобальной мировой сети радиозондирования Всемирной службы погоды (ВСП) и проводит аэрологические наблюдения в соответствии с требованиями, сформулированными в нормативных документах Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [3].

Результатом температурно-ветрового аэрологического зондирования атмосферы являются аэрологические диаграммы, на которых отображено высотное распределение термодинамических параметров атмосферы – температуры, влажности, давления и характеристик ветра. Пример аэрологической диаграммы приведен на рисунке 1:

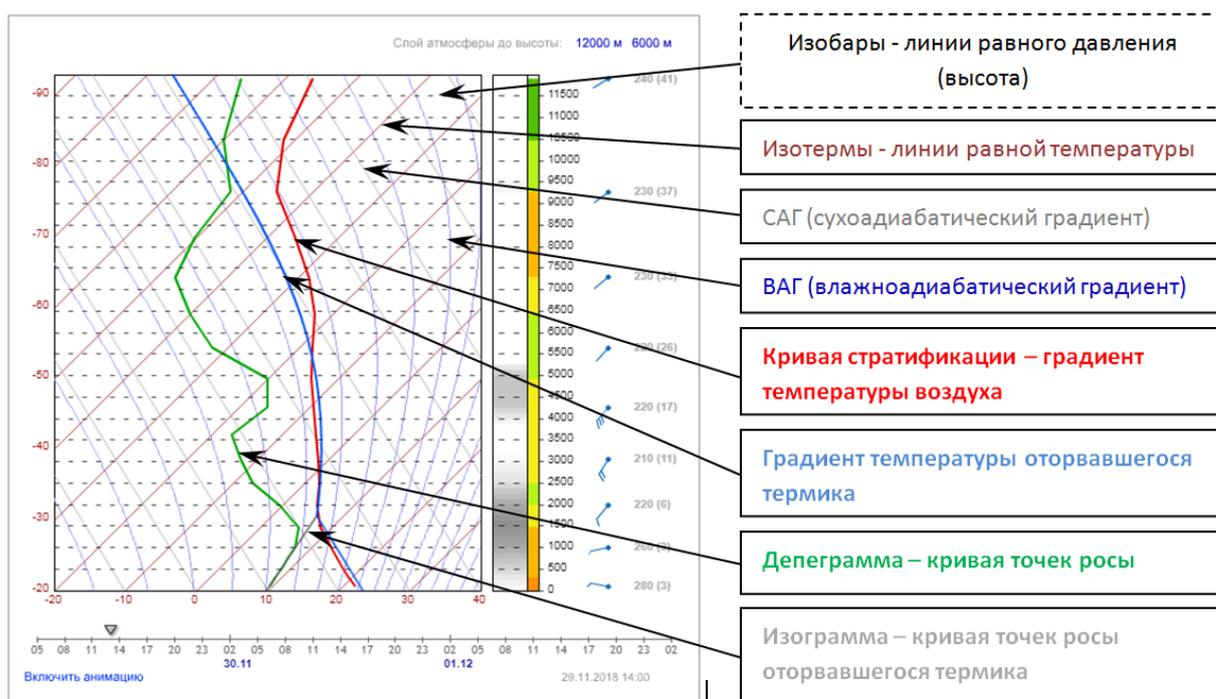


Рисунок 1. Пример бланка аэрологической диаграммы

Данный вид измерений имеет большое распределение параметров с высотой. Так, например, температура воздуха меняется от 90 – 100 °С за время полета радиозонда, что составляет приблизительно 1,5 – 2 часа. Давление же в свободной атмосфере изменяется по вертикали на 1000 гПа и более. Всё это требует малой инерции от аэрологических приборов.

Комплексное температурно-ветровое зондирование атмосферы происходит с помощью радиозонда. Радиозонд – это небольшой измерительный прибор, который прикрепляют к шару, наполненному водородом для измерения параметров атмосферы на различной высоте и дистанционного сбора данных об их распределении.

Радиозонд обязательно включает три основные части:

- 1) первичные преобразователи или чувствительные элементы, которые реагируют на изменения измеряемых величин;
- 2) коммутирующее устройство, т.е. приспособление, предназначенное для последовательного подключения чувствительных элементов к передатчику;
- 3) коротковолновый или ультракоротковолновый радиопередатчик с антенной и источниками питания.

Все радиозонды являются одноразовыми приборами и отправляются в небо один раз. Это приводит к тому, что аэрологические наблюдения являются достаточно дорогостоящими. Поэтому ученые стараются сделать стоимость радиозонда минимальной. Для этого за долгие годы был выработан самый удачный вариант сочетания цены и качества полученных данных.

Существует несколько видов отечественных разработок радиозондов. Все они эксплуатируются или эксплуатировались на аэрологической сети Росгидромета. Помимо отечественных радиозондов используют также радиозонды фирмы Vaisala. Один из таких представлен на рисунке 2:



Рис. 3
MP3-3A



Рис. 4
MP3-3A*



Рис. 5
AK2-01



Рис. 6
AK2-02

Алгоритм запуска радиозонда включает в себя следующие этапы:

1) подготовка радиозонда к выпуску (внешний осмотр радиозонда, сличение номеров чувствительных элементов и радиопередатчика с номерами на градуировочных графиках, проверка радиопередатчика, подготовка комплекта питания, сборка радиозонда);

2) поверка радиозонда перед выпуском, целью которой является проверка сохранности градуировочных данных радиозонда, которая осуществляется путем сопоставления результатов измерений метеопараметров с помощью радиозонда и с помощью контрольных наземных приборов;

- 3) выпуск радиозонда;
- 4) прием и обработка сигналов радиозонда;
- 5) составление таблицы результатов зондирования и передача аэрологической телеграммы.

1.2 Информационные ресурсы Интернета

В информационной среде содержится большое количество баз данных аэрологического зондирования атмосферы.

Например, сайт https://flymeteo.org/sounding/map_region.php?srok=00, на котором представлены данные аэрологического зондирования атмосферы. На нем можно выбрать необходимый район, время зондирования (00 UTC или 12 UTC), а также систему координат (АДП - прямоугольная система координат или АДК - косоугольная система координат). Интерфейс сайта представлен на рисунке 7.

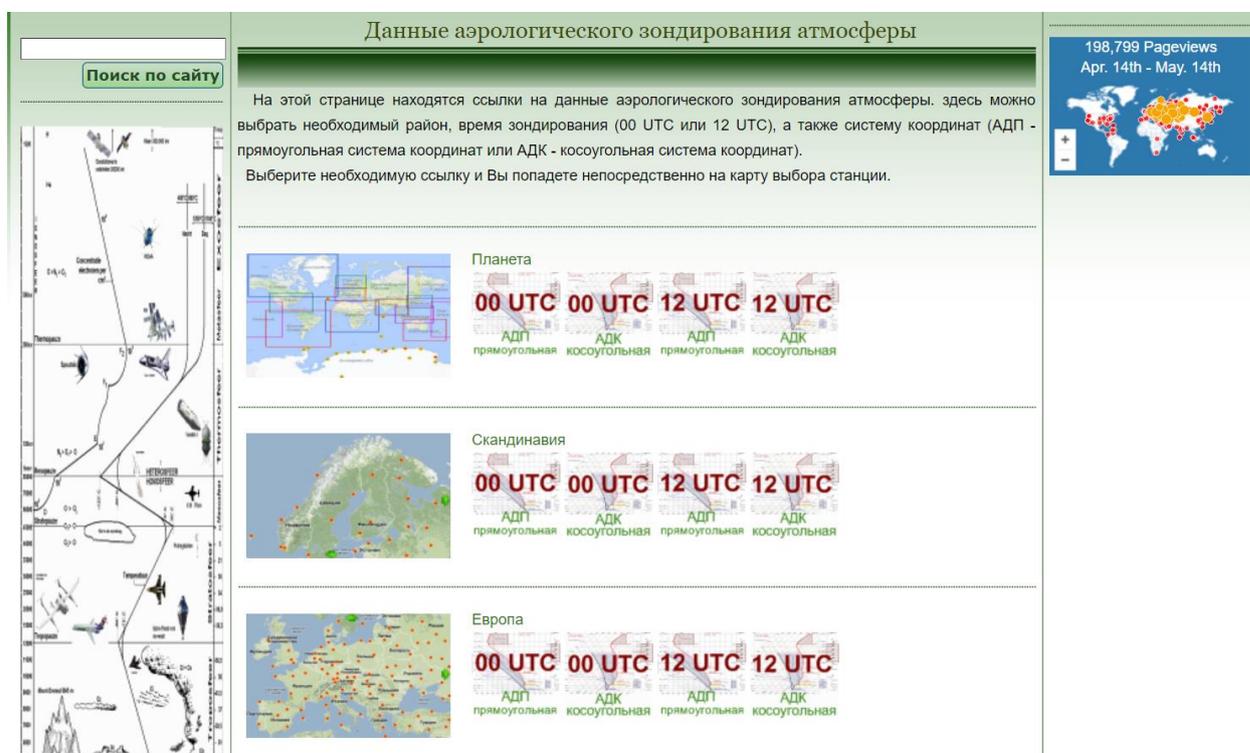


Рисунок 7. Стартовая страница сайта FlyMeteo

Данный сайт удобен в использовании, но содержит недостаточное количество станций в интересующем нас районе. Поэтому для выполнения цели ВКР были использованы данные, взятые с сайта Университета Вайоминга[2].

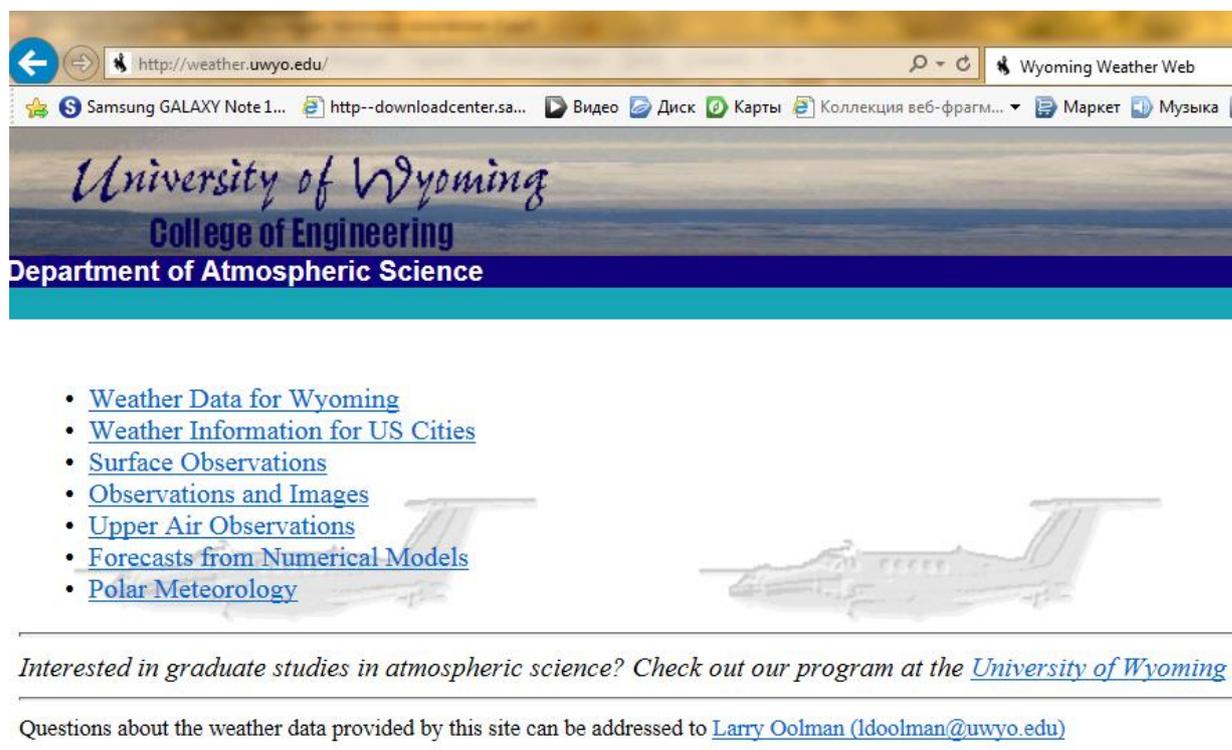


Рисунок 8. Титульная страница сайта: <http://weather.uwyo.edu/>

Затем для получения необходимых данных необходимо выбрать пункт «Upper Air Observations» и «Sounding», чтобы перейти к работе с данные верхнего зондирования атмосферы. После чего сайт отправляет на страницу, где нужно выбрать необходимый регион, формат представления данных, дату и время зондирования, а также станцию. Карта с выбором интересующего нас арктического региона представлена на рисунке 8.

Сайт удобен своей простотой и доступностью в использовании, а также большим архивом данных аэрологического зондирования. Любой пользователь может взять данные для своих целей и сделать это в различных

форматах от текстового варианта до GIF-анимации с различными выходными параметрами.



Region	Type of plot	Year	Month	From	To	Station Number
Arctic	Text: List	2021	Jan	14/12Z	14/12Z	72672

Click on the image to request a sounding at that location or enter the station number above.



Рисунок 9. Страница сайта: <http://weather.uwyo.edu/> после выбора «Arctic»

Помимо общедоступных сайтов, вся информация об аэрологическом зондировании в свободной атмосфере (температурно-ветрового и ветрового зондирования атмосферы) по глобальной сети станций, собираемые во ВНИИГМИ-МЦД (г. Обнинск) в оперативном режиме по каналам связи согласно международным кодовым формам Всемирной метеорологической организации. [4].

Данные хранятся в Госфонде в формате массива текущей аэрологической информации АЭРОСТАВ. Массив АЭРОСТАВ создается в двоичном формате, является базовым, пополняемым, содержит данные за период 1978-2009 гг. по глобальной сети станций (около 900). Формат

массива был разработан в 1982 г. В связи с тем, что в международные аэрологические коды FM были внесены изменения и еще планируется включение в аэрологические сообщения дополнительной информации по метаданным для станций Росгидромета, был создан новый формат в отделе аэрологии “ГУ ВНИИГМИ-МЦД” и рекомендуется для создания массива аэрологических наблюдений, поступающих по каналам связи, для долговременного хранения.

Аэрологическое наблюдение представляет данные, полученные в результате выпуска одного радиозонда (радиопилота). Условно структура записи состоит из двух частей: постоянной и переменной. Постоянная часть записи состоит из призначной и информационной частей.

Состав призначной части записи

- Длина записи
- Синоптический индекс станции или радиопозывные судна
- Год
- Месяц
- День
- Срок наблюдения по ВСВ, часы
- Действительное время выпуска радиозонда по ВСВ, часы и

минуты

- Широта со знаком
- Долгота со знаком
- Номер квадрата Марседена
- Квадрант земного шара
- Цифра единиц градусов широты
- Цифра единиц градусов долготы
- Индекс источника данных (вид наблюдения)
- Счетчик поверхностей

Информационная часть постоянной части записи содержит высоту станции над уровнем моря, температуру поверхностного слоя воды (для

судовой станции), данные облачности; сведения о типе оборудования, радиационной поправке, используемом радиозонде/системе зондирования, методе слежения/состоянии системы и элементы дополнительных метаданных со станций Росгидромета, которые планируются к включению в коды.

Переменная часть записи содержит собственно данные наблюдения радиозонда (радиопилота) на уровнях:

- на уровне земли
- на стандартных изобарических поверхностях (уровни: 1000; 925; 850; 700; 500; 400; 300; 250; 200; 150; 100; 70; 50; 30; 20; 10 гПа)
- на уровнях тропопаузы
- на уровнях особых точек по температуре и влажности
- на уровнях особых точек по ветру
- на уровнях максимального ветра.

Однако, для получения данных аэрологических наблюдений из архива Мирового центра данных необходима дополнительная регистрация на сайте и доступ к интересующим данным.

Глава 2. Формирование архива вертикальных профилей температуры в арктическом регионе

2.1 Выбор станций аэрологического зондирования атмосферы в арктическом регионе

Для анализа вертикальной структуры профилей температуры в арктическом регионе необходимо сформировать архив данных температурно-ветрового зондирования. В данной работе были рассмотрены данные с четырех станций, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Код станции	Наименование	Широта, °	Долгота, °	Высота над уровнем моря, м
20046	Остров Хейса Обсерватория Им. Кренкеля	80,6	58,1	22
20292	Обсерватория Федорова Мыс Челюскин	77,7	104,3	15
20674	Остров Диксон	73,5	80,4	47
20744	Малые Кармакулы	72,4	52,7	15

Обсерватория, названная в честь имени Эрнста Кренкеля, располагается на острове Хейса, который в свою очередь является частью северного архипелага Франца-Иосифа. При своем запуске научно-исследовательская станция называлась «Дружная». Ее открытие произошло в 1957 году. Обсерватория стала самой северной метеорологической станцией на территории Российской Федерации. Станция находится на высоте двадцати двух метров выше уровня моря.

Полярная гидрометеорологическая станция Мыс Челюскин расположена на вытянутом с северо-запада на юго-восток побережье полуострова Таймыр. К столетию экспедиции С.И. Челюскина мыс был переименован Российским географическим обществом из мыса Восточно-Северный в мыс Челюскин. Там же расположен и самый северный аэродром континентальной Евразии – Мыс Челюскин, который обслуживается Хатангским объединённым авиапредприятием. В январе 1983 года станция получила имя академика Евгения Константиновича Фёдорова (1910 – 1981) – участника первой дрейфующей станции «Северный полюс».

Поселок Диксон был основан в 1915 г. на острове Диксон, материковая часть застроена позже. В сентябре 1915 г. на острове была открыта одна из первых арктических радиостанций, а с 1916 г. работает гидрометеорологическая станция, на базе которой в 30-х годах образованы первый на Северном морском пути арктический радиометеорологический центр и геофизическая обсерватория.

Становище Малые Кармакулы было создано в 1877 году. В следующем году в Малые Кармакулы прибыла экспедиция гидрографа Е. А. Тягина, которая построила здесь спасательную станцию и провела гидрометеорологические наблюдения. С 1 сентября 1882 г. по 3 сентября 1883 г. по программе Первого международного полярного года в Малых Кармакулах проводятся непрерывные наблюдения по метеорологии и земному магнетизму. Работами полярной станции руководил гидрограф, лейтенант К. П. Андреев. В июле 1896 года в Малых Кармакулах была открыта метеорологическая станция.

Все станции находятся в арктическом тундровом климате. Для предоставленного ареала свойственны два ведущих сезона – зима и лето. Огромную доля времени тут продолжается зима – в пределах 9 месяцев. Полярная ночь продолжается в пределах двух месяцев. Зимой довольно холодно, мрачно и ветрено со средней температурой в пределах -28°C , временами опускаясь до -50°C . В течении лета температура немного

увеличивается, и верхний слой сезонно-мерзлой земли тает, оставляя землю довольно мокрой. Тундра покрыта болотами, озерами, болотами и ручьями в теплые месяцы. Как правило, дневные температуры в направлении лета поднимаются приблизительно до 12°C , но нередко имеют все шансы спускаться до 3°C или же в том числе и ниже нулевой отметки. Распределение станций представлено на рисунке 10.



Рисунок 10. Карта арктического региона с отмеченными станциями

Также был произведен расчет взаимного расстояния между группой выбранных станций по заданным координатам. Обычно решение данной задачи сводится к выполнению трех основных шагов:

- 1) определить общее число расстояний;

2) произвести пересчет имеющихся координат в декартову систему координат (при необходимости);

3) вычислить все требуемые расстояния.

Общее число расстояний определялось по формуле:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (1)$$

где, n – общее число станций;

k – количество элементов в каждом сочетании.

В нашем случае количество элементов в каждом сочетаний равно 2 (расстояние между 2 станциями) и, следовательно, при $k = 2$ расчетная формула примет следующий вид:

$$C_n^k = \frac{n!}{2!(n-2)!} \quad (2)$$

Подставив в формулу количество рассматриваемых станций – 4, мы получим, что общее число расстояний равно 6.

Перерасчет координат в декартову систему не потребовался, поскольку изначальные данные уже имели необходимый вид.

На следующем этапе мы воспользовались макросом «Парное2.xls», результатом работы которого и является расчет расстояний между станциями.

Все рассчитываемые расстояния удобно объединить в одну матрицу ta размерности $n*n$, где n – общее число станций. В этом случае каждый элемент этой матрицы с индексом i и j будет равен расстоянию между станциями с порядковым номером i и с порядковым номером j .

В том случае, когда индексы i и j совпадают, соответствующее значение матрицы будет равно 0: расстояние между одной и той же станцией. Во всех остальных случаях будет получено искомое значение.

Благодаря проделанным манипуляциям получаем таблицу, в которой представлена матрица расчета расстояний:

Таблица 2

Результат расчета взаимного расстояния между исследуемыми станциями в Арктическом регионе, выраженное в градусах

0	46.29	23.403	9.82	1	<= № АМС - взаимное расстояние между АМС
46.29	0	24.27	51.87	2	<= № АМС - взаимное расстояние между АМС
23.40	24.27	0	27.72	3	<= № АМС - взаимное расстояние между АМС
9.82	51.87	27.72	0	4	<= № АМС - взаимное расстояние между АМС
1	2	3	4	<= № АМС	

Анализируя таблицу 2, можно сделать вывод, что самое большое расстояние наблюдается между станциями 1 и 2 - Обсерватория Им. Кренкеля, Остров Хейса и Обсерватория Федорова, Мыс Челюскин. Расстояние между ними в градусах составило 51,87 градусов, что в километрах составит 5739 км. Наиболее близко оказались расположены станции 1 и 4 - Остров Хейса Обсерватория Им. Кренкеля и Малые Кармакулы. Это расстояние в градусах составляет 9.82, переведем в километры и получим 1090 км. В таблице 3 представлены расстояния между станциями в километрах.

Таблица 3

Результат расчета взаимного расстояния между исследуемыми станциями в
Арктическом регионе, выраженное в градусах

0	5138	2598	1090	1	<= № АМС - взаимное расстояние между АМС
5138	0	2694	5758	2	<= № АМС - взаимное расстояние между АМС
2597	2694	0	3077	3	<= № АМС - взаимное расстояние между АМС
1090	5758	3077	0	4	<= № АМС - взаимное расстояние между АМС
1	2	3	4	<= № АМС	

2.2 Формирование таблиц с данными в Excel

Для формирования архива использовались данные с сайта Университета Вайоминга [2] за январь, апрель, июль и октябрь 2021 года в 12 часов ВСВ. Фрагмент данных аэрологического зондирования на станции Обсерватория Им. Кренкеля за 25 января 2021 12 часов ВСВ в текстовом формате приведен на рисунке 11.

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1036.0	22	-25.9	-29.9	69	0.31	45	8	244.8	245.6	244.8
1020.0	137	-25.8	-29.9	68	0.31	85	10	245.9	246.8	246.0
1000.0	284	-25.7	-30.0	67	0.32	85	10	247.4	248.3	247.5
960.0	581	-24.1	-29.0	64	0.36	91	14	252.0	253.0	252.0
932.0	797	-23.6	-29.4	59	0.36	95	17	254.6	255.7	254.7
925.0	852	-23.5	-29.5	58	0.36	90	17	255.3	256.3	255.3
906.0	1003	-22.9	-29.7	54	0.36	90	21	257.4	258.4	257.4
877.0	1241	-22.1	-30.1	48	0.36	85	20	260.6	261.7	260.7
850.0	1469	-22.7	-32.7	40	0.29	80	19	262.4	263.2	262.4
847.0	1495	-22.7	-32.9	39	0.29	75	23	262.6	263.5	262.6
746.0	2426	-23.5	-39.5	22	0.17	80	25	271.4	272.0	271.5
741.0	2475	-23.9	-40.9	19	0.15	80	25	271.5	272.0	271.6
700.0	2889	-26.3	-42.3	21	0.13	75	23	273.3	273.8	273.4
653.0	3388	-29.7	-43.7	24	0.12	66	26	275.0	275.4	275.0
621.0	3741	-32.2	-45.5	25	0.11	60	27	276.1	276.5	276.1
557.0	4504	-37.5	-49.5	27	0.08	65	30	278.5	278.8	278.6
534.0	4793	-39.7	-51.7	27	0.06	67	31	279.3	279.5	279.3
500.0	5240	-43.1	-54.1	29	0.05	70	33	280.4	280.6	280.4
488.0	5401	-44.2	-55.0	29	0.04	70	33	281.0	281.2	281.1
434.0	6179	-49.5	-59.5	30	0.03	79	34	283.9	284.0	283.9
400.0	6710	-52.1	-62.1	29	0.02	85	35	287.2	287.3	287.2
387.0	6919	-53.4	-63.3	29	0.02	85	37	288.2	288.3	288.2
382.0	7001	-53.9	-63.7	29	0.02	80	37	288.6	288.7	288.6
314.0	8239	-61.7	-70.7	29	0.01	80	32	294.4	294.4	294.4
300.0	8520	-62.5	-71.5	29	0.01	80	31	297.1	297.2	297.1
279.0	8970	-63.1	-72.1	29	0.01	75	29	302.4	302.5	302.4
250.0	9650	-64.1	-73.1	28	0.01	70	29	310.6	310.7	310.6
210.0	10400	-68.0	-77.0	21	0.00	64	20	322.0	322.1	322.0

Рисунок 11. Фрагмент данных аэрологического зондирования на станции
Обсерватория Им. Кренкеля за 25 января 2021 12 часов ВСВ
в текстовом формате

Затем все полученные данные были конвертированы из текстового файла в Книгу «Excel». Для этого были выполнены следующие действия:

- 1) Кликнуть: «Данные», «Импортировать внешние данные», «Импортировать данные ...»;
- 2) Затем найти место расположения текстового файла, выделить его и нажать «Открыть»;
- 3) В появившемся диалоговом окне в окошке «Начать импорт со строки» записать номер строки, с которого начинаются данные для

температуры, нажать «Далее», убедиться, что все столбцы правильно выделены вертикальными линиями и нажать «Готово»;

4) Сохранить данные для дальнейшего использования в заданной папке с нужным именем как файл «Excel» (расширение .xls);

Фрагмент данных аэрологического зондирования на станции Обсерватория Им. Кренкеля за 25 января 2021 12 часов ВСВ в формате Excel приведен на рисунке 12.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	20046	Polargmo	Im.	Krenkeja	Observati	at	122		25	Jan		2021
2												
3		PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
4		hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
5												
6		1036	22	-26	-29.9	69	0.31	45	8	244.8	245.6	244.8
7		1020	137	-26	-29.9	68	0.31	85	10	245.9	246.8	246
8		1000	284	-26	-30	67	0.32	85	10	247.4	248.3	247.5
9		960	581	-24	-29	64	0.36	91	14	252	253	252
10		932	797	-24	-29.4	59	0.36	95	17	254.6	255.7	254.7
11		925	852	-24	-29.5	58	0.36	90	17	255.3	256.3	255.3
12		906	1003	-23	-29.7	54	0.36	90	21	257.4	258.4	257.4
13		877	1241	-22	-30.1	48	0.36	85	20	260.6	261.7	260.7
14		850	1469	-23	-32.7	40	0.29	80	19	262.4	263.2	262.4
15		847	1495	-23	-32.9	39	0.29	75	23	262.6	263.5	262.6
16		746	2426	-24	-39.5	22	0.17	80	25	271.4	272	271.5
17		741	2475	-24	-40.9	19	0.15	80	25	271.5	272	271.6
18		700	2889	-26	-42.3	21	0.13	75	23	273.3	273.8	273.4
19		653	3388	-30	-43.7	24	0.12	66	26	275	275.4	275
20		621	3741	-32	-45.5	25	0.11	60	27	276.1	276.5	276.1
21		557	4504	-38	-49.5	27	0.08	65	30	278.5	278.8	278.6
22		534	4793	-40	-51.7	27	0.06	67	31	279.3	279.5	279.3
23		500	5240	-43	-54.1	29	0.05	70	33	280.4	280.6	280.4
24		488	5401	-44	-55	29	0.04	70	33	281	281.2	281.1
25		434	6179	-50	-59.5	30	0.03	79	34	283.9	284	283.9
26		400	6710	-52	-62.1	29	0.02	85	35	287.2	287.3	287.2
27		387	6919	-53	-63.3	29	0.02	85	37	288.2	288.3	288.2
28		383	7004	-54	-63.7	29	0.02	85	37	288.5	288.7	288.5

Рисунок 12. Фрагмент данных аэрологического зондирования на станции Обсерватория Им. Кренкеля за 25 января 2021 12 часов ВСВ в формате Excel

После формирования базы в Excel для каждого дня исследуемых месяцев, все данные были приведены единой сетке по высоте с помощью макроса «Слайн-интерполяция.xls». Это является важным условием для формирования правильного среднемесячного профиля температуры. Результат работы макроса для 2 апреля 2021 года станции Обсерватория Им. Кренкеля представлен на рисунке 13.

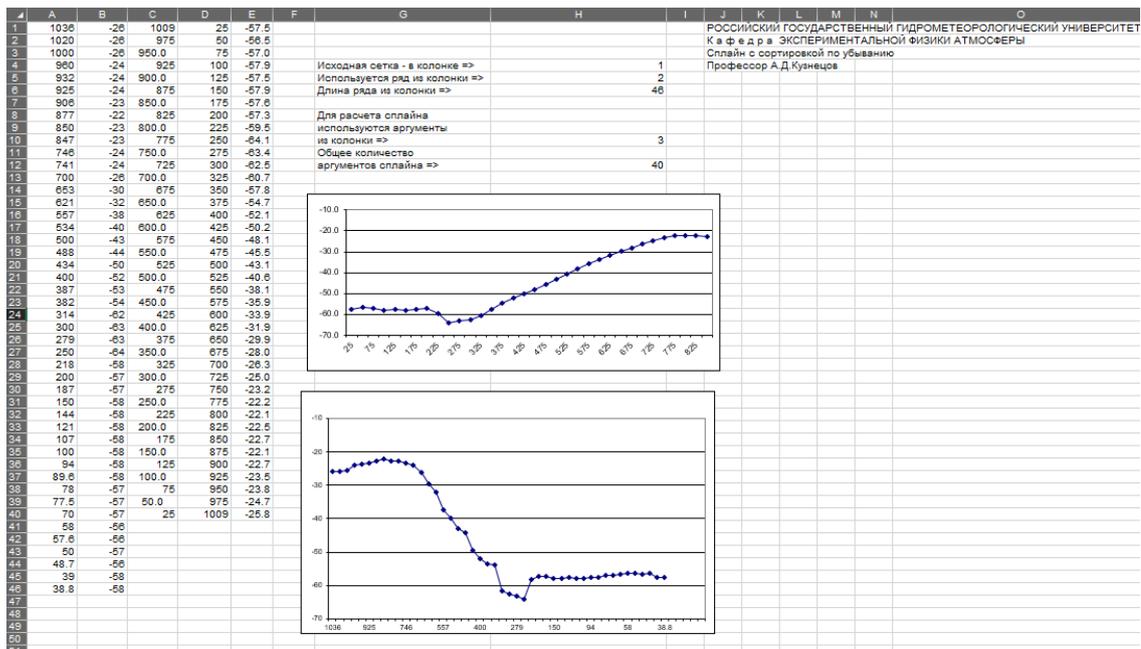


Рисунок 13. Фрагмент результата работы макроса "Сплайн-интерполяция.xls"

Таким образом, для каждого дня исследуемого периода мы имеем вертикальные профили температуры, примеры приведены на рисунке 14 и 15. Данные профили интересны для изучения, но сильно различаются из-за множества факторов, которые их формируют. Именно поэтому мы рассчитываем высотные профили среднемесячных температур. Так мы сможем получить представление об общих чертах хода температуры на высоте в Арктическом регионе.

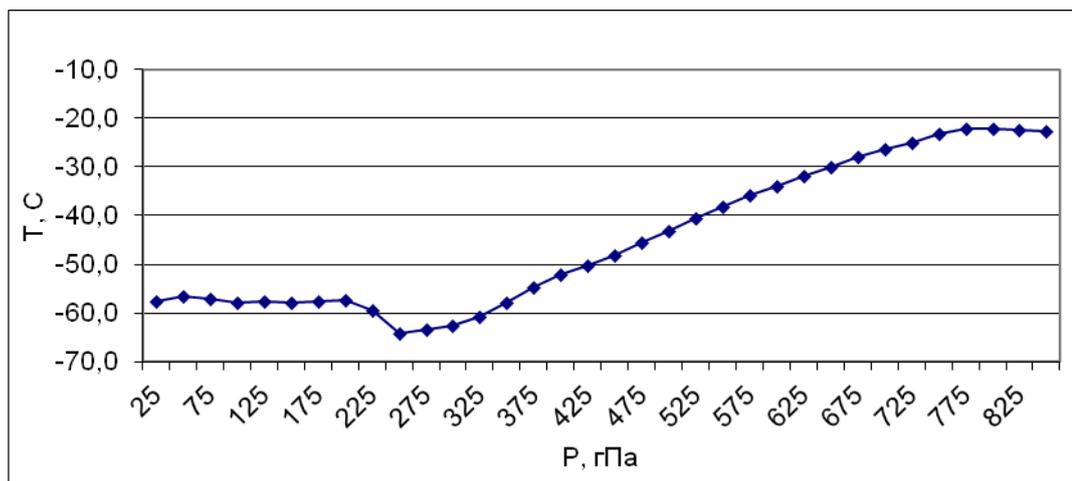


Рисунок 34. Вертикальный профиль температуры воздуха, о. Кренкеля, 25 января 2021 года, 12 часов ВСВ

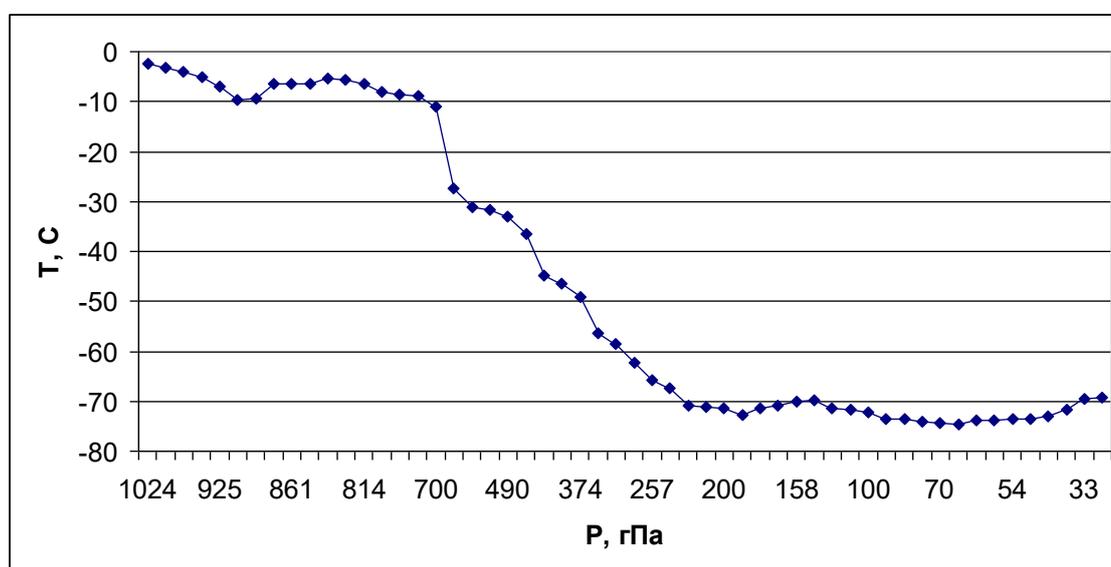


Рисунок 45. Вертикальный профиль температуры воздуха, о. Кренкеля, 2 января 2021 года, 12 часов ВСВ

Помимо высотных профилей были получены статистические характеристики для каждого ряда. В таблице 3 представлены результаты работы макроса и статистические характеристики для 10 января 2021 года станции Обсерватория Им. Кренкеля:

Таблица 3

Статистические характеристики вертикального профиля температуры, о.

Кренкеля, 10 января 2021 года, 12 часов

Среднее	-43,5 °С
Медиана	-43,5 °С
Мода	-4.2 °С
Стандартное отклонение	14,6°С
Интервал	68.0
Минимум	-64,0 °С
Максимум	-11,0 °С

Статистические характеристики вертикального профиля температуры, о. Кренкеля, 2 января 2021 года, 12 часов представлены в таблице 4:

Таблица 4

Статистические характеристики вертикального профиля температуры, о.

Кренкеля, 2 января 2021 года, 12 часов

Среднее	-45.5 °С
Медиана	-60.4 °С
Мода	-6.5 °С
Стандартное отклонение	29.2 °С
Интервал	72.0
Минимум	-74.5 °С
Максимум	-2.5 °С
Счет	54.0

Из статистических показателей также были рассмотрены аппроксимации вертикального профиля температуры воздуха полиномом 3-ей степени. В научных исследованиях аппроксимация применяется для

описания, анализа, обобщения и дальнейшего использования эмпирических результатов, для графического представления табличных данных.

Полиномиальная аппроксимация обеспечивает нахождение коэффициентов полинома

$$y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m \quad (3)$$

из решения системы уравнений (4)

$$\begin{cases} c_0 a_0 + c_1 a_1 + c_2 a_2 + \dots + c_m a_m = d_0 \\ c_1 a_0 + c_2 a_1 + c_3 a_2 + \dots + c_{m+1} a_m = d_1 \\ \dots \dots \dots \\ c_m a_0 + c_{m+1} a_1 + c_{m+2} a_2 + \dots + c_{m+m} a_m = d_m \end{cases} \quad (4)$$

При этом, следует учитывать, что коэффициент c рассчитывается по формуле 5, а коэффициент d по формуле 6:

$$c_j = \sum_{i=1}^N x_i^j, \quad (5)$$

где $j = 0, 1, 2, \dots, 2m$;

$$d_k = \sum_{i=1}^N x_i^k y_i, \quad (6)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, m$. (5) (6)

Полученные результаты для 10 января 2021 года представлен на рисунке 16, а для 2 января 2021 года – на рисунке 17.

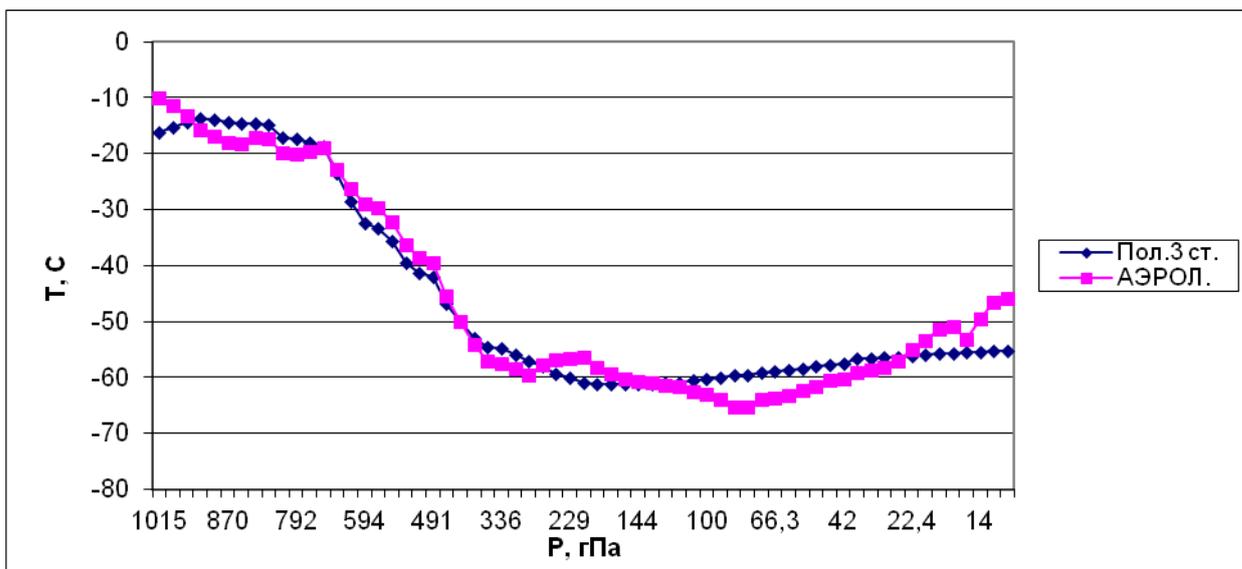


Рисунок 16. Пример аппроксимации вертикального профиля температуры воздуха полиномом 3-ей степени, о. Кренкеля, 10 января 2021 года, 12 часов

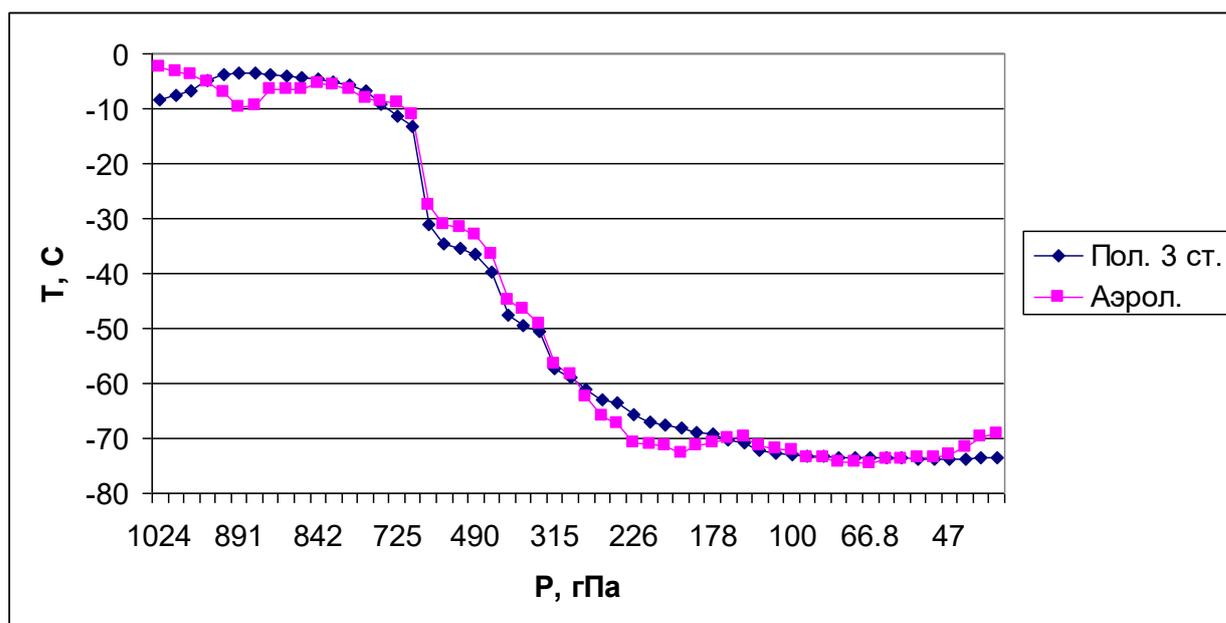


Рисунок 17. Пример аппроксимации вертикального профиля температуры воздуха полиномом 3-ей степени, о. Кренкеля, 2 января 2021 года, 12 часов

Таблица 5

Коэффициенты аппроксимационного полинома 3-ей степени для вертикального профиля температуры воздуха, о. Кренкеля, 2 января 2021 года, 12 часов

0	-73.02934602
1	-0.028331894
2	0.000320189
3	-2.25537E-07

Также для статистического анализа были рассмотрены ранжированные ряды вариационного ряда. Это однородная в качественном отношении статистическая совокупность, отдельные единицы которой характеризуют количественные различия изучаемого признака или явления. Вариационные ряды рассчитываются для определения средних величин. В качестве примера для нашего периода в работе представлен ранжированный вариационный ряд вертикального профиля температуры воздуха для 2 января 2021 года на о. Кренкеля за 12 часов. Данный график изображен на рисунке 18.



Рисунок 18. Вариационный ряд вертикального профиля температуры воздуха (в порядке возрастания), о. Кренкеля, 2 января 2021 года, 12 часов

Все полученные данные объединены в один архив и дают важное понимание и обоснованность выбранных нами методов для проведения

исследования. Статистические результаты описывают важные особенности совокупности данных, полученных с помощью наблюдений.

Глава 3 Анализ вертикальной структуры профиля температуры в арктическом регионе

3.1 Сезонная изменчивость вертикальной структуры профиля температуры в Арктическом регионе

Рассматривая сезонную изменчивость вертикальной структуры профиля температуры, рассмотрим отдельно графики для каждой выбранной станции за январь и июль. Вертикальные профили среднемесячной температуры на станции Остров Хейса, Обсерватория Им. Кренкеля представлены на рисунке 19. На графике мы видим, что в январе температуры падает сначала медленно до высоты 825 гПа, после чего градиент температуры увеличивается и на высоте 275 гПа падение останавливается, а градиент меняет свой знак. В слое от 275 до 150 гПа наблюдается инверсия и на протяжении 50 гПа мы видим слой изотермии, после которого температура сначала падает, а затем начинает расти. В июле наблюдает приземная инверсия в 900 гПа. После чего температура воздуха начинает падает с увеличением градиента температуры с высотой. Падение останавливается на высоте 275 гПа, после которого наблюдается ярко выраженный слой инверсии, относительно зимнего сезона, представленного среднемесячным профилем января. И, приблизительно, на высоте 125 гПа наступает изотермия.

Для станции на о. Хейса профили летнего и зимнего профиля имеют схожий ход температуры. Средняя разница между сезонными значениями составила около 20 градусов. Наименьшая разница температур между сезонами наблюдается на высоте 250 гПа – в момент наступления инверсии на высоте. Летом высота и толщина тропопаузы больше, чем в зимний сезон. Это объясняется температурой и плотностью воздуха. Чем теплее воздух, тем меньше его плотность и тем выше будет находиться слой изотермии. И наоборот – чем холоднее воздух, тем больше плотность и тем ниже будет располагаться тропопауза.

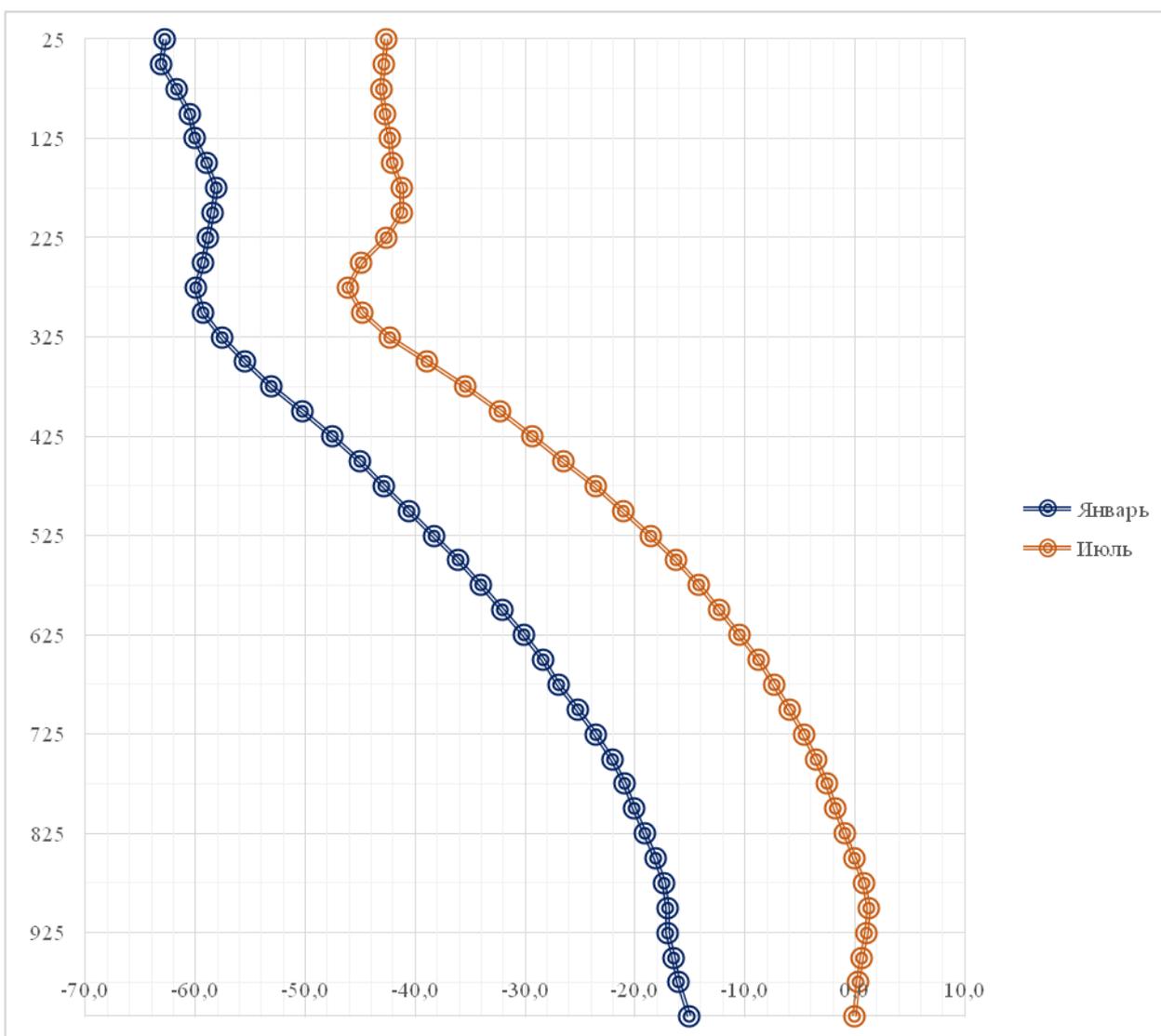


Рисунок 19. Вертикальные профили среднемесячной температуры на станции Остров Хейса, Обсерватория Им. Кренкеля для января и июля 2021 года.

Анализ и описание высотных профилей температуры для станции Обсерватория Федорова, Мыс Челюскин были сделаны по рисунку 20. На графике мы видим, что в январе температуры падает сначала растет до высоты 925 гПа, что является не характерным для зимнего периода, после чего температура начинает монотонно убывать и падение заканчивается на высоте 275 гПа. Затем мы видим небольшой слой инверсии толщиной 50 гПа и стабильный, достаточно большой слой изотермии до высоты 50 гПа, после

чего температуры начинает увеличиваться, подчиняясь законом стандартного распределения температуры с высотой.

В июле наблюдает приземная инверсия в слое до 1000 гПа. После чего температура воздуха начинает падать с увеличением градиента температуры с высотой. Падение останавливается на высоте 300 гПа, после которого наблюдается ярко выраженный слой инверсии до высоты 200 гПа. После чего имеется небольшой слой изотермии толщиной 50 гПа, дальше температура уменьшается, а после немного увеличивается.

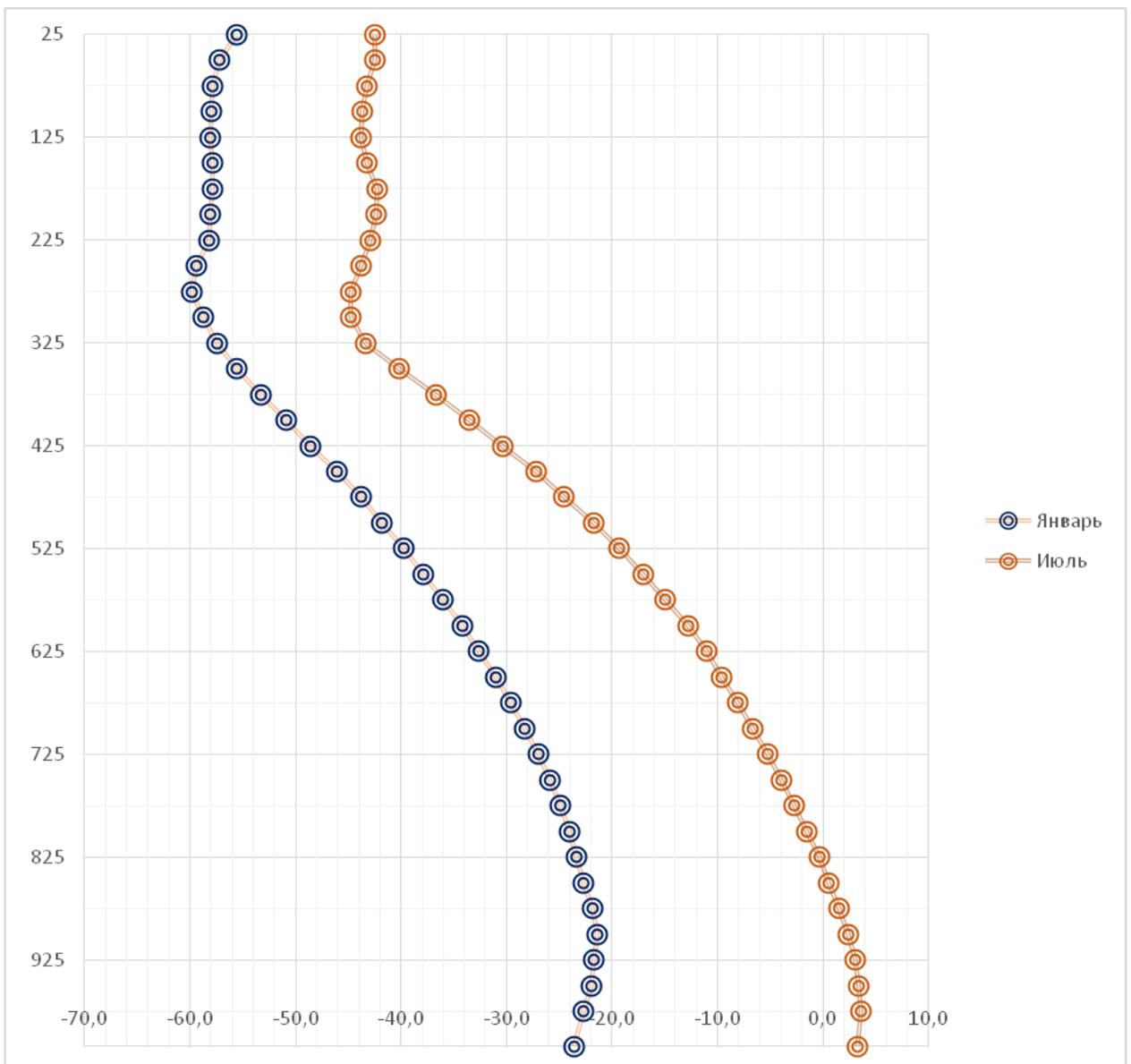


Рисунок 20. Вертикальные профили среднемесячной температуры на станции
Обсерватория Федорова, Мыс Челюскин для января и июля 2021 года.

График среднемесячного вертикального профиля температуры для
летнего и зимнего сезонов для станции острова Диксон представлены на
рисунке 21.

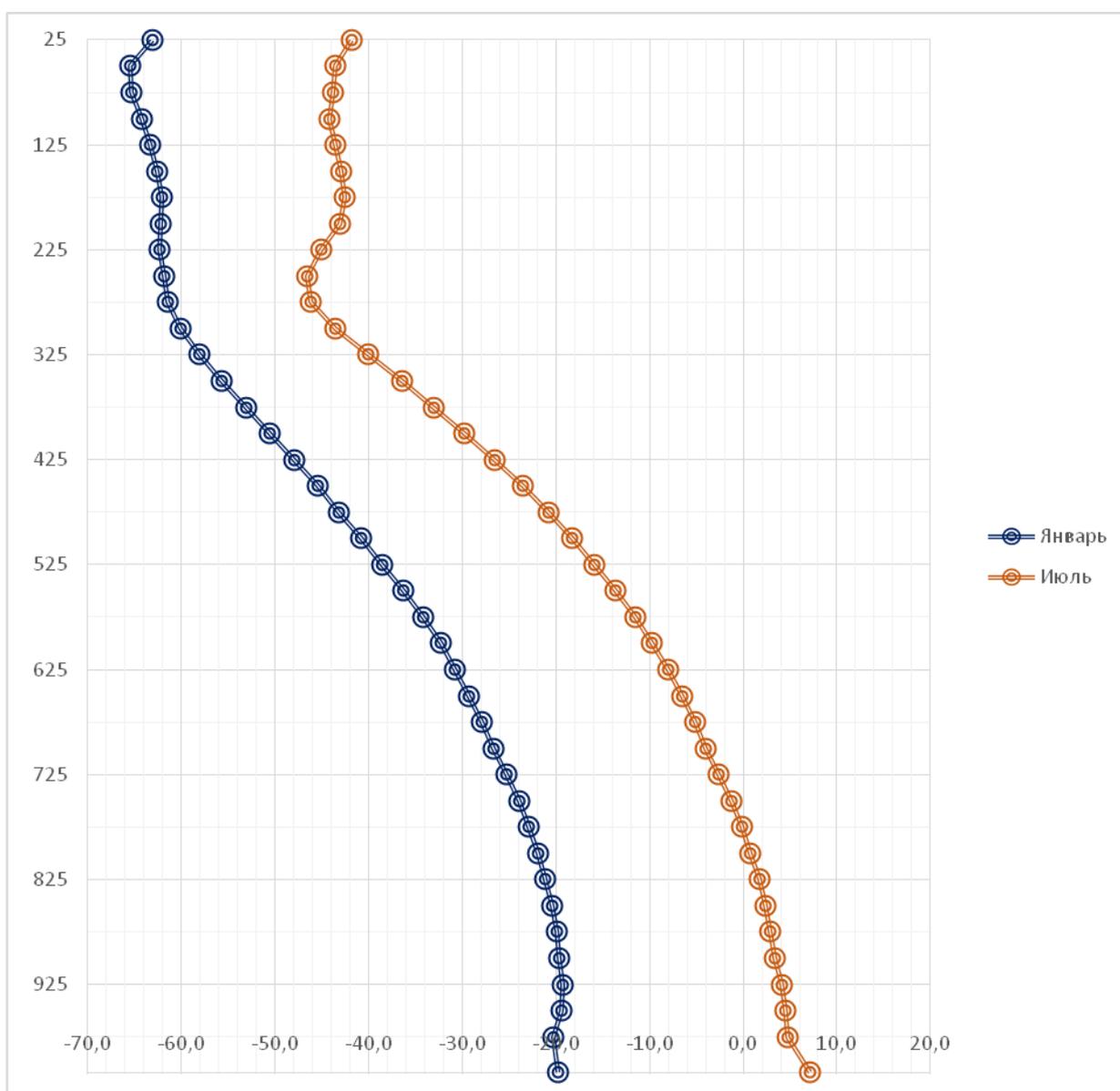


Рисунок 21. Вертикальные профили среднемесячной температуры на станции
острова Диксон для января и июля 2021 года.

В январе на о. Диксон в приземном слое наблюдается небольшой слой изотермии, после чего температура немного увеличилась и затем температура начала падать. С увеличением высоты градиент температуры увеличивается. На высоте 275 гПа падение температуры останавливается и начинается слой изотермии, который держится до высоты 150 гПа. Затем температура опять падает до высоты 50 гПа и начинает расти.

В июле не наблюдается приземной инверсии, характерной для летних среднемесячных высотных профилей температуры. Температура падает до высоты 275 гПа быстрее, чем в зимний период. После этого наблюдается небольшой слой изотермии толщиной 25 гПа и следом за ним слой ярко выраженной инверсии до высоты 175 гПа. Затем мы видим достаточно большой слой изотермии и стандартный рост температуры после.

Если говорить о изменчивости между сезонными профилями, то главным отличием здесь будет являться наличие ярко выраженной инверсии на высоте. При этом в летний сезон на о. Диксон отсутствует приземная инверсия, которой также не наблюдается в зимний период.

Результаты построения вертикальных профилей среднемесячных температур на станции Малые Кармакулы отражены на рисунке 22. Здесь в январе мы видим слабое понижение температуры воздуха с высотой до 850 гПа, а после градиент температуры увеличивается. На высоте 225 гПа наступает слой изотермии и после 150 гПа температура снова продолжает падать, что не характерно для высотного распределения температуры.

В июле мы видим приземную инверсию, после чего температура начинает убывать. Как и в предыдущих случаях, градиент температуры увеличивается с высотой. Затем на высоте 275 гПа падение прекращается и наступает небольшой слой изотермии. После этого наблюдается небольшой слой инверсии и, следом за ним, слой изотермии до высоты 175 гПа. Затем температура падает, хоть и продолжает сохранять стабильное положение.

Наименьшая разница температур между сезонами наблюдается на высоте 250-275 гПа, а наибольшая разница наблюдается в приземном слое, где летом присутствует инверсия.

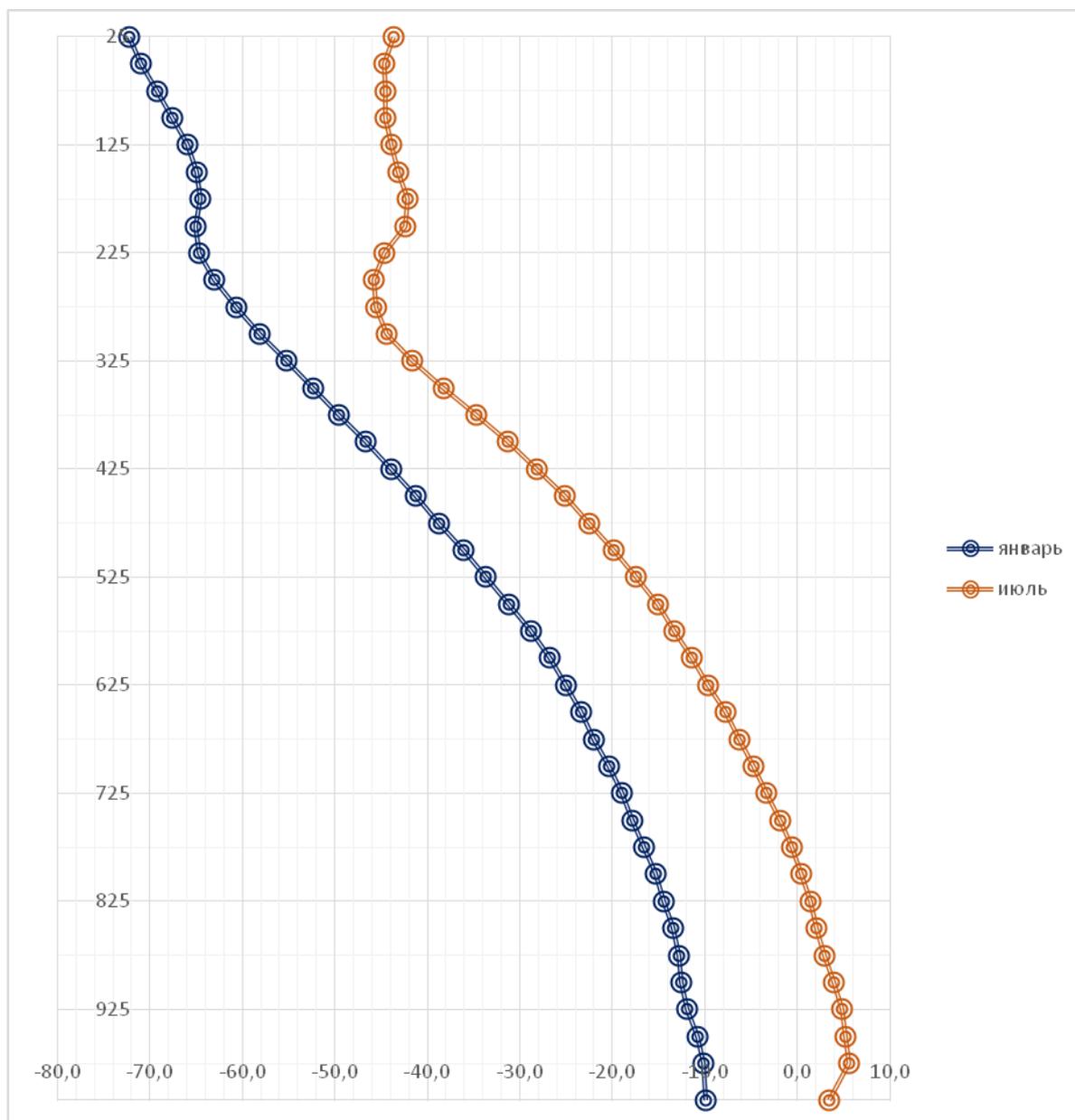


Рисунок 22. Вертикальные профили среднемесячной температуры на станции Малые Кармакулы для января и июля 2021 года.

Подводя итоги сезонной изменчивости высотных профилей среднемесячных температур воздуха в арктическом регионе, можно сделать вывод, что в летний период на высотах до 100 м существует (в среднем месячном профиле сезона) инверсия температуры, являющаяся следствием

ночных приземных инверсий. Выше 950 гПа наблюдается убывание температуры с высотой. Также в летние месяцы высота тропопаузы выше, чем в зимний период. В зимние месяцы высотная инверсия является менее ярко выраженной, чем в летний сезон.

3.2 Пространственная изменчивость вертикальной структуры профиля температуры в арктическом регионе

Для анализа сезонной изменчивости были взяты среднемесячные значения температуры воздуха по высотам для всех четырех выбранных станций за январь и июль.

Все рассчитанные значения температур были сведены в таблицу 6 для января и таблицу 7 для температур в июле. Слева в таблице расположены значения давления через каждые 25 гПа, а сверху указаны номера станций, на которых наблюдалась данная температура.

Таблица 6

Среднемесячные температуры воздуха арктического региона
для января 2021 года

Р, гПа	20046	20292	20674	20744
25	-62.8	-55.6	-63.2	-72.3
50	-63.1	-57.2	-65.5	-71.0
75	-61.7	-57.8	-65.3	-69.2
100	-60.6	-57.9	-64.2	-67.6
125	-60.0	-58.0	-63.4	-65.9
150	-59.0	-57.9	-62.6	-64.9
175	-58.1	-57.9	-62.1	-64.6
200	-58.4	-58.1	-62.3	-65.1
225	-58.9	-58.2	-62.3	-64.7
250	-59.4	-59.5	-61.9	-63.0
275	-60.0	-59.8	-61.5	-60.6
300	-59.3	-58.8	-60.0	-58.1
325	-57.6	-57.4	-58.1	-55.3
350	-55.5	-55.6	-55.8	-52.4
375	-53.1	-53.3	-53.1	-49.6
400	-50.2	-50.9	-50.6	-46.7
425	-47.5	-48.6	-47.9	-43.9

Р, гПА	20046	20292	20674	20744
450	-45.1	-46.1	-45.5	-41.3
475	-42.9	-43.8	-43.2	-38.8
500	-40.6	-41.8	-40.9	-36.1
525	-38.3	-39.8	-38.6	-33.7
550	-36.1	-37.9	-36.3	-31.2
575	-34.1	-36.0	-34.2	-28.8
600	-32.1	-34.2	-32.3	-26.8
625	-30.2	-32.6	-30.7	-25.0
650	-28.4	-31.0	-29.3	-23.4
675	-26.9	-29.6	-27.9	-22.0
700	-25.2	-28.3	-26.6	-20.4
725	-23.5	-27.0	-25.2	-19.0
750	-22.0	-25.9	-23.9	-17.8
775	-20.9	-24.9	-22.9	-16.6
800	-20.1	-24.1	-21.9	-15.3
825	-19.1	-23.4	-21.1	-14.4
850	-18.1	-22.7	-20.4	-13.4
875	-17.4	-21.8	-19.9	-12.8
900	-17.1	-21.4	-19.6	-12.5
925	-17.1	-21.7	-19.3	-11.9
950	-16.5	-22.0	-19.5	-10.8
975	-16.1	-22.7	-20.3	-10.1
1009	-15.1	-23.5	-19.8	-9.9
СКО	16.0	13.6	16.0	19.5

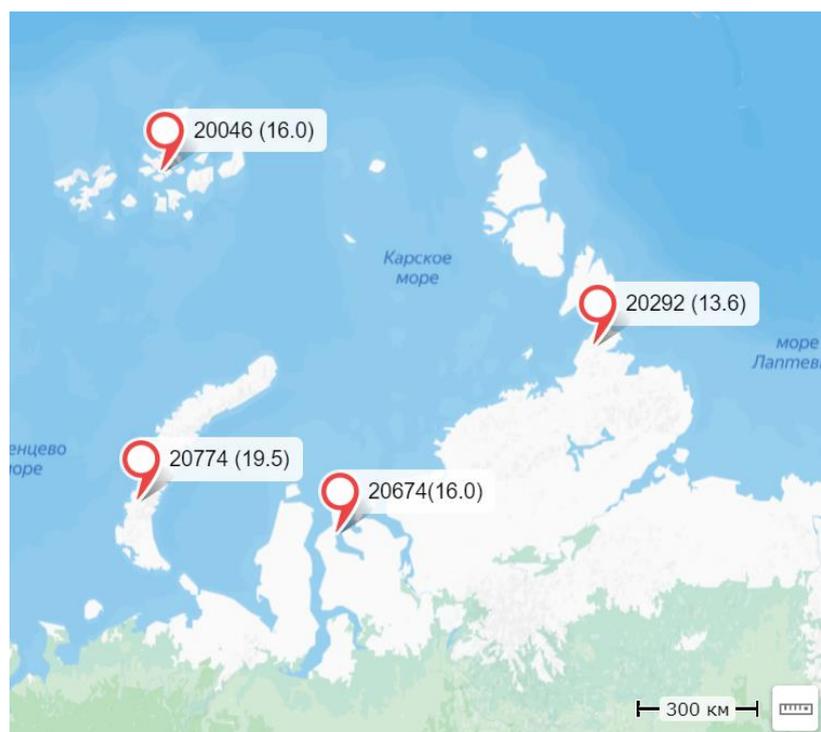


Рисунок 23. Пространственное распределение среднеквадратичного отклонения температуры для января 2021 года

Самой северной станцией является станция на о. Хейса (20046). На рисунке 23 изображено пространственное распределение среднеквадратичного отклонения (СКО) температуры для января 2021 года. По рисунку видно, что в январе СКО увеличивается с востока на запад. При этом наибольшее значение на станции 20774 – Малые Кармакулы, а минимальное значение на станции, расположенной на острове Диксон.

Таблица 7

Среднемесячные температуры воздуха арктического региона для июля 2021 года

Р, гПа	20046	20292	20674	20744
25	-42.7	-42.5	-41.8	-43.7
50	-42.9	-42.5	-43.5	-44.7
75	-43.1	-43.3	-43.8	-44.5
100	-42.8	-43.7	-44.2	-44.5
125	-42.3	-43.8	-43.5	-43.9
150	-42.1	-43.3	-42.9	-43.1
175	-41.3	-42.3	-42.6	-42.2
200	-41.3	-42.3	-43.1	-42.4
225	-42.7	-42.9	-45	-44.7
250	-45	-43.8	-46.6	-45.8
275	-46.1	-44.8	-46.2	-45.6
300	-44.9	-44.7	-43.6	-44.4
325	-42.3	-43.3	-40.1	-41.7
350	-39	-40.2	-36.5	-38.2
375	-35.4	-36.7	-33	-34.7
400	-32.4	-33.6	-29.7	-31.3
425	-29.4	-30.4	-26.6	-28.2
450	-26.5	-27.2	-23.6	-25.2
475	-23.6	-24.6	-20.8	-22.5
500	-21.1	-21.7	-18.3	-19.9
525	-18.6	-19.3	-15.9	-17.5
550	-16.3	-17	-13.6	-15.1
575	-14.2	-14.9	-11.6	-13.3
600	-12.3	-12.8	-9.8	-11.4
625	-10.5	-11	-8	-9.6
650	-8.8	-9.6	-6.5	-7.8

Р, гПа	20046	20292	20674	20744
675	-7.3	-8.1	-5.1	-6.3
700	-5.9	-6.6	-4	-4.8
725	-4.7	-5.2	-2.6	-3.3
750	-3.5	-4	-1.3	-1.9
775	-2.6	-2.7	-0.2	-0.6
800	-1.8	-1.5	0.7	0.4
825	-0.9	-0.3	1.8	1.4
850	-0.1	0.6	2.3	2.1
875	0.8	1.5	2.9	2.9
900	1.3	2.4	3.4	4.0
925	1	3.1	4.1	4.8
950	0.6	3.4	4.5	5.2
975	0.3	3.6	4.7	5.6
1009	0	3.3	7.1	3.4
СКО	16.6	17.1	17.8	17.8

В июле пространственное распределение СКО отличается от зимнего периода и представлен на рисунке 24.

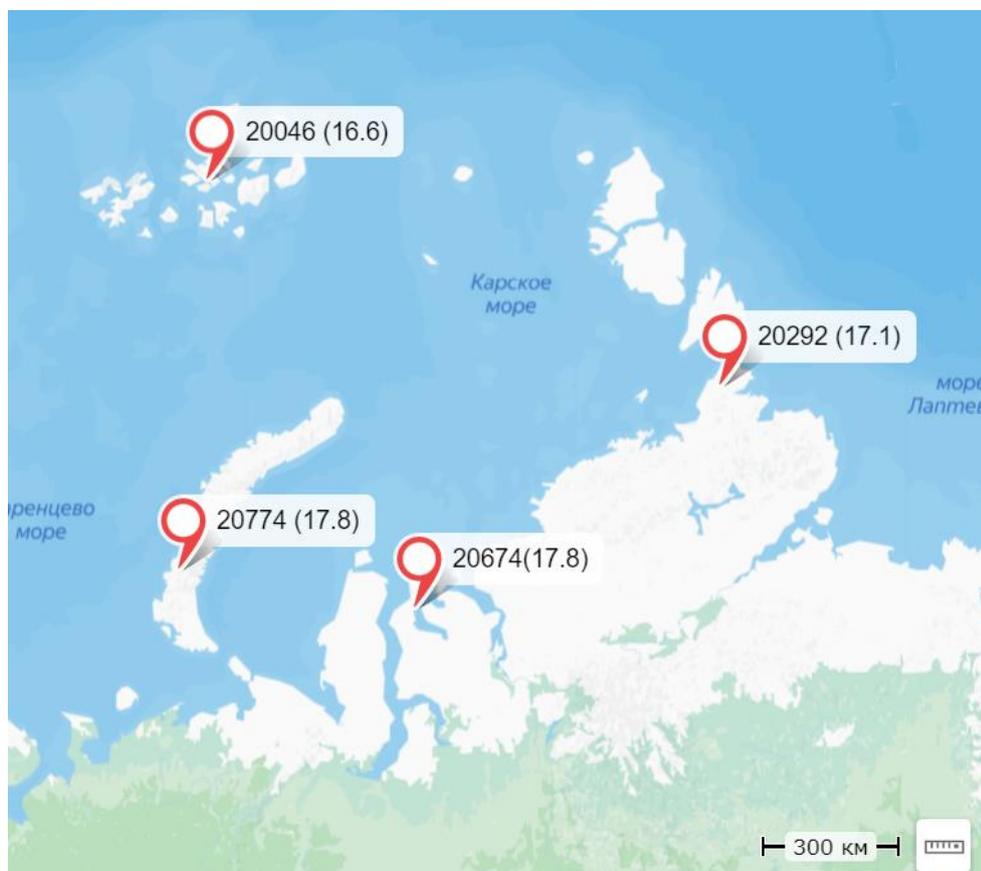


Рисунок 23. Пространственное распределение среднеквадратичного отклонения температуры для января 2021 года

Амплитуда изменения по пространству становится меньше. Максимум наблюдается на станциях Малые Кармакулы и о. Диксон, минимум – о. Хейса. СКО увеличивается в юго-западном направлении.

Анализируя пространственную изменчивость профилей среднемесячных температур, были построены графики, изображенные на рисунке 24 для января и рисунке 25 для июля.

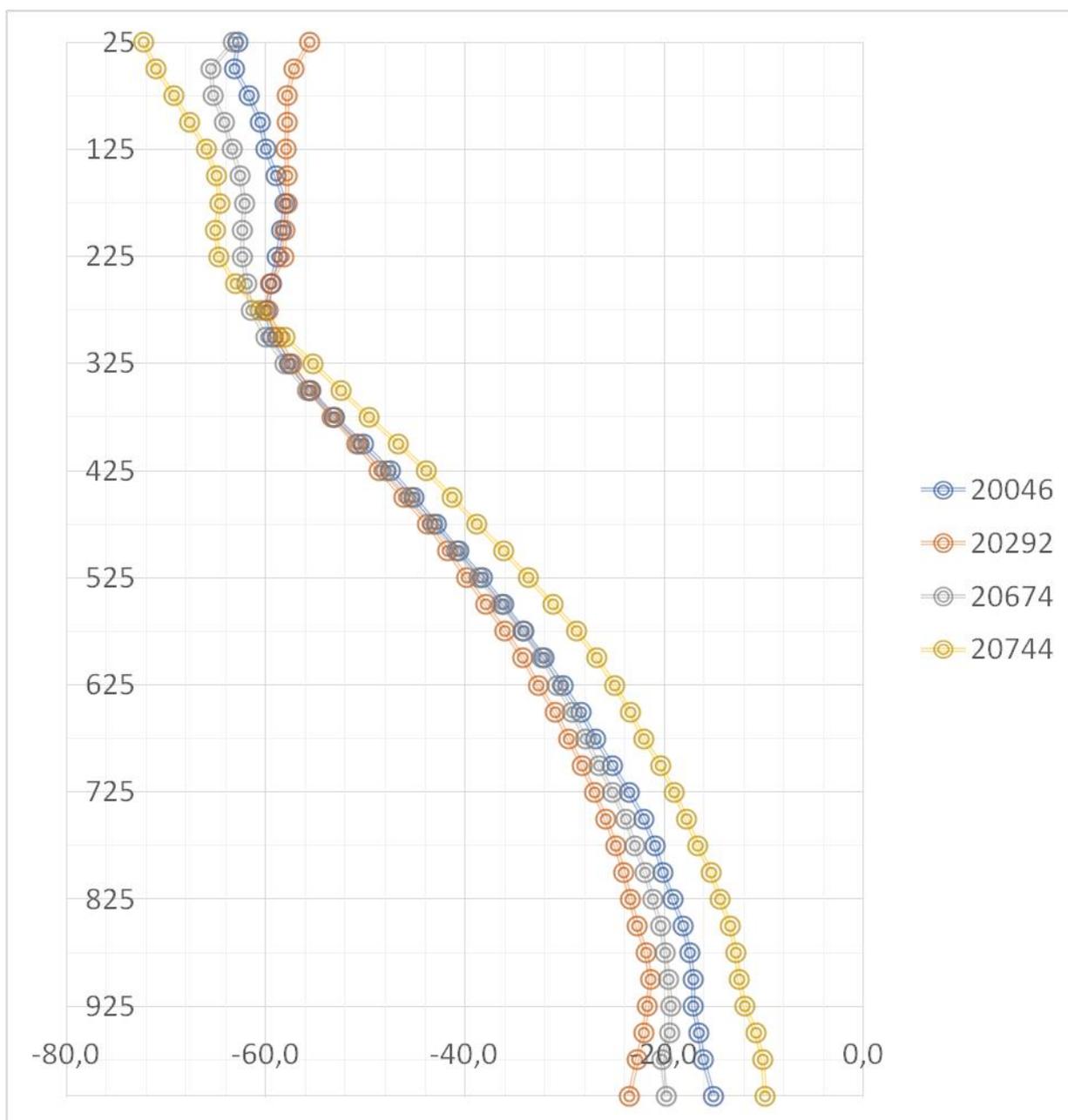


Рисунок 24. Вертикальные профили среднемесячной температуры арктического региона для января 2021 года

На рисунке 24 мы видим, что до высоты 275 гПа все профили имеют схожий ход. При этом самой теплой является станция 20744 – Малые Кармакулы. С высоты 450 гПа профили всех остальных станций сходятся в один и температура продолжает падать. После высоты 275 гПа температура на станции Малые Кармакулы продолжает падать, в отличие от других станций. И станцией с максимальной температурой становится станция 20292 – мыс Челюскин. Инверсия наблюдается лишь на станциях 20046 и 20292. На станции 20674 сразу наступает изотермия. Именно здесь высота тропопаузы будет минимальной на рассматриваемой территории. Раньше всех температура начинает повышаться на станциях 20674 и 20292, что объясняется их расположением (южнее других станций).

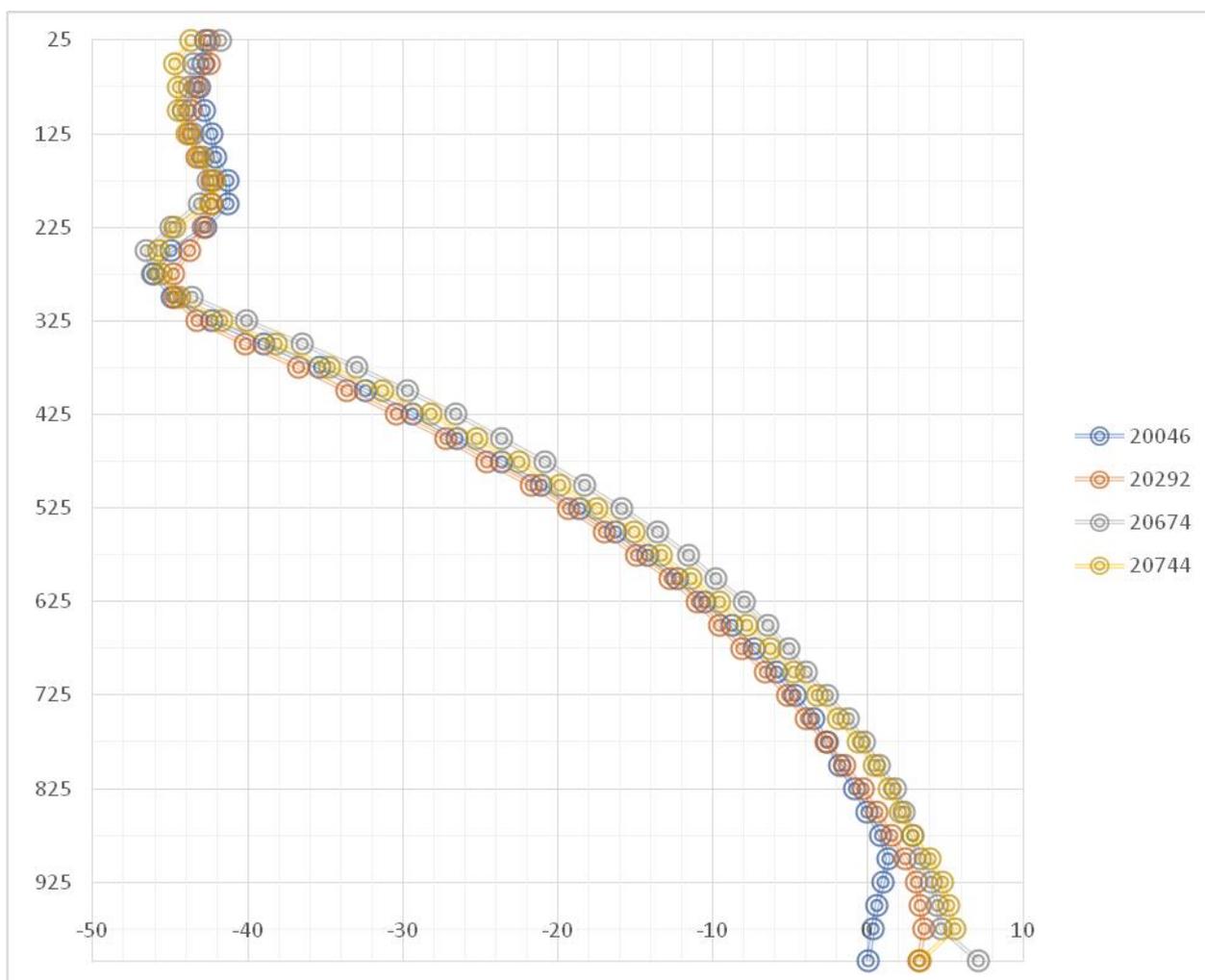


Рисунок 25. Вертикальные профили среднемесячной температуры
арктического региона для июля 2021 года

Различия в пространственном плане для летних месяцев менее заметно. Чем южнее территория, тем меньше градиент температуры в приземной инверсии. Самый большой слой приземной инверсии наблюдается на о. Хейса – самой северной станции.

До высоты 275 гПа самой холодной сначала является станция 20046 (даже с учетом инверсии), а после станция 20292. После чего у всех профилей наблюдается характерная для летнего месяца ярко выраженная высотная инверсия, а пространственные различия в температура на этом слое минимальны. Высота и толщина тропопаузы также одинакова на всех станциях не зависимо от их пространственного расположения.

Заключение

Изучение высотных профилей температуры является важной задачей современных комплексных исследований Арктики. Благодаря знанию вертикальных профилей характеристик атмосферы, в том числе температуры, можно дать правильный расчет загрязнений нижних слоев воздуха, что также актуально для арктического региона в последнее время. Часть задач, для которых необходимо знание и анализ вертикальных профилей температуры, связана со строительным проектированием и эксплуатацией машин и механизмов, имеющих большие размеры. В то время, как происходит процесс рекреации арктических территорий и работы на крайнем севере. Помимо этого, знание вертикальных профилей температуры является такой же актуальной информацией для местной авиации.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы было получено несколько закономерностей сезонного и пространственного распределения высотных профилей среднемесячной температуры арктического региона.

В летний период на высотах до 100 м существует (в среднем месячном профиле сезона) инверсия температуры, являющаяся следствием ночных приземных инверсий. Выше 950 гПа наблюдается убывание температуры с высотой. Также в летние месяцы высота тропопаузы выше, чем в зимний период. В зимние месяцы высотная инверсия является менее ярко выраженной, чем в летний сезон.

Наибольшая пространственная изменчивость заметна в зимний период. Высота тропопаузы увеличивается с востока на запад. СКО температуры также увеличивается с востока на запад. При этом наибольшее значение на станции 20774 – Малые Кармакулы, а минимальное значение на станции, расположенной на острове Диксон.

В летний период, в частности июль, наибольшее пространственное расхождение наблюдается в нижних слоях атмосферы. Чем южнее территория, тем меньше градиент температуры в приземной инверсии. Самый большой слой приземной инверсии наблюдается на о. Хейса – самой северной станции.