



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

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему «Оценка влияния изменений климата на состояние многолетней мерзлоты с учётом новых источников информации»

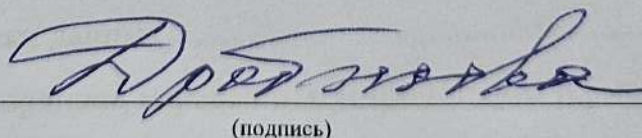
Исполнитель Степанец Александр Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Доктор технических наук, старший научный сотрудник
(ученая степень, ученое звание)

Лобанов Владимир Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

И.о. заведующего
кафедрой


(подпись)

Доктор физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«27» Мая 2025 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТА НА ОСНОВЕ СТАНДАРТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ	7
1.1 Анализ текущего состояния стандартных источников информации о температурах грунтов.....	7
1.1.1 Получение данных о температурах почвы, измеренных стандартными средствами	8
1.1.2 Оценка изменений количества информации о температурах грунта на метеостанциях.....	10
1.2 Оценка климатических изменений температуры почвы, полученной стандартными методами измерений на глубине 3.2 метра	14
1.2.1 Методика оценки климатических изменений в многолетних рядах.....	15
1.2.2 Оценка климатических изменений параметров модели внутригодовых колебаний температуры почвы на глубине 3.2 м.....	19
1.2.3. Оценка климатических изменений среднемесячной температуры почвы на глубине 3.2 м	30
2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ МОНИТОРИНГОВОЙ СЕТИ.....	36
2.1 Создание приложений для получения исходных данных	36
2.1.1 Получение данных о температуре грунтов с использованием IMAP Client	37
2.1.2 Парсинг и формирование исходного набора данных	39
2.2 Решение проблемы перемещения термометрических устройств	41
2.2.1 Кластеризация на основе плотности как возможное решение проблемы географической привязки данных.....	42
2.2.2 Кластеризация координат, переданных устройствами термометрического мониторинга	46
2.3 Определение неоднородностей временного ряда, связанных с заменой термометрических устройств и нарушениями в работе датчиков	50
2.3.1 Нормализация данных посредством вычисления остатков	50
2.3.2 Поиск неоднородностей временного ряда и фильтрация выбросов.....	55
3. ПРИМЕНИМОСТЬ НОВЫХ ДАННЫХ О ТЕМПЕРАТУРАХ ГРУНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ.....	58
3.1 Оценка связи между новыми данными и данными метеостанций за совместный период	58
3.1.1 Краткие сведения о корреляционном анализе	59

3.1.2 Корреляционный анализ новых и стандартных источников данных за совместный период.....	62
3.2 Оценка климатических изменений на основе новых источников информации	69
3.2.1 Теоретические сведения.....	70
3.2.2 Анализ температурных профилей, построенных с использованием новых данных	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	77
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	81
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Упрощённая блок-схема программы “MailCollector” для получения данных с почтового сервера.	84
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Упрощённая блок-схема программы “MailParser” для преобразования данных, полученных “MailCollector”.....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Упрощённая блок-схема подпрограмм “Marlin1” и “Mgu1”, вызываемых из “MailParser”.	87
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Упрощённая блок-схема подпрограммы “Marlin2”, вызываемой из “MailParser”.	88
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Местоположения, переданные с устройств с GPS-модулем, до кластеризации	90
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Местоположения, переданные с устройств с GPS-модулем, после кластеризации	91
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Местоположения, переданные с устройств без GPS модуля, до кластеризации	92
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Местоположения, переданные с устройств без GPS модуля, после кластеризации	93
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Местоположения после объединения данных и присвоения меткам названий базовых пунктов	94
ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Местоположения, определённые DBSCAN как выбросы.....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ 11. График силуэта (Красной вертикальной линией отмечено максимальное значение).....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Пример фильтрации выбросов в пункте М-2 Делянкир	97
ПРИЛОЖЕНИЕ 13. Метеостанции, на которых проводятся измерения температуры грунта, расположенные в пределах границ вечной мерзлоты.....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ 14. Таблица среднегодовых температур грунта и периодов, за которые имеются данные в свободном доступе	99
ПРИЛОЖЕНИЕ 15. Тепловые карты изменения количества пропусков после фильтрации выбросов, в процентах. По горизонтали откладывается глубина в метрах, по вертикали – название пункта.	102

ПРИЛОЖЕНИЕ 16. Процент глубин, для которых отвергается нулевая гипотеза по критерию Левене.	104
ПРИЛОЖЕНИЕ 17. Таблица процентов пропусков в рядах температуры грунта на различных глубинах	109

ВВЕДЕНИЕ

Вечная (многолетняя) мерзлота — это подземная часть криосферы земли, сохраняющая отрицательные температуры на протяжении длительного периода времени. Исходя из данного определения, многолетнемёрзлые породы слабо зависят от внутригодовой изменчивости температуры поверхности почвы. Данное свойство вечной мерзлоты позволяет использовать её в качестве индикатора климатических изменений т.е. изменений, временные масштабы которых превышают несколько десятков лет.

Помимо текущих изменений в состоянии многолетнемёрзлых пород вследствие изменений климата, вечная мерзлота является источником информации о климатах прошлого, поскольку распространение тепла в почве происходит с существенной задержкой. Согласно законам Фурье, чем глубже, тем больше времени требуется, чтобы грунт изменил свою температуру. Таким образом, мерзлота выступает своего рода естественным фильтром разномасштабных изменений температуры воздуха.

Многолетнемёрзлые породы покрывают около 22% суши в северном полушарии, а в России занимают около 60% всей территории страны. Значительное множество объектов инфраструктуры и жилых сооружений построено на территориях, занимаемых многолетнемёрзлыми породами. Текущие изменения климата приводят к увеличению глубины сезонного протаивания грунтов и как следствие, деградации вечной мерзлоты. С этим процессом связаны существенные риски. Продолжение данной тенденции может привести к повреждению несущих конструкций и даже к обрушению зданий. Учитывая широкое распространение объектов горнодобывающей промышленности на территориях, занятых мерзлотой, а также нескольких городов миллионников, возможный экономический и социальный ущерб, нанесённый вследствие изменений климата в этих районах, может оказаться катастрофическим.

Мониторинг текущих изменений климата и состояния многолетней мерзлоты, а также изучение прошлых изменений, даёт человечеству инструмент, позволяющий упредить последствия, оценить риски и заранее принять меры по минимизации ущерба, тем самым сохранив не только средства и жизни людей, но и зависящую от них политическую стабильность.

Для целей получения информации о состоянии вечной мерзлоты, в 1990-х годах IPA (International Permafrost Association) разработала проект GTN-P (Global Terrestrial Network for Permafrost). В России своя система мониторинга мерзлоты ГСФМ СММ (государственная система фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты) была создана ААНИИ (Арктический и Антарктический Научно-Исследовательский Институт) в 2024 году. Отличительной особенностью ГСФМ СММ является системный подход. Стандартизация методики измерений, равномерное пространственное покрытие и оперативное обслуживание системы, позволяет получать существенно более качественную информацию о состоянии многолетнемёрзлых пород, чем может предоставить GTN-P по территории Российской Федерации.

Первые, более или менее достоверные результаты измерений метеопараметров доступны, в лучшем случае, со второй половины 19 века, а для России - с первой половины 20-го. Учитывая масштабы климатических изменений, а также долю неопределённости в понимании процессов климатической изменчивости, упомянутый период наблюдений во многих случаях оказывается недостаточным для целей исследований и создания прогнозов. Однако эти цели во многом могут быть достигнуты с помощью данных о состоянии многолетнемёрзлых пород, позволяющих косвенно восстанавливать неосвещённые систематическими метеонаблюдениями периоды.

Целью данной работы является оценка возможности использования новых источников информации для выявления влияния климатических изменений на состояние многолетнемёрзлых грунтов.

1. ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТА НА ОСНОВЕ СТАНДАРТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1.1 Анализ текущего состояния стандартных источников информации о температурах грунтов

Проведенный анализ данных о температуре грунта в зоне многолетней мерзлоты России, полученных через систему АИСОРИ с 264 метеорологических станций за период 1963-2023 годов, выявил устойчивую тенденцию к потеплению. Наиболее значительный рост температур отмечен в высокоширотных районах, где на станциях о. Визе и о. Голомянный зафиксировано увеличение температур на 0,18 и 0,16°C/год соответственно на глубине 0,8 метра. В южных районах криолитозоны, таких как Якутск, темпы потепления оказались существенно ниже - 0,03°C/год на глубине 2,4 метра.

Особую тревогу вызывает сокращение количества станций, фиксирующих устойчиво отрицательные температуры грунта за период наблюдений. Существенные ограничения исследования связаны с методикой измерений (однократные суточные замеры), неполнотой данных и проблемами альтернативных источников информации - в 2023 году из 44 российских скважин проекта GTN-R данные были доступны лишь для шести. Полученные результаты убедительно демонстрируют необходимость модернизации системы наблюдений за мерзлотными грунтами, включая внедрение автоматизированных методов измерений и создание единого стандартизированного банка данных, что позволит повысить достоверность прогнозов и лучше понять динамику изменений в криолитозоне в условиях глобального потепления.

1.1.1 Получение данных о температурах почвы, измеренных стандартными средствами

Для работы были использованы массивы данных о суточных температурах грунта, измеренных вытяжными термометрами. Данные получены с использованием веб-технологии АИСОРИ (Автоматизированная Информационная Система Обработки Режимной Информации), разработанной ВНИИГМИ-МЦД (Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Гидрометеорологической Информации – Мировой Центр Данных) [2].

Массив данных о температурах грунта на 264 станциях содержит суточные значения температуры грунта на глубинах до 320 см, полученные на метеорологических станциях Российской Федерации за последние шесть десятилетий. Наблюдения на станциях начинались в разное время, поэтому периоды измерений различаются, при этом самый ранний доступный год в массиве — 1963. Под естественным покровом температура почвы измеряется на глубинах 2, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 120, 160, 240 и 320 см. Основными глубинами наблюдений за температурой грунта под естественной поверхностью (по вытяжным термометрам) являются 20, 40, 80, 160 и 320 см, тогда как дополнительные глубины включают 60 см (прекращены в 1960-х годах), 120 см и 240 см.

Наблюдения на глубинах от 80 до 320 см проводятся ежедневно в течение всего года в срок, ближайший к 14 часам поясного декретного (зимнего) времени. На глубинах 20 и 40 см в тёплую половину года измерения выполняются в единые синхронные сроки, а зимой, при высоте снежного покрова 15 см и более, переходят на однократные суточные замеры в то же время (около 14:00). Возврат к синхронным наблюдениям происходит весной, когда высота снега уменьшается до менее чем 5 см.

Данные предоставляются в необработанном виде, однако они проходили контроль качества и имеют специальный признак, который можно

добавить отдельным столбцом, в качестве дополнительной информации. Первые четыре столбца представляют собой индекс станции, год, месяц и день, остальные двенадцать – температуры на глубинах от 2 до 320 сантиметров. Все значения температур грунта увеличены в 10 раз, пропуски в наблюдениях кодируются четырьмя девятками.

Учитывая текущие климатические изменения, наивно полагать, что стандартные методы наблюдений за температурами грунтов способны обеспечить нас необходимыми данными уже в ближайшем будущем. Предварительный анализ данных в открытом доступе, полученных с помощью системы АЙСОРИ, показал, что количество метеорологических станций в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты, на которых фиксировались стабильно отрицательные температуры, сократилось примерно вдвое. Причиной этого служит не только деградация вечной мерзлоты, но и отсутствие достаточного количества данных. Для 264 станций было оценено текущее количество информации в открытом доступе. Результаты приведены в приложении 18.

Методика измерения температуры грунта на метеостанциях далека от совершенства. Ежедневные наблюдения проводятся раз в сутки, в срок ближайший к 14 часам местного времени при помощи стеклянных, ртутных термометров ТМ-10 [9]. Человеческий фактор, в данном случае, может существенно влиять на качество и количество данных. Наблюдения один раз в сутки также могут оказаться недостаточными для задач, в которых нужно учитывать суточные изменения температуры, а дополнительные измерения температуры на поверхности почвы, далеко не всегда имеют совместный период наблюдений без пропусков, а также имеют необходимость внесения поправки на отсутствие естественного растительного покрова.

Альтернативой метеорологическим данным, позволяющей решить некоторые вышеизложенные проблемы, являются данные проекта GTN-P. Однако в последние годы в России состояние дел с этими данными существенно ухудшилось. Всего в России расположено 44 площадки, где

когда-либо проводились наблюдения за температурами грунта [10]. Из них, данные за 2023 год были только для 6 (см. рисунок 1.1).

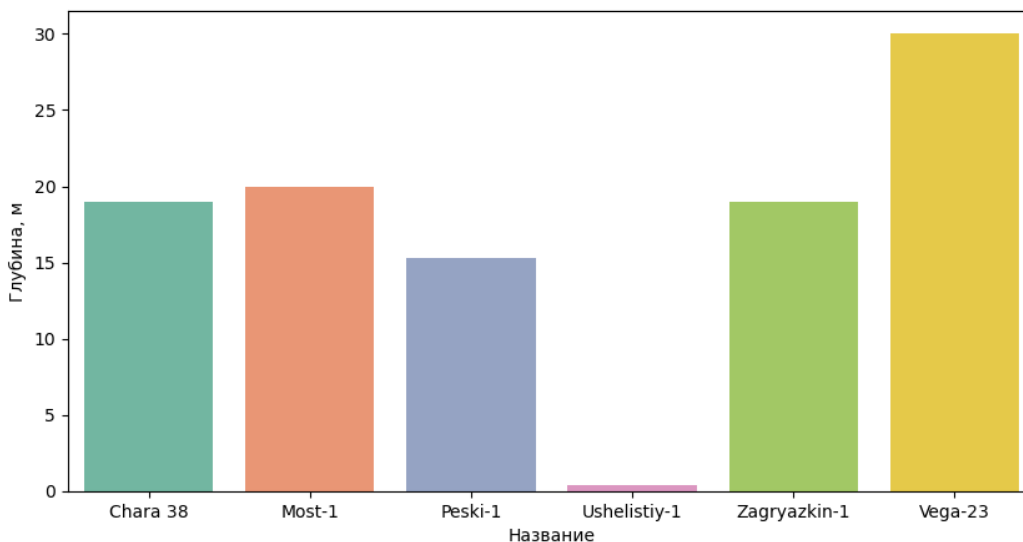


Рисунок 1.1 Скважины проекта GTN-P, для которых есть данные за 2023 год

Помимо прекращения работы множества термометрических скважин проекта, сами измерения не стандартизированы, в отличие от метеорологической сети. Скважины имеют различную глубину, периоды измерений, типы конструкции и т.п. Это связано с особенностями самой идеи проекта, как горизонтальной системы обмена данными между исследователями [1].

1.1.2 Оценка изменений количества информации о температурах грунта на метеостанциях

При помощи geojson.io и тематической карты распространения многолетней мерзлоты [11], был выделен полигон и получен файл с координатами его вершин. При помощи методов python библиотеки [geopandas](https://pandas.pydata.org/), было определено, что из 264 станций, на которых измеряются температуры грунта, около 96 расположены в зоне вечной мерзлоты (см. приложение 13).

Для этих станций были рассчитаны среднемесячные значения температуры. Контроль выбросов производился методом Тьюки, на основе первых разностей среднемесячных значений температуры:

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (1.1)$$

$$Q1 - k * IQR > (x_i - x_{i-1}) > Q3 + k * IQR \quad (1.2)$$

где:

Q1 – 25й квантиль;

Q3 – 75й квантиль;

k – пороговый коэффициент, равный 1.5

В неравенстве 1.2, если значение разности удовлетворяет условию, x_i считается выбросом. Были выбраны станции, где хотя бы на одном из горизонтов, в течении всего года, среднемесячные температуры были отрицательными (см. таблица 1.1). В приложении 14 приведены среднегодовые температуры грунта на разных глубинах для этих станций.

Таблица 1.1 Станции, где в начале временного ряда наблюдались устойчиво отрицательные температуры

Индекс ВМО	Название	Широта	Долгота
20069	О.Визе	79,49	76,98
20087	О.Голомянный	79,55	90,61
20292	Им.Е.К.Федорова	77,71	104,29
20674	О.Диксон	73,51	80,41
21921	Кюсюр	70,68	127,4
23219	Хоседа-Хард	67,08	59,38
23274	Игарка	67,46	86,56
24136	Сухана	68,61	118,33

24143	Джарджан	68,73	124
24266	Верхоянск	67,57	133,4
24343	Жиганск	66,77	123,4
24382	Усть-Мома	66,45	143,23
24507	Тура	64,27	100,22
24606	Кислокан	63,58	103,96
24688	Оймякон	63,25	143,15
24738	Сунтар	62,15	117,65
24790	Сусуман	62,78	148,16
24944	Олекминск	60,4	120,42
24951	Иситель	60,81	125,31
24959	Якутск	62,02	129,72
24966	Усть-Мая	60,38	134,45
25206	Среднеколымск	67,45	153,71
25400	Зырянга	65,73	150,9
25428	Омолон	65,23	160,53
30372	Чара	56,9	118,27
30385	Усть-Нюкжа	56,58	121,48
30469	Калакан	55,11	116,76
30745	Сосново-Озерское	52,53	111,55
30879	Нерчинский 3-д	51,31	119,61

Таким образом, из 96 станций, находящихся в области распространения вечной мерзлоты, только для 29 есть данные, показывающие наличие устойчиво мерзлых грунтов. Причиной тому служит большое количество пропусков. На сегодняшний день, далеко не все данные перенесены в электронный формат, иногда информация теряется, портятся старые записи на аналоговых носителях, при этом оцифровка требует значительных средств и

времени [13]. Помимо прочего, часть данных может предоставляться с существенной задержкой или вовсе быть недоступной для широкой общественности.

Среди полученных данных были выбраны такие, которые имеют временной ряд не менее 30 лет и не более 10% пропусков. Также, если на той или иной глубине встречались пропуски продолжительностью более двух месяцев, дальнейшие расчёты для этой глубины не проводились. Если временной ряд соответствовал всем вышеописанным условиям, оставшиеся пропуски заполнялись при помощи линейной интерполяции.

С использованием метода `linregress` из библиотеки `scipy` были подобраны коэффициенты a_0 и a_1 уравнения линейной регрессии и рассчитан тренд за каждый месяц по следующей формуле:

$$f(x) = a_0 + a_1x \quad (1.3)$$

где:

a_0 – коэффициент сдвига;

a_1 – коэффициент наклона.

Результаты расчётов приведены в таблице 1.2. В первую очередь можно заметить, что количество данных существенно сократилось. Исходя из вышеописанной методики обработки, это могло произойти либо ввиду недостаточной продолжительности временного ряда, либо вследствие большого количества пропусков. Зырянка и Исыть имеют радикально низкий коэффициент корреляции, что вероятно обусловлено неоднородностью временного ряда, поэтому из дальнейшего анализа мы их исключаем. На всех горизонтах наблюдается рост температуры, причём если сравнить эти изменения с широтой (см. таблица 1.1), то в более северных районах температура растёт быстрее, чем в южных. Коэффициент сдвига во всех случаях (кроме мст. Хоседа-Хард) отрицателен. Низкий коэффициент

корреляции у этой станции может указывать на наличие нестационарности, что могло бы объяснить отрицательные среднемесячные температуры в начале временного ряда.

Таблица 1.2 Тренды температуры, рассчитанные за весь временной период по имеющимся данным

Название станции	Глубина, м	dT, °C/год	a ₀	r
Зырянка	3.2	0	-0,01	-0,02
Исить	1.6	-0,01	-2,8	0,1
Нерчинский з-д	3.2	0,04	-0,99	0,8
О.Визе	0.8	0,18	-13,12	0,74
О.Голомянный	0.8	0,16	-14,05	0,68
О.Голомянный	1.2	0,15	-13,82	0,67
Среднеколымск	1.6	0,08	-2,99	0,61
Сунтар	1.2	0,06	-1,14	0,51
Усть-Мая	2.4	0,02	-1	0,66
Хоседа-Хард	1.6	0,05	0,2	0,44
Якутск	2.4	0,03	-1,17	0,65
Якутск	3.2	0,02	-1,27	0,77

1.2 Оценка климатических изменений температуры почвы, полученной стандартными методами измерений на глубине 3.2 метра

Оценка климатических изменений температуры почвы на глубине 3,2 м позволяет оценить и климатические изменения в многолетней мерзлоте. Так, если температура на этой глубине растет, то следует ожидать оттаивания многолетней мерзлоты, залегающей на этом уровне или ниже.

Для оценки климатических изменений была применена методика статистического моделирования, включающая анализ линейных трендов и

ступенчатых изменений средних значений. Результаты показали, что коэффициент B_0 , характеризующий среднегодовую температуру, демонстрирует устойчивый рост во всех исследуемых пунктах. Наибольшие изменения зафиксированы в Верхоянске, Якутске и Кош-Агаче. Коэффициент B_1 , отражающий амплитуду внутригодовых колебаний, в большинстве случаев уменьшается, что свидетельствует о сглаживании сезонных колебаний температур. Параметр S_ε , характеризующий изменчивость внутригодовых процессов, в основном остаётся стационарным.

Анализ среднемесячных температур выявил, что в Верхоянске, несмотря на значительный рост температур (до $3,7^\circ\text{C}$ в зимние месяцы), значения остаются отрицательными. В Якутске положительные температуры теперь наблюдаются с сентября по ноябрь, тогда как ранее они отсутствовали. В Олекминске и Кош-Агаче период с положительными температурами увеличился до 6 месяцев в году. Эти изменения указывают на прогрессирующую деградацию многолетней мерзлоты, особенно в южных районах криолитозоны.

Полученные результаты подчёркивают необходимость модернизации системы мониторинга, включая расширение глубины измерений для точного определения границы деятельного слоя. Это особенно важно для строительства и эксплуатации сооружений в условиях изменяющегося климата, так как устойчивость фундаментов напрямую зависит от термического состояния мерзлых грунтов.

1.2.1 Методика оценки климатических изменений в многолетних рядах

Основная задача состоит в наиболее корректной оценке климатических изменений средних значений температур воздуха во времени, что зависит от выбранной модели временного ряда. Так, если модель является трендом, то количественная оценка изменения рассчитывается как разность между значениями в последний и первый год аппроксимации по уравнению тренда

($\Delta T_{\text{тр}} = T_n - T_1$). Если же выбрана модель ступенчатых переходов от одного стационарного среднего к другому, то изменения среднего значения в этом случае будут рассчитаны как $\Delta T_{\text{ст}} = T_{\text{ср2}} - T_{\text{ср1}}$, где $T_{\text{ср1}}$, $T_{\text{ср2}}$ — средние значения до и после года резкого изменения среднего. Очевидно, что вычисленные изменения температуры $\Delta T_{\text{тр}}$ и $\Delta T_{\text{ст}}$ будут отличаться и, как правило, $\Delta T_{\text{тр}}$ по абсолютной величине будет больше, чем $\Delta T_{\text{ст}}$. Поэтому, чтобы правильнее определить количественные изменения температуры, прежде всего, следует оценить какая из моделей наиболее соответствует временному ряду. Для этой цели разработана методика по оценке эффективности моделей нестационарного среднего и выборе наиболее подходящей из них, основанная на сравнении остаточных дисперсий моделей. Алгоритм реализации этой методики в данном исследовании состоит в следующем:

- временной ряд аппроксимируется моделями нестационарного среднего двух типов: линейный тренд и модель ступенчатых переходов от одного стационарного среднего к другому, и определяется год такого перехода (также использовалась модель гармонических изменений);
- оценивается эффективность каждой из двух моделей по отношению к модели стационарного среднего на основе сравнения стандартов и дисперсий остатков.

В качестве меры отличия нестационарной модели от модели стационарного среднего (показатель нестационарности) можно рассмотреть относительные отклонения в %:

$$\Delta_{\text{ТР}} = \left(\frac{\sigma_Y - \sigma_Z}{\sigma_Y} \right) 100\% \quad (1.4)$$

где:

σ_Y — среднеквадратическое или стандартное отклонение (СКО) исходного ряда (модель стационарного среднего);

σ_Z – стандартное отклонение остатков относительно модели нестационарного среднего.

Для оценки статистической значимости моделей нестационарного среднего по отношению к модели стационарной выборки (стационарного среднего) применяется критерий Фишера:

$$F_{TP} = \frac{\sigma_Y^2}{\sigma_Z^2} \quad (1.5)$$

В числителе уравнения (1.5) всегда будет дисперсия исходного ряда наблюдений, так как она является наибольшей или, по крайней мере, равна остаточной дисперсии конкурирующей модели.

По связанным между собой зависимостям (1.4) и (1.5), как показано в работе [14], прежде всего определяется статистическая эффективность моделей нестационарного среднего по отношению к модели стационарного среднего, и затем при их эффективности затем оценивается какая из моделей (линейного тренда или ступенчатого изменения среднего значения) лучше соответствует изменению среднего временного ряда:

- если модель нестационарного среднего эффективнее модели стационарного среднего, то оценивается устойчивость этого вывода во времени путем задания разных лет начала ряда;
- в случае эффективности и устойчивости обеих моделей нестационарного среднего оценивается какая из этих моделей эффективнее также по сравнению стандартов и дисперсий остатков;
- если модели по эффективности не различаются, то рассчитывается среднее из двух полученных изменений ΔT_{TP} и ΔT_{CT} ;
- если же одна из моделей статистически эффективнее другой, то изменения определяются по этой модели;

- определяется вклад полученных климатических изменений среднего по отношению к естественной изменчивости, т.е. СКО ($\Delta T/\text{СКО}$) и, если $\Delta T/\text{СКО}$ превышает 1 или 2, то изменения статистически значимы соответственно с вероятностью $P = 68 \%$ (одно-сигмовый доверительный интервал) и $P = 95 \%$ (двух-сигмовый доверительный интервал);
- для оценки статистической значимости различий двух средних значений помимо сравнения с СКО применяется также оценка стационарности средних по критерию Стьюдента.

Данная методика была применена как к многолетним рядам среднемесячных температур почвы на глубинах «вечной» мерзлоты в 3.2м, так и для многолетних рядов параметров сезонной (внутригодовой) функции.

Линейная статистическая модель внутригодовых колебаний представляет собой уравнение простой линейной регрессии, связывающее внутригодовые изменения каждого года (Y_{ij}) и климатическую (многолетнюю) функцию внутригодовых колебаний (Y_{cpi}):

$$Y_{ij} = B_{1j} * Y_{cpi} + B_{0j}, \pm \varepsilon_{ij} \quad (1.6)$$

где:

Y_{ij} - матрица исходных наблюдений,

i – номер месяца (или дня) внутри года,

j – номер года;

Y_{cpi} - средняя многолетняя функция годового хода;

B_{1j} - коэффициент, характеризующий отличие амплитуды j -го годового хода от амплитуды среднего многолетнего годового хода;

ε_{ij} - отклонения от линии связи конкретных и многолетних условий, характеризующие составляющие композиционного процесса, масштаб которых меньше годового и могут быть представлены в виде их

обобщенного показателя – стандартного отклонения (S_{ej}), характеризующего интенсивность таких процессов для j -го года.

Результатами моделирования внутригодовых колебаний являются графики по нескольким станциям:

- внутригодовой климатической функции;
- связи между данными конкретных лет и климатической функцией;
- многолетние ряды рассчитанных коэффициентов B_{1j} , B_{0j} и параметра S_{ej} .

Приведенная модель внутригодовых изменений применялась для аппроксимации среднемесячных температур почвы.

1.2.2 Оценка климатических изменений параметров модели внутригодовых колебаний температуры почвы на глубине 3.2 м

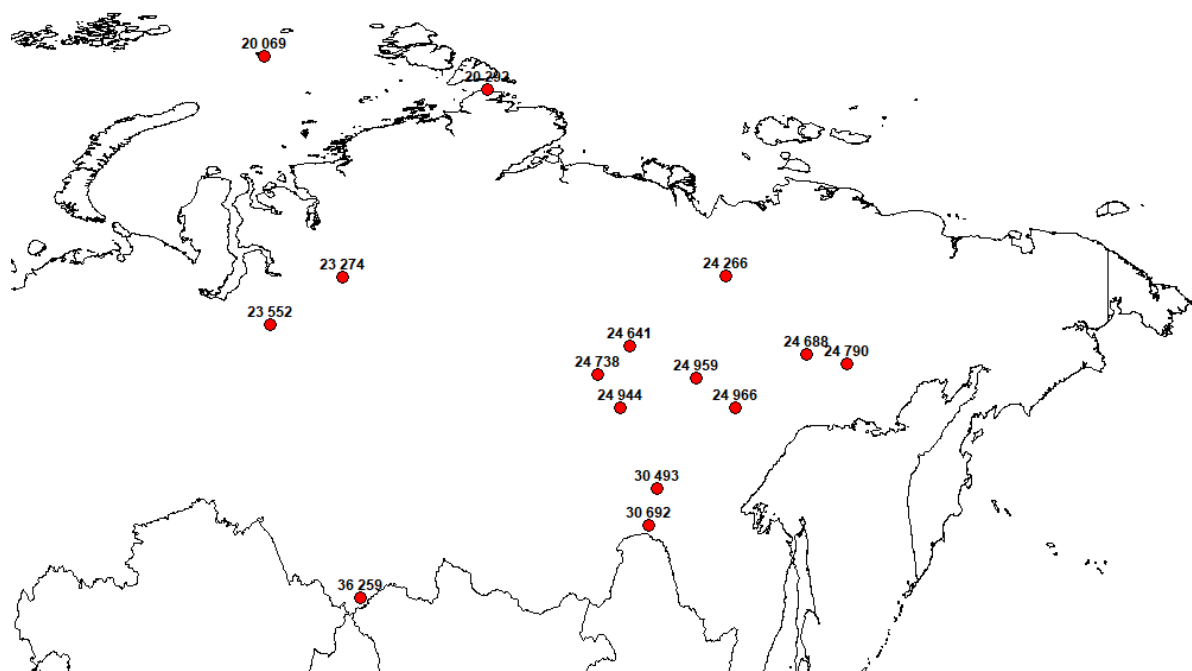


Рис.1.2. Карта расположения пунктов стандартных наблюдений и совмещенных с ними пунктов с новыми приборами.

В табл.1.3 даны результаты моделирования временных рядов параметров B_{1j} , B_{0j} и S_{ej} для температуры почвы на глубине 3.2м для разных метеостанций.

Таблица 1.3 Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов B_{1j} , B_{0j} и S_{ej}

24266 ОГМС Верхоянск									
	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	$F_{тр}$	$F_{ст}$	$T_{ст}$	$T_{нач}$	$T_{к}$	n	$R_{тр}$
B_{1j}	5.1	16.8	1.11	1.44	2011	1967	2021	50	-0.32
B_{0j}	20.4	47.0	1.58	3.56	2004	1967	2021	50	0.61
S_{ej}	2.1	9.7	1.04	1.23	2004	1967	2023	51	0.20
24641 АЭ Вилуйск									
	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	$F_{тр}$	$F_{ст}$	$T_{ст}$	$T_{нач}$	$T_{к}$	n	$R_{тр}$
B_{1j}	8,7	26,4	1,20	1,85	1974	1964	2023	58	-0,41
B_{0j}	0,6	7,3	1,01	1,16	1974	1964	2023	58	0,11
S_{ej}	1,1	2,6	1,02	1,05	2005	1964	2023	58	-0,15
24944 АМСГ-3 Олекминск									
	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	$F_{тр}$	$F_{ст}$	$T_{ст}$	$T_{нач}$	$T_{к}$	n	$R_{тр}$
B_{1j}	2.1	17.5	1.04	1.47	1994	1964	2008	39	-0.20
B_{0j}	12.4	33.3	1.30	2.25	1978	1964	2008	39	0.48
S_{ej}	5.1	15.5	1.11	1.40	1996	1964	2008	39	-0.32
24959 ОГМС Якутск									
	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	$F_{тр}$	$F_{ст}$	$T_{ст}$	$T_{нач}$	$T_{к}$	n	$R_{тр}$
B_{1j}	6.3	29.8	1.14	2.03	2011	1965	2023	52	0.35
B_{0j}	20.4	47.3	1.58	3.60	2011	1965	2023	52	0.61
S_{ej}	4.7	18.7	1.10	1.51	2011	1965	2023	52	0.30

36259 М-2 Кош-Агач									
	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	$F_{тр}$	$F_{ст}$	$T_{ст}$	$T_{нач}$	$T_{к}$	n	$R_{тр}$
B_{1j}	3.4	12.5	1.07	1.31	2008	1963	2023	58	0.26
B_{0j}	45.8	35.8	3.40	2.43	1989	1963	2023	59	0.84
$S_{\varepsilon j}$	2.7	10.1	1.06	1.24	1976	1963	2023	58	-0.23

Полученные многолетние ряды параметров модели внутригодовых колебаний для температуры почвы на глубине 3.2м для метеостанции Верхоянск приведены на рис.1.3. Из аппроксимации временных рядов моделями нестационарного среднего (табл.1.3) следует, что коэффициент B_1 , характеризующий амплитуду внутригодовой функции уменьшается. Начиная с 2011 г., что свидетельствует видимо о росте зимних температур и изменении летних. Коэффициент B_0 имеет существенный рост с конца 20-го и особенно, начала 21-го века, что свидетельствует о росте среднегодовой температуры почвы на глубине 3.2м. Параметр S_{ε} , характеризующий внутригодовую изменчивость температуры почвы, хотя и стационарен, но имеет существенное увеличение дисперсии с начала 21-го века. Это может быть связано с ростом неустойчивости процессов внутригодовой изменчивости.



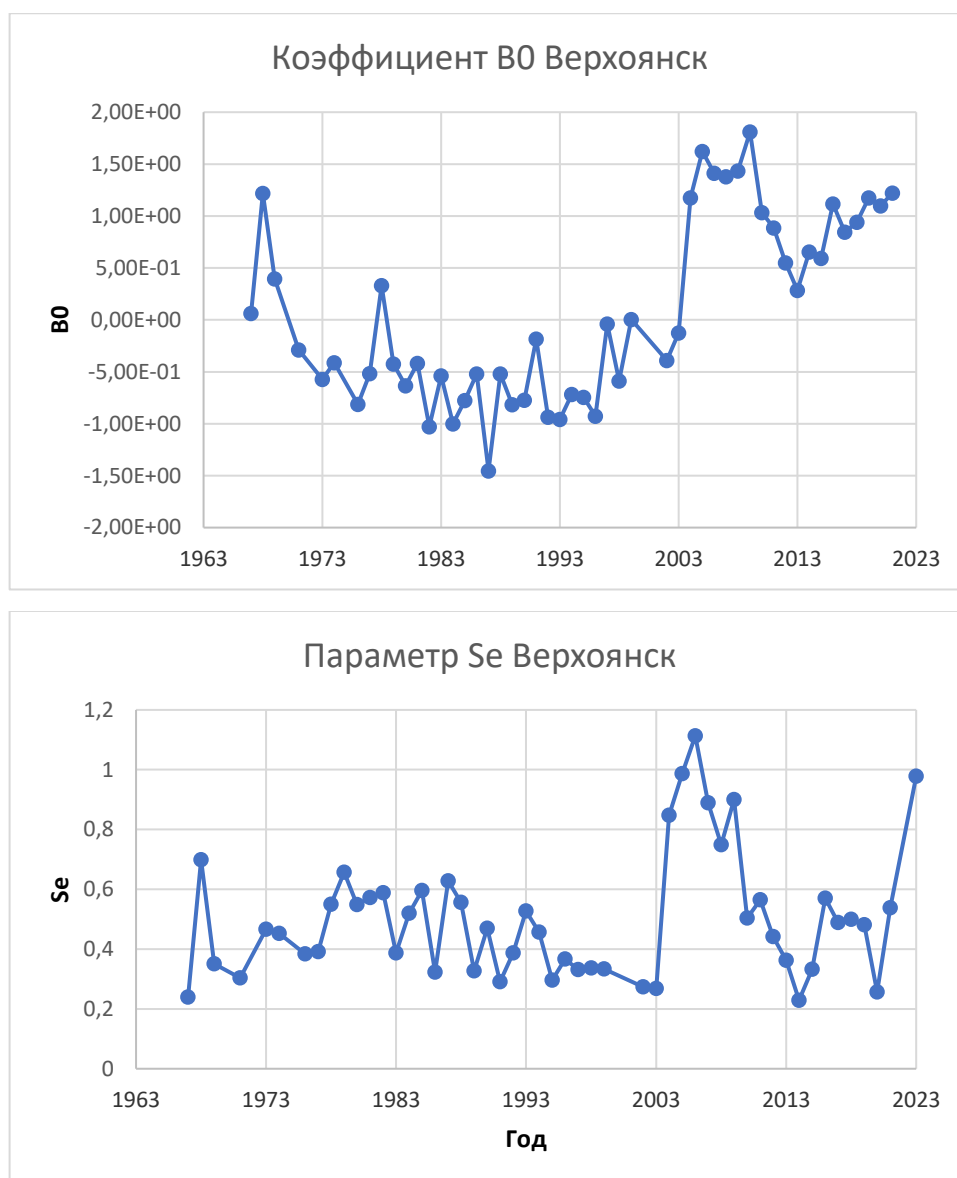


Рисунок 1.3. Многолетние ряды параметров модели внутригодовых колебаний (Верхоянск, температура почвы на глубине 3.2 м)

Результаты оценки стационарности временных рядов параметров внутригодовой модели колебаний температуры почвы на метеостанции Вилуйск приведены в табл.1.3 и на рис.1.3 и свидетельствуют о практическом отсутствии изменений среднего временных рядов. Есть только резкое уменьшение коэффициента B_1 в начале 1970х, что может быть обусловлено неоднородностью наблюдений, связанной со сменой приборов, методики, места измерений.

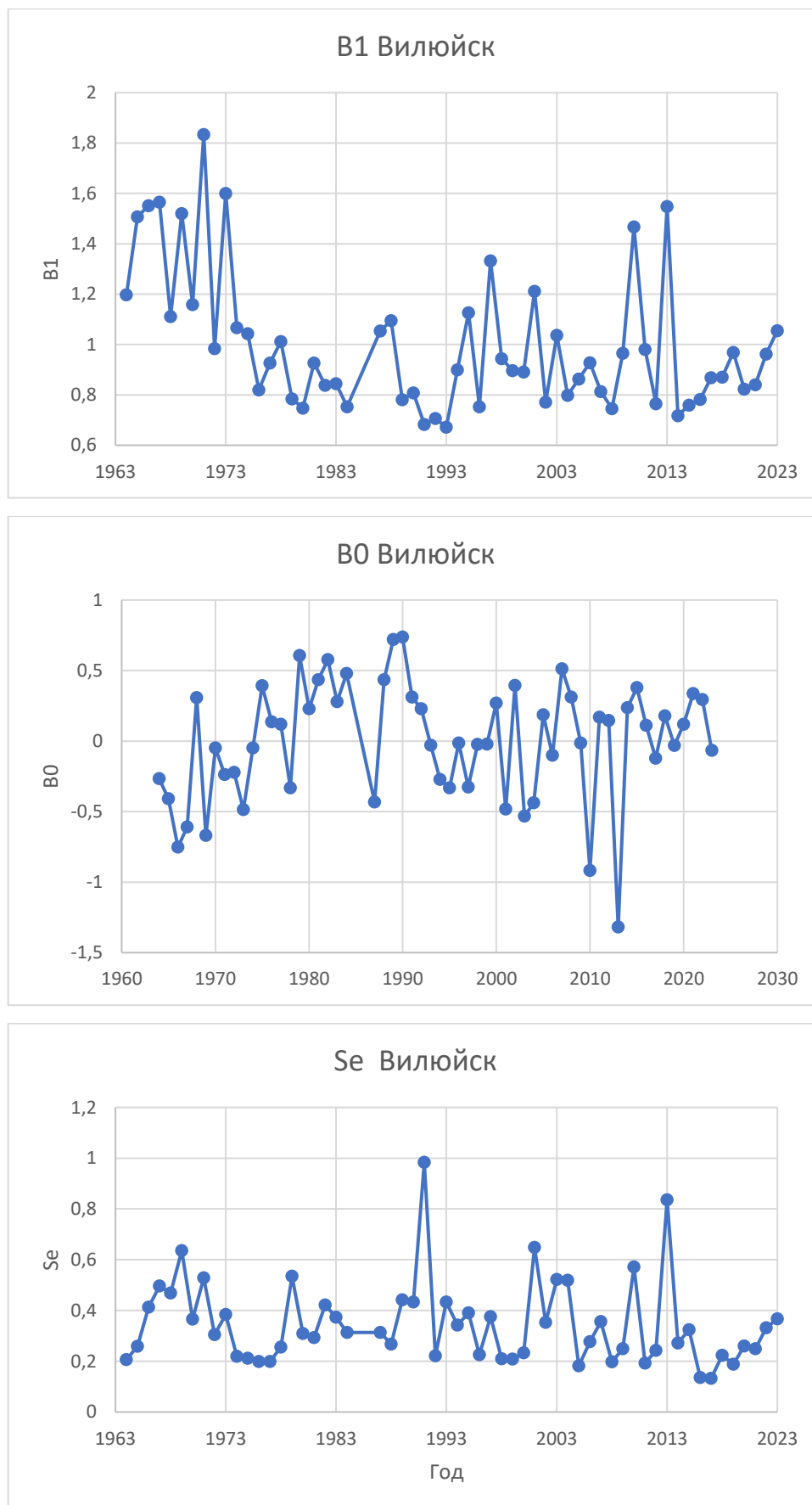


Рисунок 1.4. Многолетние ряды параметров модели внутригодовых колебаний (Виллюйск, температура почвы на глубине 3.2 м)

Вместе с тем между коэффициентами B_1 и B_0 имеет место достаточно надежная обратная связь с коэффициентом корреляции $R=0.72$ как показано на рис.1.5:

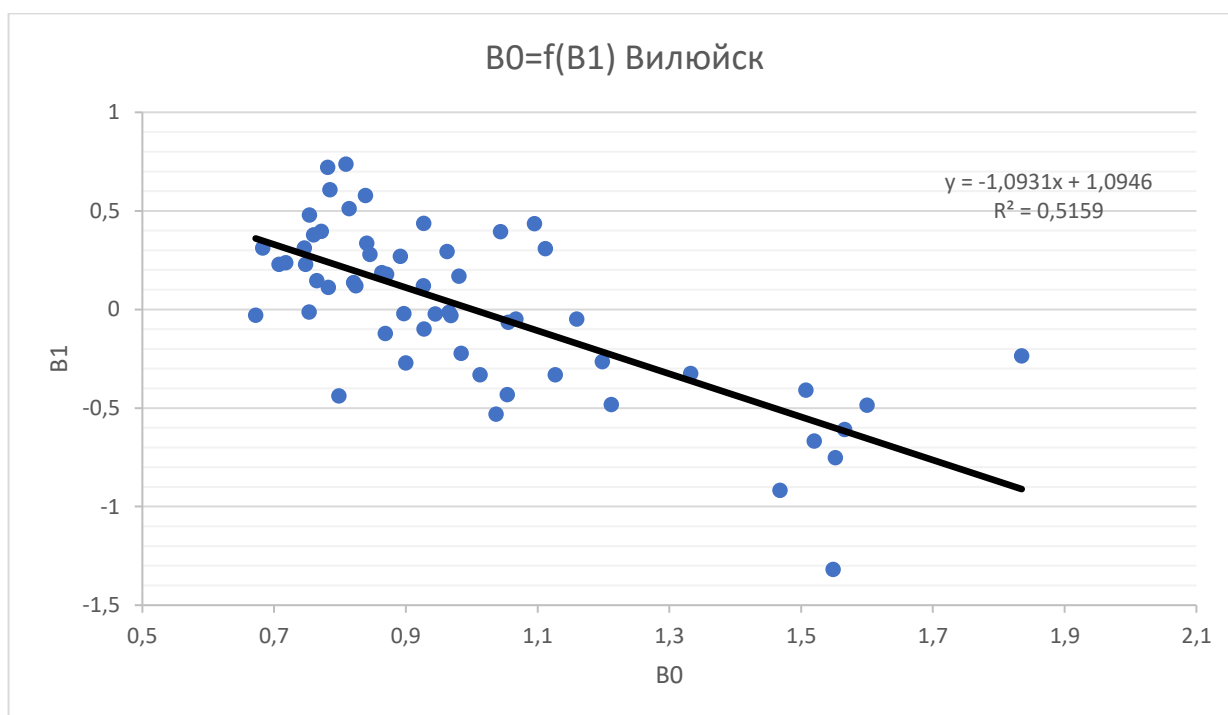


Рис.1.5. Взаимосвязь между коэффициентами B_0 и B_1 для метеостанции Вилуйск.

Параметры модели внутригодовых колебаний для метеостанции Олекминск приведены на рис.2.6, а оценка стационарности многолетних рядов этих параметров в табл.1.3. В связи с тем, что наблюдения ограничены 2008 г. можно говорить только о большой изменчивости рядов. Так коэффициент B_1 резко уменьшился с 1994 г., коэффициент B_0 резко вырос с 1978 г., а параметр Se резко уменьшился с 1996 г.

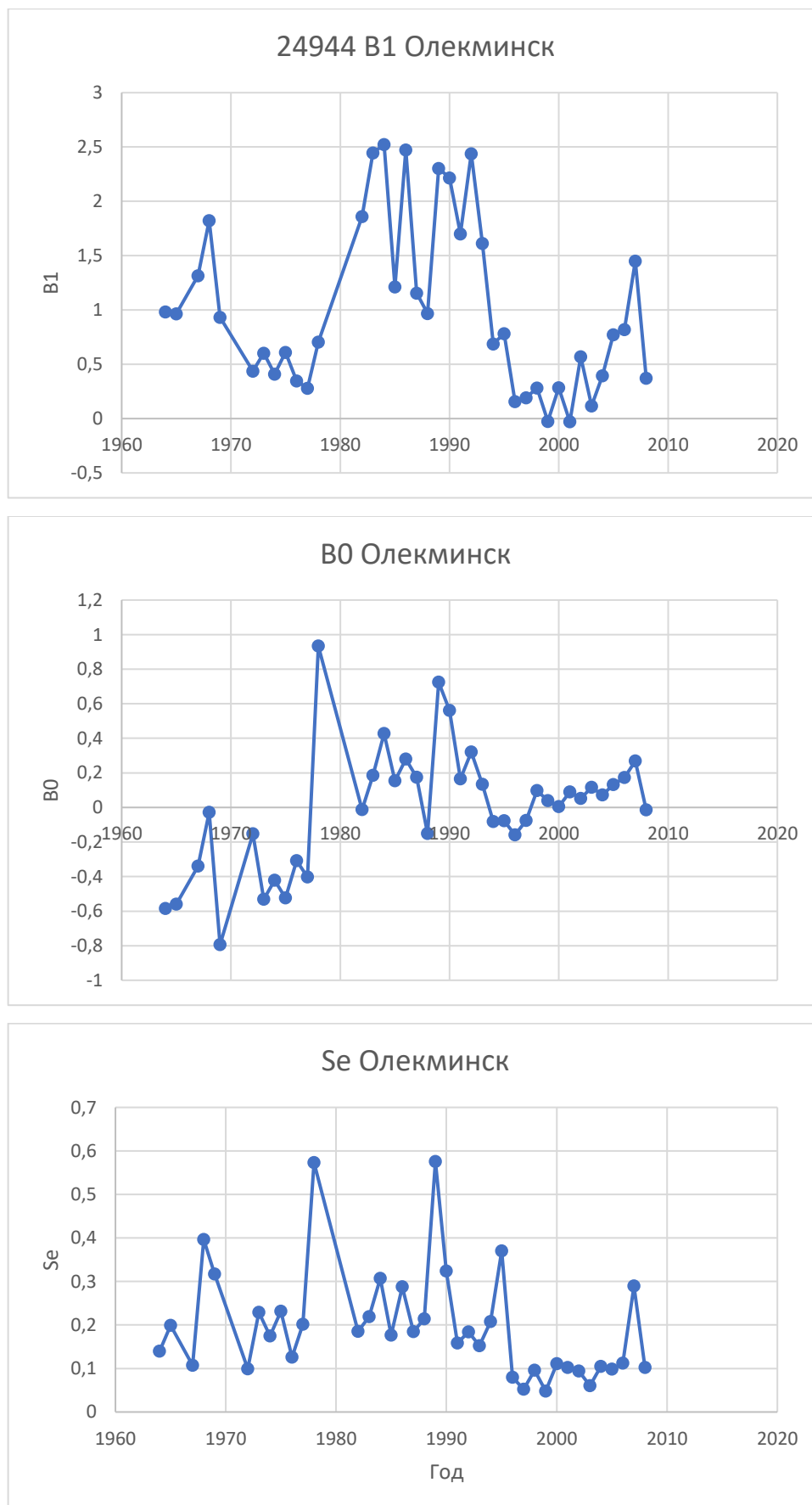


Рисунок 1.6. Многолетние ряды параметров модели внутригодовых колебаний (Олекминск, температура почвы на глубине 3.2 м)

Аналогичные полученные параметры внутригодовой модели для метеостанции Якутск приведены на рис.1.6, а оценка эффективности нестационарных моделей – в табл.1.3. Как следует из графиков и результатов моделирования многолетних рядов, все параметры имеют резкий рост с 2011 г. Также коэффициенты B_1 и B_0 хорошо связаны между собой прямой зависимостью с достаточно высоким коэффициентом корреляции $R=0,94$ (рис.1.6).

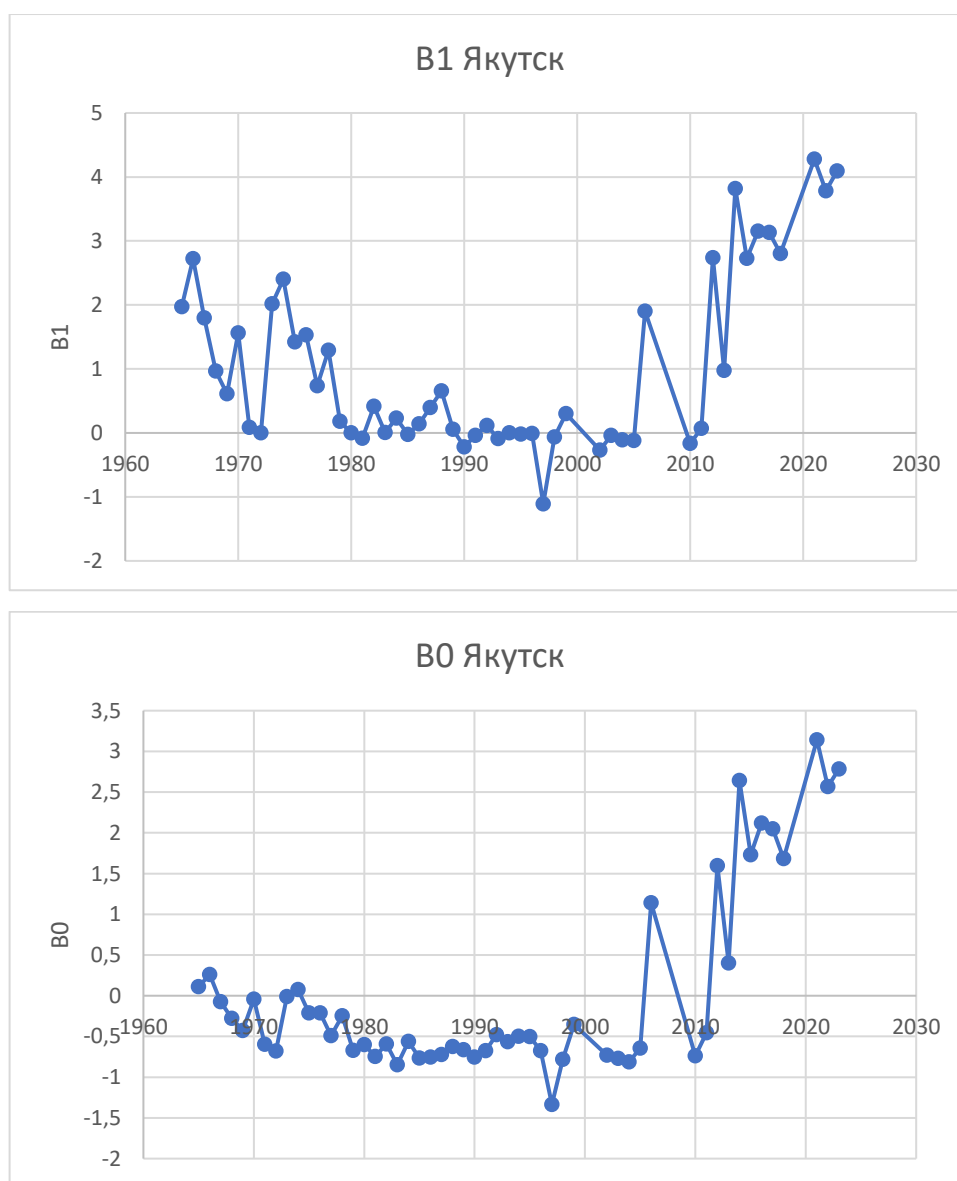




Рисунок 1.7. Многолетние ряды параметров модели внутригодовых колебаний (Якутск, температура почвы на глубине 3.2 м)

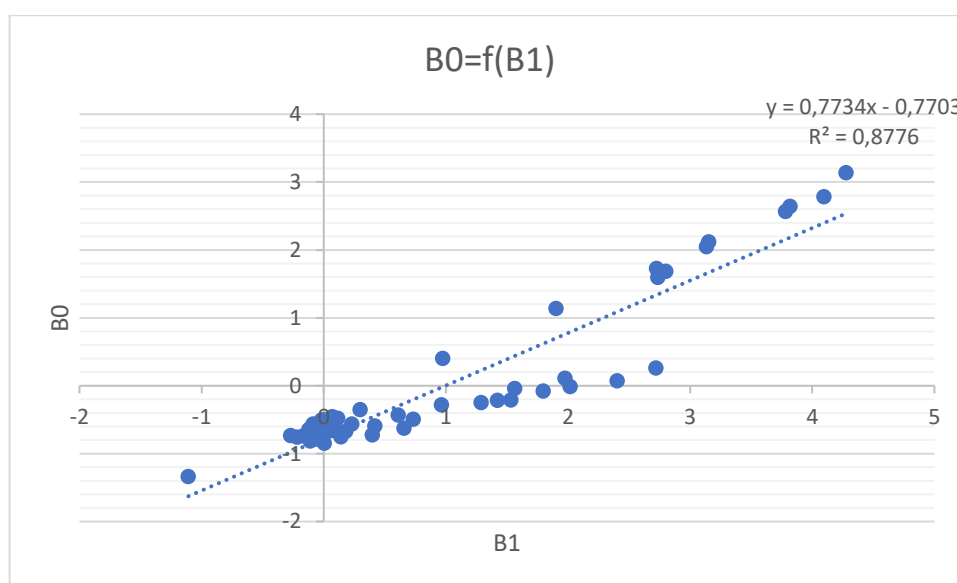
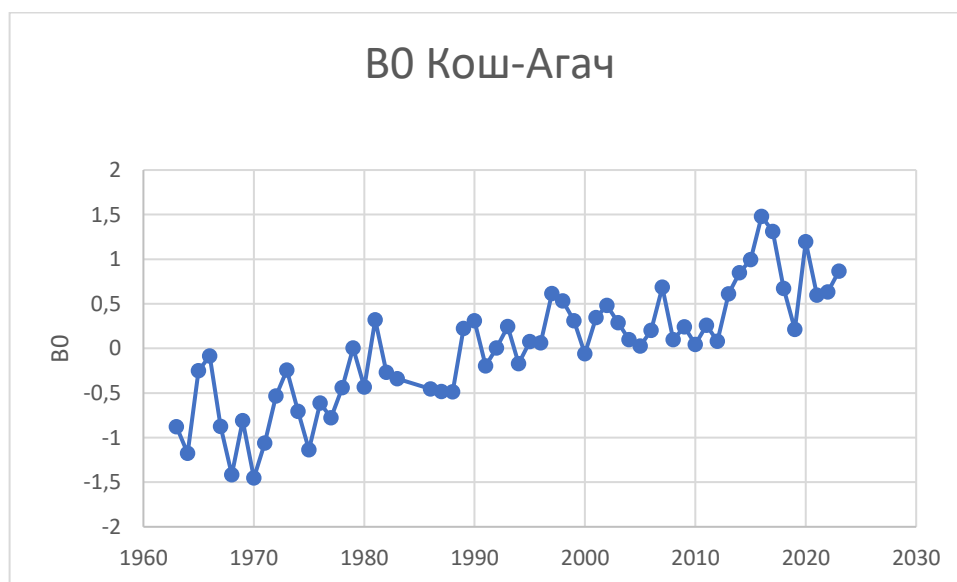
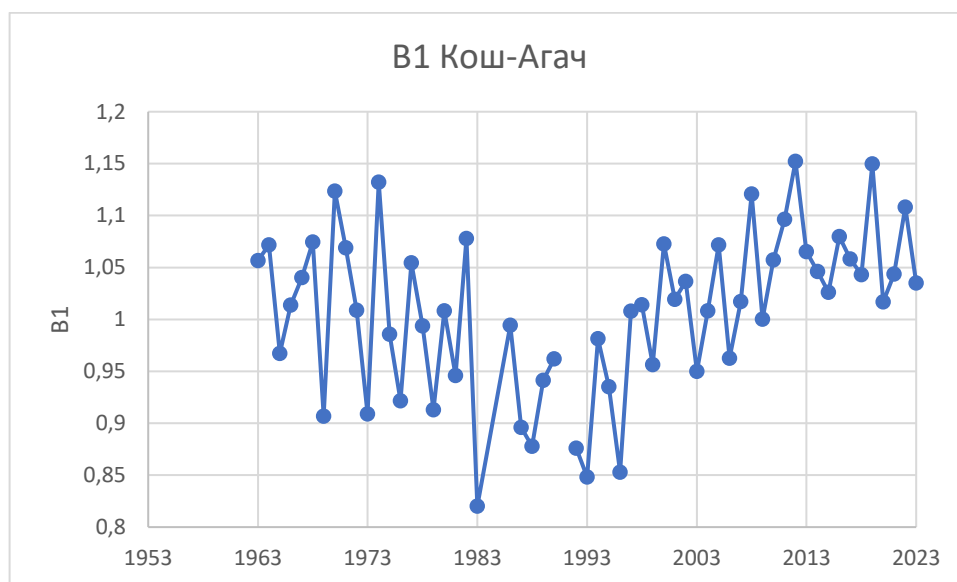


Рисунок 1.8. Взаимосвязь между коэффициентами B_0 и B_1 для метеостанции Якутск.

Для метеостанции 36259 М-2 Кош-Агач многолетние ряды рассчитанных параметров модели внутригодовых изменений температуры почвы на глубине 3.2м приведены на рис.1.8, а результаты аппроксимации временных рядов моделями нестационарного среднего – в табл.1.3. Из таблицы и графиков следует, что наибольшие изменений в виде монотонного

роста имеют место в коэффициенте B_0 , связанным со среднегодовой температурой. Некоторая тенденция роста имела место и в коэффициенте B_1 с середины 1990х, но в настоящее время тенденция коэффициента B_1 перешла в стационарный режим. Также не наблюдается направленных тенденций и в параметре S_e .



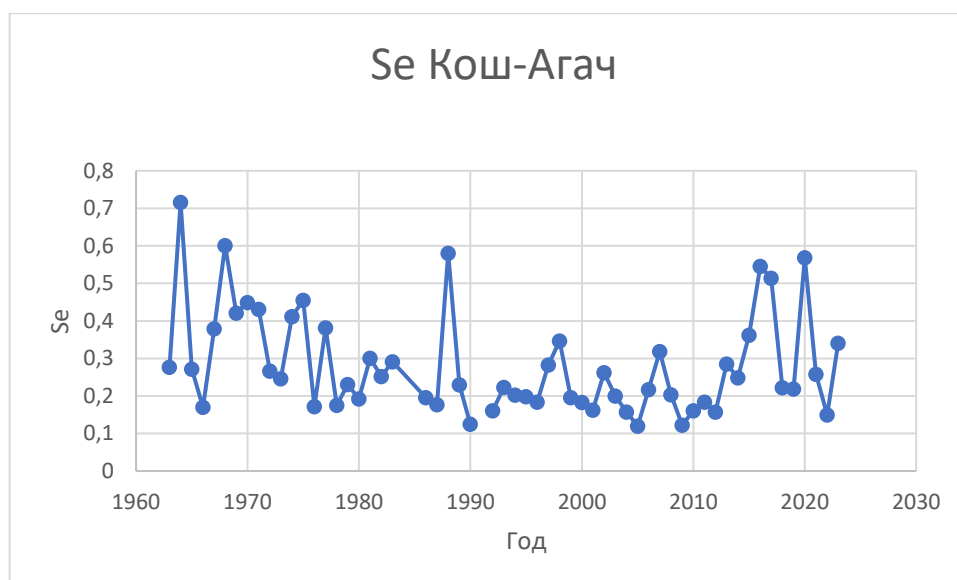


Рисунок 1.9. Многолетние ряды параметров модели внутригодовых колебаний (Кош-Агач, температура почвы на глубине 3.2 м)

В результате проведенного статистического моделирования внутригодовых изменений температуры почвы на глубине 3.2м в 5 пунктах с наиболее продолжительными рядами наблюдений получены следующие закономерности многолетних рядов параметров модели:

1) Коэффициент B_0 , который связан со среднегодовой температурой, во всех случаях имеет тенденцию роста. Причем наибольшие его изменения наблюдаются в Верхоянске, Якутске и Кош-Агаче, а наименьшие в Вилуйске.

2) Коэффициент B_1 , связанный с амплитудой внутригодовой функции, в 3х случаях (Верхоянск, Вилуйск, Олекминск) уменьшается, а в 2х – растет (Якутск, Кош-Агач).

3) Параметр S_e , характеризующий изменчивость процессов внутригодового масштаба, практически остается стационарным, но в Якутске имеет место его рост, а в Олекминске – уменьшение.

Поэтому можно считать, что во всех случаях только B_0 имеет тенденцию к росту, что связано с ростом среднегодовой температуры, а другие параметры внутригодовой функции имеют или разную тенденцию изменений

в разных пунктах (коэффициент B_1) или практически стационарны (параметр S_e).

1.2.3. Оценка климатических изменений среднемесячной температуры почвы на глубине 3.2 м

В связи с тем, что в многолетних рядах параметров сезонной (внутригодовой) функции имеет место нестационарность, которая наибольшим образом проявляется в росте коэффициента B_0 , следует определить в какие месяцы температура почвы также является нестационарной и насколько она приближается или уже перешла отметку в 0°C .

Для этой цели было осуществлено статистическое моделирование многолетних рядов каждого месяца и для всех 5 метеостанций в соответствии с разработанной методикой, которая состоит в следующем.

Результаты аппроксимации временных рядов моделями тренда и ступенчатых изменений приведены в табл.1.4, где:

$\Delta_{тр}\%$ - относительное отличие модели тренда от стационарной модели в %;

$\Delta_{ст}\%$ - относительное отличие модели ступенчатых изменений среднего от стационарной модели в %;

R – коэффициент корреляции температуры со временем;

Год ст – год перехода от одних стационарных условий к другим;

$\Delta T^\circ\text{C}$ - изменение средней температуры за период в $^\circ\text{C}$;

$\Delta T/\text{СКО}$ - изменение средней температуры за период в долях СКО;

$T_{ср1}$ – средняя температура первой половины ряда в $^\circ\text{C}$;

$T_{ср2}$ – средняя температура второй половины ряда в $^\circ\text{C}$.

В табл.1.4 жирным шрифтом выделены статистически значимые и эффективные значения. Также жирным шрифтом выделены случаи, когда

средняя температура перешла через 0°C, что связано с таянием многолетней мерзлоты.

Таблица 1.4 Показатели нестационарных моделей и изменений температуры почвы за многолетний период на глубине 3,2 м

код	месяц	$\Delta T_p\%$	$\Delta T_c\%$	R	Год ст	$\Delta T^\circ\text{C}$	$\Delta T/\text{CKO}$	T_{cp1}	T_{cp2}
24266	1	28,3	45,7	0,70	2005	3,5	1,77	-8,9	-6,5
	2	24.0	29.6	0.65	2006	3.5	1.65	-10.9	-8.8
	3	20.2	33.3	0.60	2012	3.2	1.77	-12.2	-10.7
	4	0.5	2.4	0.10	2007	1.6	0.25	-11.6	-11.3
	5	22.8	36.4	0.64	2007	2.4	1.63	-11.1	-9.6
	6	23.7	40.7	0.65	2005	2.1	1.72	-8.5	-7.3
	7	22.9	40.3	0.64	2005	1.7	1.72	-6.0	-5.1
	8	24.7	44.7	0.66	2005	1.3	1.78	-4.3	-3.6
	9	30.2	48.3	0.72	2005	1.2	1.84	-3.5	-2.7
	10	31.0	49.0	0.72	2004	1.2	1.81	-3.1	-2.3
	11	27.8	46.1	0.69	2004	1.9	1.76	-3.8	-2.4
	12	31.1	51.8	0.72	2004	3.7	1.84	-6.3	-3.6
24641	1	2,1	11,9	0,21	1975	0,2	1,21	0	0
	2	1.6	9.1	0.18	1974	0	0	-0.6	-0.6
	3	2.4	10.8	0.22	1974	1.3	1.18	-2.0	-2.0
	4	2.6	13.4	0.23	1975	1.5	1.27	-2.8	-2.9
	5	3.8	23.1	0.27	1975	1.7	1.69	-1.1	-1.0
	6	12.7	37.7	0.49	1974	0.7	2.08	-0.3	0.0
	7	6.6	13.7	0.36	1975	0.1	1.29	0.0	0.1
	8	4.3	10.2	-0.29	1976	-0.7	1.12	1.4	1.0

	9	4.8	9.5	-0.31	1992	-0.4	0.66	2.7	2.3
	10	10.8	17.8	-0.45	1992	-0.50	1.13	2.2	1.8
	11	3.7	12.8	-0.27	1994	-0.3	0.97	0.9	0.7
	12	0.1	8.8	0.04	1974	0.1	0.40	0.2	0.2
24944	1	2,8	14,7	0,23	1983	0,4	1,09	0,3	0,4
	2	2.8	14.7	0.23	1983	0.4	1.09	0.1	0.3
	3	17.8	31.8	0.57	1976	0.3	1.64	-0.1	0.1
	4	16.1	29.6	0.54	1978	0.6	1.53	-0.3	0.0
	5	17.7	32.5	0.57	1978	0.7	1.61	-0.4	0.0
	6	17.3	33.0	0.56	1978	0.7	1.61	-0.4	-0.1
	7	15.4	30.4	0.53	1978	0.6	1.53	-0.4	0.0
	8	5.7	17.3	0.33	1978	0.6	1.23	-0.1	0.2
	9	0.4	9.2	0.09	1978	0.1	0.10	0.6	0.7
	10	0.3	12	0.08	1978	1.1	1.04	1.1	1.1
	11	0.3	12.4	0.08	1978	0.9	1.05	0.8	0.8
	12	1.5	13.7	0.18	1981	0.6	1.07	0.3	0.5
24959	1	36,3	39,5	0,55	2007	0,7	1,87	-0,4	0,3
	2	35.9	41.0	0.77	2006	0.5	2.15	-0.7	-0.4
	3	31.9	23.3	0.73	1990	0.6	2.18	-0.4	0.3
	4	28.7	33.2	0.70	1979	0.9	1.69	-1.1	-0.5
	5	33.0	39.0	0.74	1979	1.2	1.92	-1.2	-0.5
	6	32.7	36.8	0.74	1979	1.1	1.92	-1.2	-0.5
	7	35.2	36.0	0.76	1989	0.9	1.92	-1.1	-0.5
	8	37.7	28.6	0.78	1991	1.2	2.23	-1.0	-0.4
	9	35.5	36.4	0.76	2006	1.8	1.95	-1.0	0
	10	35.9	52.5	0.77	2012	2.4	2.21	-0.9	0.4

	11	33.8	44.4	0.75	2011	1.5	2.06	-0.8	0.1
	12	35.3	47.5	0.76	2012	1.0	2.14	-0.7	-0.2
36259	1	32,6	23,1	0,74	1988	0,6	2,65	-0,1	0,3
	2	21.2	26.8	0.62	1979	1.5	1.79	-1.9	-1.2
	3	26.0	28.0	0.67	1979	1.8	2.00	-3.8	-2.8
	4	30.8	31.7	0.72	1989	1.7	1.75	-3.7	-2.7
	5	38.1	37.9	0.79	1989	1.4	1.99	-1.2	-0.5
	6	44.5	41.2	0.83	1989	0.9	2.00	-1.1	-0.5
	7	42.3	34.2	0.82	1997	1.6	2.57	-0.3	0.5
	8	34.4	35.1	0.75	1997	2.2	1.91	1.3	2.9
	9	25.1	30.1	0.66	1997	2.1	1.89	3.0	4.5
	10	45.5	37.3	0.84	1997	2.4	2.50	3.4	4.6
	11	46.6	34.6	0.85	1989	2.3	2.57	2.0	3.2
	12	46.8	33.4	0.85	1997	1.3	2.68	-0.5	2.1

Из данных табл.1.4 можно сделать следующие выводы:

- Рост температуры почвы на глубине 3.2 м имеет место на всех станциях и практически во все месяцы года. Внутригодовой максимум температуры на этой глубине в октябре – декабре, а минимум – в марте – мае, т.е. имеет место сдвиг годового максимума по сравнению с температурой воздуха на 3-5 месяцев;

- на метеостанции 24266 Верхоянск температура выросла за рассматриваемый период от 1,2 – 1,3°C в августе – октябре до 3,5-3,7°C в декабре – феврале, но пока не перешла отметку в 0°C, хотя в октябре и ноябре уже поднялась в среднем до -2,3 - -2.4°C.

- на метеостанции 24641 Виллойск наиболее существенный рост температуры произошел в мае - на 1,7°C, но в августе – ноябре имело место падение температуры до 0,5-0,7°C. Мерзлота на метеостанции Виллойск на

глубине 3,2 м оттаивала и раньше в период с июля-августа по декабрь – январь, но в настоящее время переход через 0°C имеет место и в июне. Видимо, на этой станции до глубины 3,2 м еще проникает сезонное оттаивание и слой «вечной» мерзлоты находится ниже;

- на метеостанции 24944 Олекминск рост температуры почвы наблюдается во все месяцы и наиболее существенен в апреле – августе до 0,6-0,7°C и в ноябре – декабре до 0,6-0,9°C. Здесь период положительных температур, который ранее отмечался с августа по февраль, сейчас стал включать и остальные месяцы года. Поэтому в Олекминске на глубине 3,2 м мерзлота отсутствует уже во все месяцы года;

- на метеостанции 24959 Якутск рост температуры почвы на глубине 3,2 м наиболее существенен из всех рассматриваемых станций. Температура повысилась на 0,5-0,7°C в январе – марте и на 1,8 и 2,4°C в сентябре и октябре. Поэтому положительная температура, которая ранее на этой глубине отсутствовала, сейчас наблюдается с сентября по ноябрь;

- на метеостанции 36259 Кош-Агач также имеет место рост температуры почвы во все месяцы, составляя от 0,6°C в январе до 2,3 – 2,4°C в октябре – ноябре. И если раньше положительная температура на этой глубине наблюдалась с августа по ноябрь, то в настоящее время она отмечается также в июле и декабре, т.е. период с положительными температурами почвы на глубине 3,2 м увеличился в 1,5 раза: с 4 до 6 месяцев в году.

Из анализа внутригодовых изменений температуры почвы также можно сделать выводы, что даже в первую половину ряда, когда изменения климата, видимо, еще не сказывались на ее росте, в некоторые месяцы года на метеостанциях Вилуйск, Олекминск и Кош-Агач она была положительной, поэтому глубина 3,2 м в этих местах входила в сезонный слой протаивания мерзлоты и не отображала многолетнюю или «вечную» мерзлоту, которая должна быть глубже. На метеостанции Якутск, хотя средняя температура во все месяцы и ранее была отрицательной, достигая -0,4°C, т.е. практически нулевой отметки, а сейчас в течении трех месяцев года ее превышает. При этом

это не отдельные, а средние за второй период ряда температуры. Пока глубина 3,2 м соответствует слою «вечной» мерзлоты только в Верхоянске, хотя в октябре она уже приближается к нулевой отметке, составляя в среднем за второй период ряда $-2,3^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, наблюдения за температурой почвы на самой низкой глубине в 3,2м, которые проводятся на сети Росгидромета, даже в предшествующем периоде, когда существенные изменения климата отсутствовали, не соответствовали определению слоя «вечной» мерзлоты примерно южнее 63° с.ш., т.к. в отдельные месяцы года температура в нём была положительной. Поэтому актуальным и важным будут новые наблюдения за температурой почвы на больших глубинах, чтобы выявить нижнюю границу деятельного слоя или слоя сезонного протаивания и затем вести мониторинг этой границы в связи с изменением климата и ростом температуры. Это крайне необходимо как при проектировании новых зданий и сооружений, так и для эксплуатации существующих, т.к. устойчивость свай фундамента определяется условием мерзлого грунта и его устойчивости на глубине.

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ МОНИТОРИНГОВОЙ СЕТИ

2.1 Создание приложений для получения исходных данных

Мониторинг многолетнемёрзлых пород осуществляется посредством специальных устройств, представляющих собой цепочку датчиков температуры - терморезисторов, подключённую к логгеру (регистратор данных), записывающему и хранящему информацию о температурах грунтов [3]. Датчики температуры распределены по глубине неравномерно. Это обусловлено тем, что скорость изменения температуры с глубиной убывает и чем глубже мы опускаемся, тем меньшая частота расположения датчиков нам требуется, чтобы зафиксировать значимые различия в динамике температуры.

Измерения температуры грунта (слабо связанных частиц горных пород) производятся с дискретностью в шесть часов, а данные передаются дистанционно. Для этой цели, устройства оснащены модемом. Термометрические устройства помещаются в оснащённую для этих целей скважину, глубиной 25 метров. Оборудование скважины производится с целью их защиты и изоляции от воздействий внешней среды, сохранения исходных свойств мёрзлых пород.

Для получения исходных данных о температурах грунтов, на языке программирования python, было написано два консольных приложения, объединённых в одной директории. Первое приложение представляет из себя IMAP-клиент и отвечает за получение данных с почтового сервера, куда приходит информация с УТМ (Устройство Термометрического Мониторинга). Второе – парсер, преобразующий полученные данные в единую форму. Дерево каталогов приложений представлено на рисунке 2.1.

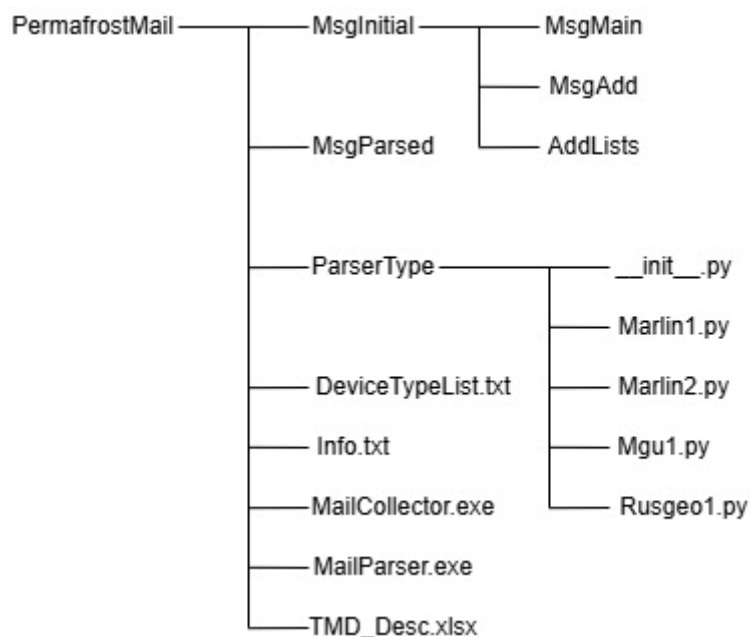


Рисунок 2.1 Дерево каталогов приложений для получения и объединения данных.

2.1.1 Получение данных о температуре грунтов с использованием IMAP Client

Информация о температурах грунтов, получаемая УТМ, каждые 6 часов отправляется на почтовый сервер, посредством встроенного в устройство мониторинга модема. На сервере эти данные сохраняются в виде именованных папок, содержащих сообщения со вложенными файлами в формате sbd (в случае передачи данных по каналу связи IRIDIUM) или в текстовом виде (в случае передачи по каналу GSM) в зависимости от типа передающего устройства. Чтение сообщений с почтового сервера и загрузка прикрепленных вложений осуществляется с помощью специального протокола IMAP.

Для решения задачи получения данных с почтового сервера, был написан IMAP-клиент (приложение для запросов к серверу, использующее протокол IMAP), который осуществляет устойчивое подключение к серверу, создание необходимых директорий, загрузку писем и вложений с заданными параметрами, а также их сортировку (см. Приложение 1).

После запуска, приложение выводит приветственное сообщение с описанием его возможностей (см. рисунок 2.2).

```
=====
Что делает данная программа:

* Позволяет скачивать данные с почты [REDACTED]
* Группирует данные по IMEI
* Создаёт доп файлы для дальнейшего парсинга GSM сообщений
* Создаёт доп файлы для привязки к IMEI координат, определённых спутником, если это требуется

Автор:
Александр Степанец
Ведущий инженер ЦМСММ

=====

Для начала работы программы, нажмите "ENTER"
```

Рисунок 2.2 Приветственное сообщение приложения для получения сообщений с почтового сервера.

После нажатия клавиши “ENTER”, выводится список доступных папок и предлагается выбрать нужные. За раз можно указать несколько папок, перечисляя их названия через запятую. Далее, программа проверяет наличие необходимых директорий и создаёт новые, если нужные не найдены. После этого, программа просит указать стартовую дату в формате DD-Mon-YYYY, где DD – это день, Mon – первые три буквы названия месяца на английском, начиная с большой буквы, YYYY – год. Начиная с выбранной даты, будет происходить импорт данных из указанных ранее папок. После указания стартовой даты, предлагается указать конечную в том же формате. Если одно из полей оказывается пустым, программа будет загружать все сообщения либо до указанной конечной даты (не включительно), либо после указанной стартовой.

В процессе импорта, каждое сообщение проверяется на наличие в нём вложений. Если в сообщении есть вложение в формате sbd, то оно отправляется в папку “MsgMain” (см. рисунок 2.1), где предварительно

создаётся папка, именованная по номеру IMEI, который в свою очередь берётся из заголовка сообщения. Тело сообщения с вложением в формате sbd сохраняется в csv файл и направляется в “MsgAdd”, где также создаётся папка с названием из заголовка сообщения. Предварительно, перед сохранением файла, проверяется наличие нужной директории. Если в сообщении вложение отсутствует, тело сообщения записывается в csv файл и отправляется в соответствующую номеру из заголовка папку в “MsgMain”. В процессе экспорта, к названию файла добавляется дополнительная информация из тела сообщения.

Для всех сообщений, не содержащих в своих заголовках идентификатор IMEI или MSISDN (Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network Number), тела сообщений и вложения помещаются в папку “MsgAdd” и также структурируются по заголовкам. По мимо этого, по мере обработки сообщений, в папке “AddLists” периодически создаются и обновляются csv файлы, содержащие информацию о связях между папками на почте и сортированными частями сообщений из них. По завершении работы, программа сообщает об успешности или не успешности импорта данных.

2.1.2 Парсинг и формирование исходного набора данных

Полученные MailCollector файлы имеют различный формат. Текстовые сообщения разделены на две части, которые связаны номером измерения и номером сообщения. Данные от устройств с типом связи IRIDIUM приходят в бинарных файлах с расширением sbd, которые можно раскодировать, например, с помощью python библиотеки bitstring, зная правильную последовательность передаваемых параметров и количество бит, которые они занимают. Для преобразования, полученных данных в читаемый вид, было написано приложение-парсер (см. приложение 2,3,4).

```
=====
Что делает данная программа:

    * Преобразует исходные данные, полученные с почты [REDACTED] в читаемый формат
    * Добавляет координаты к данным с термокос "МГУ-геофизика"

Автор:
Александр Степанец
Ведущий инженер ЦМСМ

=====

Для начала работы программы, нажмите "ENTER"
```

Рисунок 2.3 Приветственное сообщение приложения для парсинга данных, полученных MailCollector.

При запуске, как и в MailCollector, выводится приветственное сообщение с кратким описанием возможностей приложения (см. рисунок 2.3). После нажатия клавиши “ENTER”, происходит импорт файлов, в которых содержится информация о соответствии идентификатора сообщения типу устройства и типа парсера типу устройства. Далее в цикле, выбирается папка из каталога “MsgMain” (см. рисунок 2.1) и её название сопоставляется с идентификаторами IMEI/MSISDN из импортированной таблицы. Если сопоставление прошло успешно, из вышеупомянутой таблицы выбирается соответствующий тип UTM и после проверки соответствия парсеру, производится его вызов в качестве подпрограммы (см. приложения 3,4). Если название или парсер не были найдены, происходит запись текущего названия папки в список необработанных данных и производится новая итерация цикла.

В общем случае, подпрограммы “MailParser” в начале работы проверяют наличие директории для экспорта результатов парсинга и создают её в случае его отсутствия. Далее в цикле импортируются файлы из папок в “MsgMain” с идентификатором сообщения в названии и происходит их расшифровка, а также объединение с предыдущими расшифрованными

данными в единую, универсальную для всех типов устройств таблицу. Помимо самих измерений, в таблицу добавляется дополнительная информация из “MsgAdd”, например, координаты для устройств, в которых отсутствует встроенный GPS-приёмник. По итогу работы цикла происходит экспорт полученной таблицы в csv-файл с идентификатором сообщения в названии и помещению его в папку “MsgParsed” (см. рисунок 2.1).

Таким образом, мы получаем данные, привязанные к идентификаторам сообщений т.е. IMEI и MSISDN, в формате, пригодном для дальнейшей обработки и анализа.

2.2 Решение проблемы перемещения термометрических устройств

Скважины часто располагаются в труднодоступных регионах с суровыми погодными условиями и как следствие, внешние элементы приборов могут быть повреждены вследствие их воздействия. Также велика вероятность повреждения термометрических устройств дикими животными. Помимо этого, составляющие устройств могут приходить в негодность вследствие естественного износа. Всё вышеперечисленное является основанием для отправки неработающего оборудования на ремонт. Чтобы минимизировать потерю данных и финансовые затраты, неработающие устройства сразу же заменяют на новые или те, что уже были отремонтированы. Данное решение является наиболее оптимальным, однако со временем это приводит к появлению неоднородностей во временном ряде температуры. Дело в том, что данные, передаваемые с помощью модема, привязаны к его уникальному номеру – IMEI или MSISDN, но не к географической точке. Отремонтированное устройство, при переносе в новую скважину, переносит с собой данные из предыдущих.

Это может создать трудности, поскольку ручная фиксация времени и местоположения устройств, помимо того, что она требует излишних временных затрат, увеличивает вероятность ошибок, связанных с

человеческим фактором. Однако существуют методы, позволяющие осуществить эту привязку постфактум. Эти методы обобщённо называют методами кластеризации или кластерного анализа.

2.2.1 Кластеризация на основе плотности как возможное решение проблемы географической привязки данных

Кластеризация – это задача разделения множества объектов (в нашем случае - координат) на непересекающиеся подмножества со схожими, по какому-либо критерию, свойствами. Задача кластеризации относится к классу задач машинного обучения без учителя. Это означает, что для обучения модели не требуется предварительная, ручная разметка данных обучающей выборки.

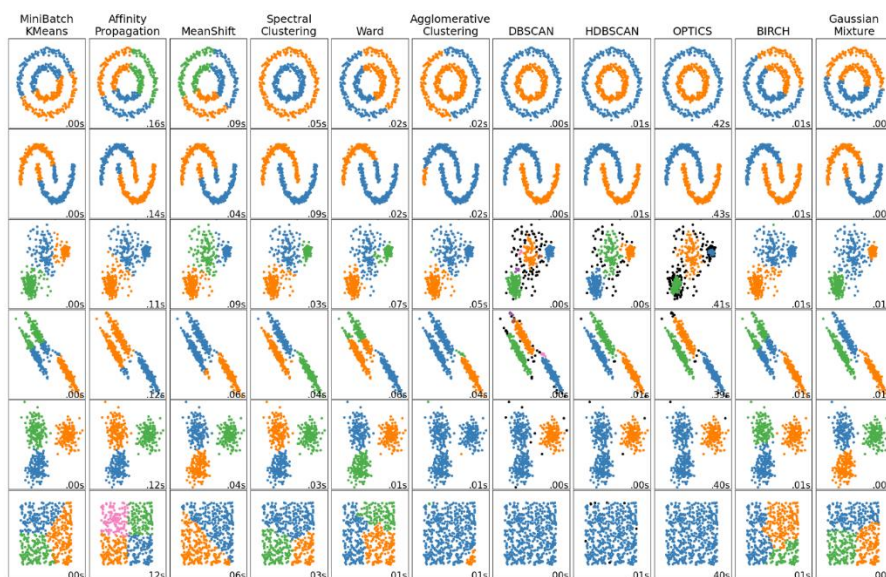


Рисунок 2.4 Сравнение результатов кластеризации различных алгоритмов [4]

Алгоритмы кластеризации представлены большим разнообразием (см. рисунок 2.4) и их выбор зависит от решаемой задачи и особенностей кластеризуемых данных. В нашем случае, для подавляющего большинства устройств, координаты представляют собой плотные, сферические скопления точек радиусом от центра до границы области скопления, сопоставимым с предельными допустимыми погрешностями определения координат,

указанными в технических паспортах устройств. Линейные размеры кластеров при этом много меньше расстояний между ними. С точки зрения простоты разбиения таких данных на кластеры, они являются практически идеальными для любого из алгоритмов кластеризации.

Однако, в этих данных также есть своя особенность, а именно - выбросы, источником которых является тестирование оборудования. Тестирование может осуществляться в процессе транспортировки или подготовки устройств к установке. Некоторые алгоритмы, например k-means, не могут различать выбросы, поэтому их применение, по крайней мере без дополнительных модификаций, менее предпочтительно. Также, тестирование может осуществляться систематически в специально отведённых для этого зонах и тогда в этих зонах формируются большие скопления точек, которые могут быть распознаны алгоритмом, в том числе учитывающем выбросы, как кластеры. Но эта проблема решается путём ограничения области, в которой производится разбиение данных.

Стоит также упомянуть, что не все устройства мониторинга оснащены GPS-приёмниками. Некоторые устройства не передают свои координаты непосредственно. Однако, координаты могут определяться посредством спутников системы связи IRIDIUM, используемой для передачи измерений температуры, и передаваться вместе с ними в одном сообщении. Эти координаты можно извлечь из тела сообщения и объединить с остальными данными. Погрешность определения таких координат несопоставимо больше той, что характерна для GPS, а также сама форма кластеров сильно отличается от сферической. Однако за отсутствием альтернатив, применение таких координат для кластеризации, при должном подходе, вполне обосновано.

Исходя из всего вышеизложенного, наиболее предпочтительным является использование методов кластеризации на основе плотности (DBSCAN и его модификации), поскольку они различают выбросы, способны выделять кластеры произвольной формы, а также не требуют заранее знать число кластеров. Но стоит отметить, что окончательно определить какой из

методов подходит лучше, оптимальнее основываясь на сравнении оценок качества кластеризации каждого из них.

Основная идея DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise), заключается в определении кластеров через число точек (параметр minPts), принадлежащее определённой области вокруг ядра т.е. центральной точки с заданным радиусом (параметр eps). Множество точек кластера задаётся следующим образом:

$$N_{\text{eps}}(p) = \{q \in D \mid \text{dist}(q, p) \leq \text{eps}\} \quad (2.1)$$

где:

q – точка из окрестности центральной точки p ;

eps – максимально возможное расстояние от точки p до q , в пределах которого q считается прямо достижимой;

D – множество всех точек;

$\text{dist}(q, p)$ – функция расстояния от q до p .

Сначала выбирается случайная точка p , не принадлежащая ни одному кластеру. Если в окрестности этой точки с заданным eps , число элементов $N_{\text{eps}}(p) \geq \text{minPts}$, то точка p определяется как центр кластера и всем точкам в её окрестности, включая саму точку p , присваивается уникальная метка. Затем итеративно, для каждой точки полученного кластера, определяется $N_{\text{eps}}(p)$ и сравнивается с minPts . Если новая точка p имеет в своей окрестности достаточное количество точек, все точки её окрестности присваиваются кластеру, к которому принадлежит p . Таким образом происходит расширение кластера.

Считается, что точка q *прямо достижима* из p , если в окрестности q количество точек не меньше minPts (см. рисунок 2.5. Прямо достижимые точки помечены синим цветом, а ядро (точка p) – красным). Если же в окрестности q есть точки, принадлежащие кластеру, но их количество меньше minPts , они

считаются *достижимыми* т.е. являются граничными точками кластера (см. рисунок 2.5. Достижимая точка помечена зелёным). Точки, в окрестности которых отсутствуют q , принадлежащие кластеру, а их количество меньше, чем $minPts$, считаются шумовыми (см. рисунок 2.5. Жёлтые точки).

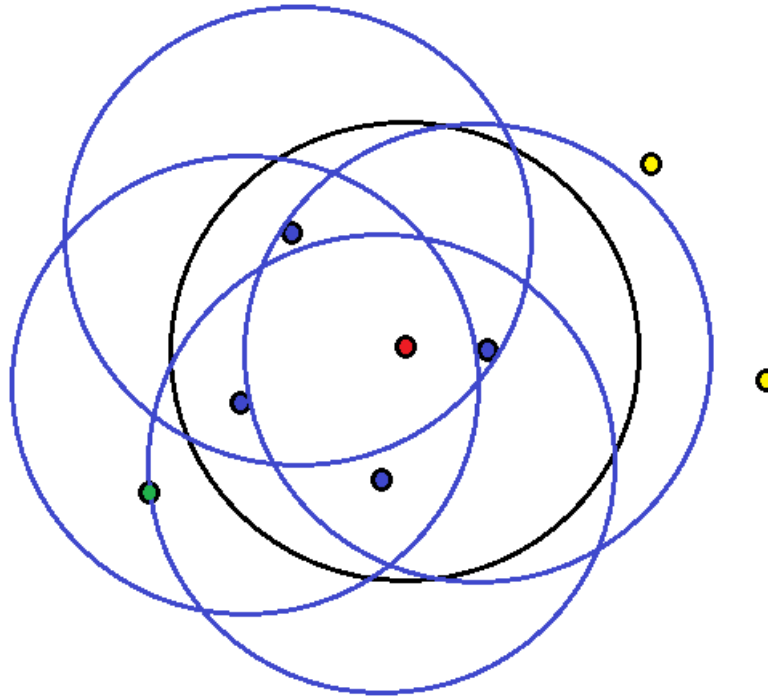


Рисунок 2.5 Визуальное представление формирования кластера алгоритмом DBSCAN. $minPts$, в данном случае, равно четырём.

По итогу, качество кластеризации DBSCAN определяется правильным подбором параметров eps и $minPts$. Параметр eps для наших данных уже известен. В качестве него может выступать предельно допустимая погрешность измерения координат, указанная в технических паспортах. Эта погрешность указана в метрах, но её легко пересчитать в градусы или радианы для заданной широты, например, по следующей формуле:

$$eps = \delta \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{180}{\pi} \quad (2.2)$$

где:

δ – погрешность измерений в метрах;

φ – широта;

R – радиус земли.

Например, для широты Санкт-Петербурга $\varphi = 59,6^\circ$ и погрешности $\delta = 30$ м при среднем $R = 6371000$ м, eps будет примерно равен $5,33 \cdot 10^{-4}$ градуса. Пересчитать метры в градусы можно и более точно, например учитывая местный радиус земли и широту, а также применяя формулы для эллипсоида, но для данной задачи усложнение расчётов с целью получения большей точности eps , является избыточным. Как альтернатива, например для устройств, не имеющих GPS приёмника, погрешность в градусах может быть определена самостоятельно.

Параметр `minPts` может быть подобран с помощью методов определения оптимального числа кластеров, например метода силуэтов.

2.2.2 Кластеризация координат, переданных устройствами термометрического мониторинга

В разделе 2.1, был получен набор файлов, которые мы будем использовать для дальнейшей работы. Все полученные файлы имеют единый формат, что позволяет работать с данными со всех типов устройств одновременно. Однако перед работой необходимо сделать ещё несколько важных шагов. Сначала все данные из файлов были объединены в единую таблицу. Затем были удалены, дублирующиеся по идентификатору сообщения и дате измерения, значения, а также строки с датами, имеющими нетипичную для данного устройства периодичность (например, передаваемыми в процессе

автокалибровки УТМ, в начале его работы). И напоследок, производилось задание типов данных в столбцах таблицы, округление значений координат до 4 знаков после запятой и сортировка значений таблицы по идентификатору сообщения и дате измерения. Таким образом, была получена итоговая таблица, использовавшаяся в дальнейшей работе.

На картах в приложениях 5 и 7 изображены точки, построенные по координатам, передаваемым устройствами термометрического мониторинга. Перед обработкой данных и визуализацией были отфильтрованы точки, южнее 65 широты и западнее 50 долготы, поскольку в этих районах вечная мерзлота и соответственно термометрические скважины отсутствуют. Однако за пределами ограниченного района, могут присутствовать координаты, переданные во время тестовых запусков устройств мониторинга. Реализация алгоритма DBSCAN была получена из библиотеки `scikitlearn` [3].

По формуле 3.2 был рассчитан `eps` и для различных значений `min_samples` произведена кластеризация. В процессе работы цикла, помимо числа кластеров, рассчитывалась статистика силуэта, также реализованная в `scikitlearn` [4]. По итогу был построен график силуэта (см. приложение 11) в зависимости от числа кластеров и определено максимальное значение. Именно оно указывает на оптимальное число кластеров.

Как мы можем видеть на графике в приложении 11, число кластеров равное 77 является оптимальным. Данному числу кластеров, соответствуют значения `min_samples` от 95 до 136 (Для кластеризации было выбрано значение равное 95). Результаты кластеризации координат, полученных с помощью GPS, можно увидеть в приложениях 5 (до кластеризации) и 6 (после кластеризации). Значения `eps` и `min_samples` для координат устройств без GPS, подбирались на основе визуального анализа (см. приложение 8).

Метки кластеров представляют собой числовые значения. Однако нам нужно определить названия пунктов, к которым относятся данные кластеры. Для этого вычислялась матрица расстояний между центроидами кластеров и координатами БПН (базовый пункт наблюдения) с помощью метода

pairwise_distances из библиотеки sklearn [5]. Путём нахождения ближайших к центроидам базовых пунктов, производилась привязка кластеров и присвоение новых названий (см. приложения 9, 10).

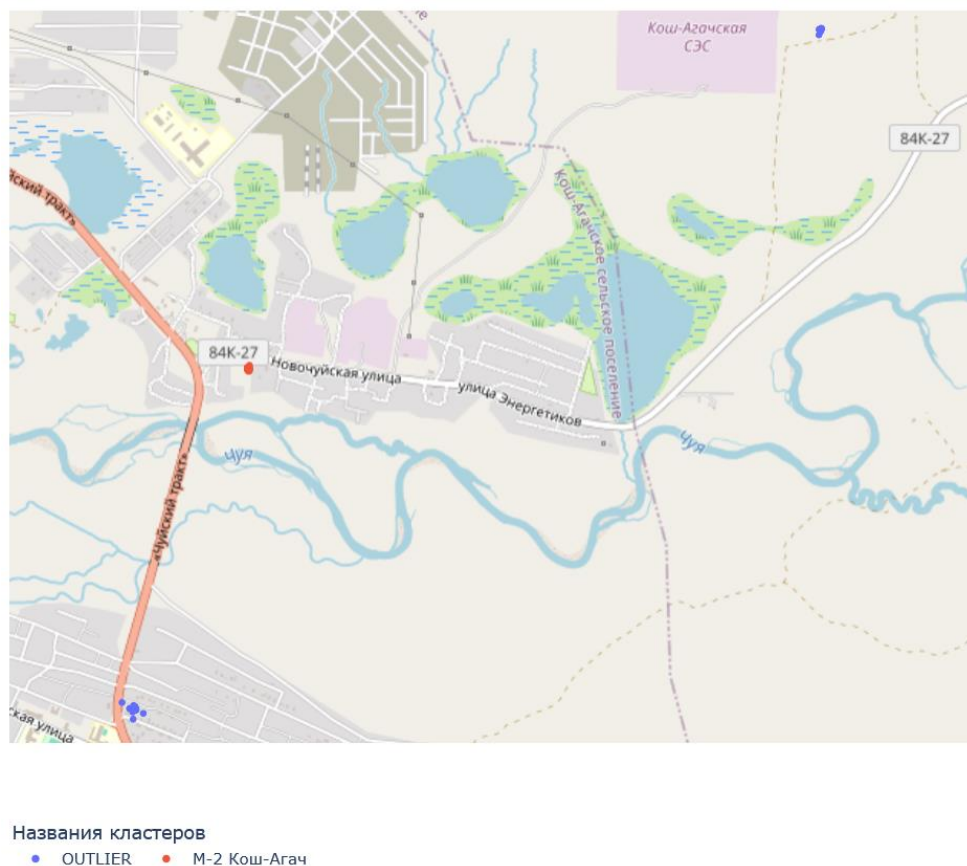


Рисунок 2.6 Посёлок Кош-Агач. Результаты кластеризации координат. OUTLIER – метка выбросов

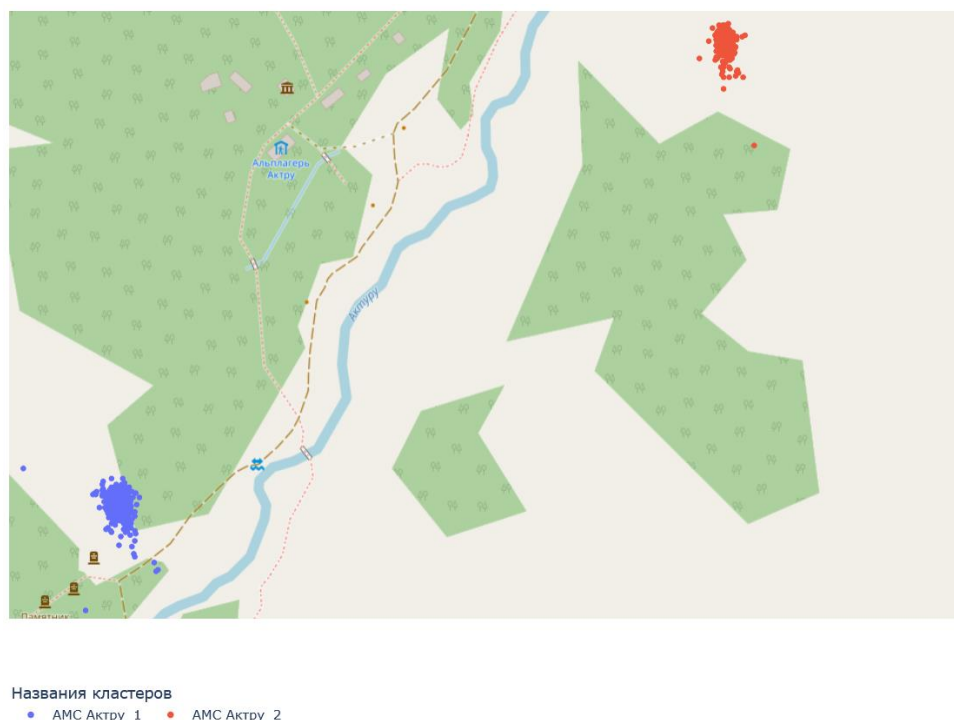


Рисунок 2.7 АМС Актру. Результаты кластеризации

На рисунках 2.6 и 2.7 можно видеть, насколько кластеризация DBSCAN эффективно справилась со своей задачей. В Актру получилось корректно выделить два очень близко расположенных друг к другу кластера, а в Кош-Агач – отделить, близкие к кластеру, скопления шумовых точек. Однако в процессе было необходимо разделять данные с устройств с модулем GPS и без него, поскольку погрешность измерений координат последними крайне высокая и эти данные могли запросто пересечься с координатами устройств с GPS-приёмником, что привело бы к неправильному присвоению меток для этих данных. Также, неоднородность плотности в кластерах координат, определённых спутниками IRIDIUM в совокупности с большими линейными размерами кластеров, относительно расстояний между ними, приводит к тому, что много корректных данных помечается как шум т.е. имеет место ошибка второго рода (Если H_0 – отсутствие принадлежности к кластеру). Однако эта ошибка, в теории, может быть минимизирована посредством применения модифицированных версий DBSCAN или других методов кластеризации. Стоит также отметить, что все расстояния вычислялись с использованием

формулы гаверсина для учёта шарообразности земли, а перед расчётами, все координаты переводились в радианы.

2.3 Определение неоднородностей временного ряда, связанных с заменой термометрических устройств и нарушениями в работе датчиков

После проведения кластерного анализа, основной причиной неоднородностей становятся нарушения в работе датчиков температуры, а также влияние тепловой инерции, и вероятно, нарушение термического состояния внутренней поверхности обсадной трубы. Объединяет эти два источника выбросов то, что они представляют собой резкие, кратковременные изменения, поэтому общая методика обработки таких выбросов является оправданной.

2.3.1 Нормализация данных посредством вычисления остатков

Большинство известных методов обнаружения неоднородностей корректно применять лишь в том случае, если распределение случайной величины подчинено нормальному закону. Однако исходный временной ряд, существенно далёк от этого типа распределения. В таких случаях, применяются методы нормализации, т.е. такие методы, которые позволяют привести исходный временной ряд к нормальному закону распределению.

Одним из наиболее применяемых методов нормализации является вычисление остатков. Остатки представляют собой случайную составляющую временного ряда, полученную после удаления из него более крупномасштабной изменчивости. В случае температуры грунтов, такой изменчивостью является глобальный тренд температуры, сезонные изменения температуры, связанные со сменой времён года, изменения температуры, связанные с сезонным промерзанием и протаиванием грунтов, а также суточные колебания.

Затруднением на пути к определению всех вышеописанных, закономерных изменений температуры, является отсутствие достаточного количества наблюдений на многих пунктах и уменьшение числа компонент временного ряда с глубиной. С применением стандартных методов декомпозиции, требуется индивидуальный подход к каждому пункту и каждой глубине, чтобы корректно выделить нужные компоненты и вычислить остатки.

Альтернативным подходом было бы вычисление разностей с некоторым лагом, что также позволило бы нормализовать временной ряд. Однако из-за технических ограничений, начиная с некоторой глубины, часто встречаются ступенчатые изменения температуры разных масштабов, в том числе масштабов меньших, чем сами выбросы. Таким образом, вычисление разностей в таких точках, приведёт к маскировке выбросов, которая не позволит их определить никаким из известных методов.

Удаление сезонности и тренда производилось посредством вейвлет-аппроксимации временного ряда температуры с последующим удалением трёх первых уровней разложения. Было выбрано пять уровней аппроксимации биортогональным вейвлетом `bior3.1`. По итогу были получены остатки, которые обладали стационарностью среднего значения, но не стационарностью дисперсии. Однако эта проблема была решена применением скользящего окна для формирования выборки. Пример результатов нормализации продемонстрирован на рисунках 2.8 и 2.9.

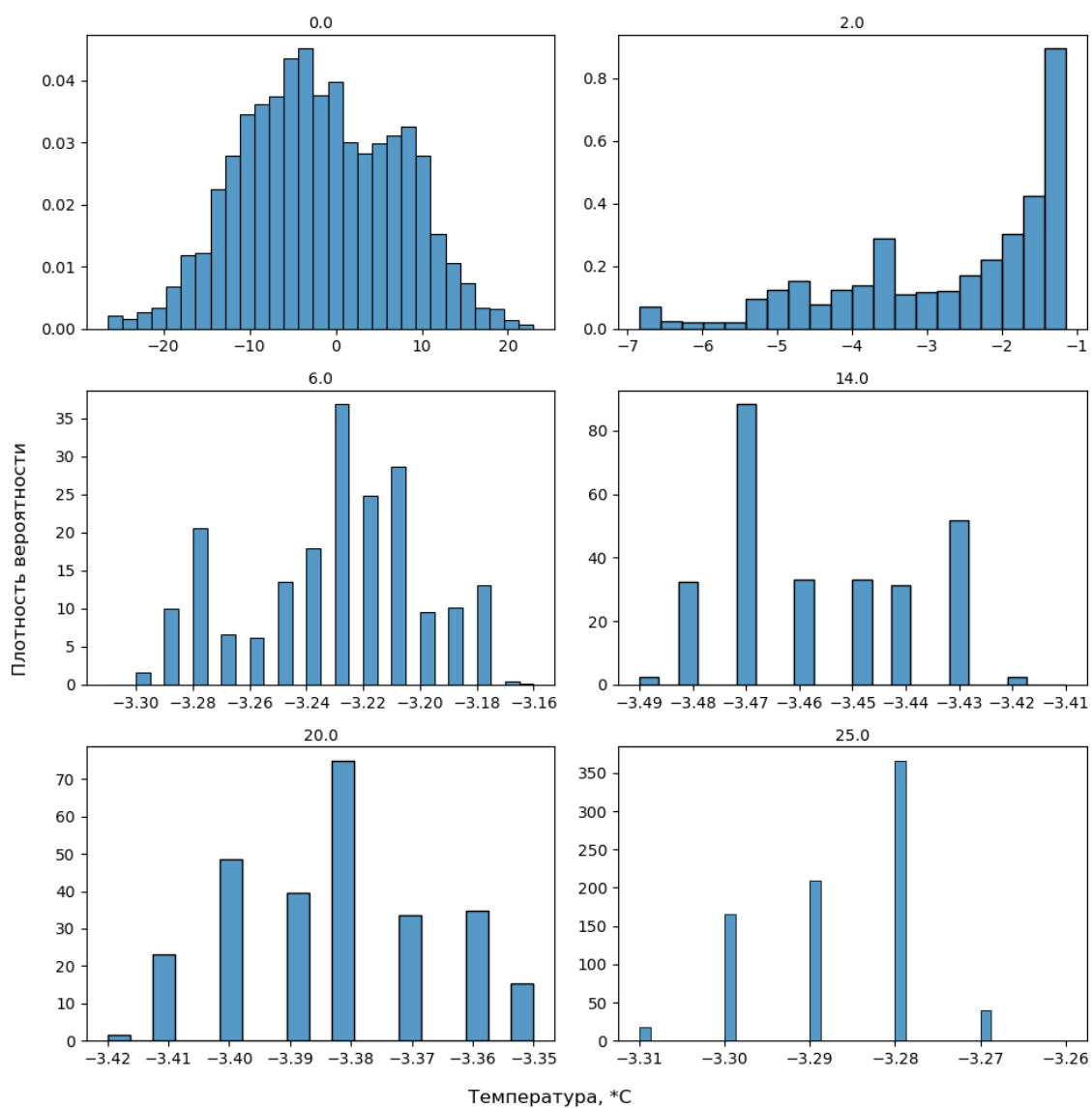


Рисунок 2.8 Гистограмма температур до нормализации для пункта “ТМО СП Баренцбург”

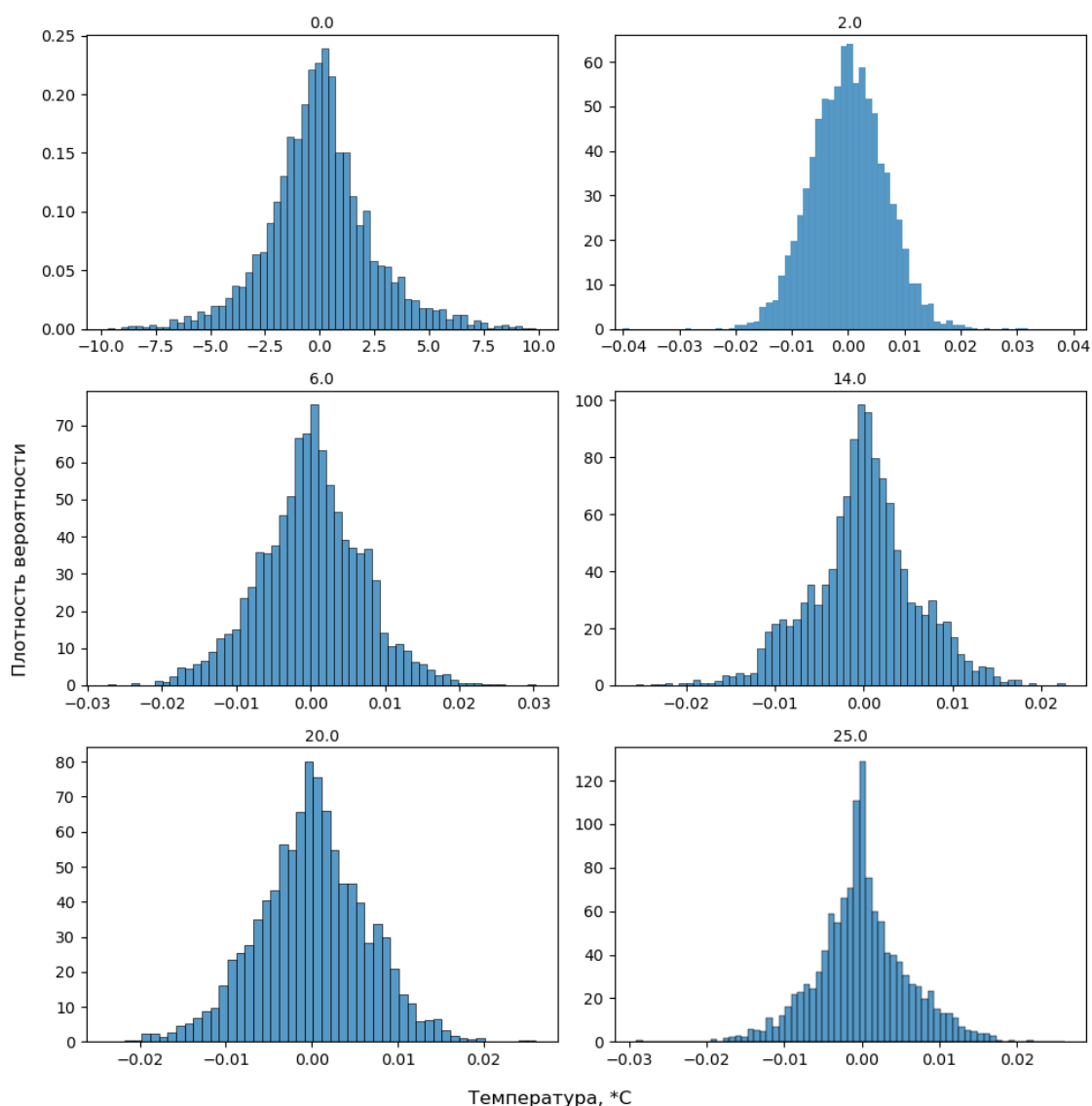


Рисунок 2.9 Гистограммы температур после нормализации для пункта “ГМО СП Баренцбург”

В отличие от классического преобразования Фурье, где сигнал раскладывается на бесконечные синусоиды и косинусоиды, вейвлеты — это короткие осциллирующие функции, затухающие во времени, что делает их особенно полезными для анализа нестационарных сигналов, то есть таких, чьи свойства меняются со временем. Основная идея вейвлет-преобразования заключается в том, чтобы использовать набор базисных функций, которые могут масштабироваться и сдвигаться, что позволяет изучать сигнал на разных уровнях детализации и в различных временных интервалах.

Ключевым понятием в теории вейвлетов является материнский вейвлет — функция $\psi(t)$, которая должна удовлетворять двум основным условиям:

- Её среднее значение должно быть равно нулю, то есть интеграл по всей временной оси должен давать ноль.
- Она должна обладать конечной энергией, то есть быть квадратично интегрируемой.

Эти свойства обеспечивают способность вейвлета выявлять локальные изменения в сигнале, а не просто усреднять его, как это делает, например, преобразование Фурье.

Непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) определяется как свертка сигнала с масштабируемыми и сдвинутыми копиями материнского вейвлета. Параметры масштаба a и сдвига b позволяют анализировать сигнал на разных частотах и в разных временных точках. Однако CWT обладает высокой вычислительной сложностью из-за своей избыточности, поскольку вычисляется для всех возможных масштабов и сдвигов.

Более практичным для многих приложений является дискретное вейвлет-преобразование (DWT), которое строится на основе диадической сетки, где масштаб и сдвиг изменяются по степеням двойки. DWT реализуется через банки фильтров, где сигнал последовательно пропускается через низкочастотный и высокочастотный фильтры с последующим прореживанием.

Вейвлет `bior3.1` представляет собой характерного представителя биортогональных вейвлетов. Его ключевая особенность заключается в использовании отдельных наборов фильтров для анализа и синтеза, что обеспечивает важное преимущество - симметричность базисных функций при сохранении возможности точного восстановления сигнала. Этот вейвлет относится к семейству, обозначаемому как `biorNr.Nd`, где Nr указывает на количество *vanishing moments* для реконструкции, а Nd - для декомпозиции. В случае `bior3.1` мы имеем три *vanishing moments* на стороне анализа и один на стороне синтеза, что определяет его специфические свойства.

Биортогональная природа bior3.1 проявляется в том, что он использует две различные масштабирующие функции и два различных вейвлета - одну пару для прямого преобразования и другую для обратного. Такой подход позволяет достичь симметрии, которой невозможно добиться в рамках ортогональных вейвлетов (за исключением тривиального вейвлета Хаара). При этом сохраняется важное свойство точной реконструкции сигнала после преобразования, хотя и ценой некоторого увеличения вычислительной сложности по сравнению с ортогональными схемами.

2.3.2 Поиск неоднородностей временного ряда и фильтрация выбросов

После приведения данных к нормальному распределению, эмпирическое распределение остатков, взятых в 30-и дневном скользящем окне, аппроксимировалось функцией плотности случайной величины:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

где:

σ – стандартное отклонение;

μ – математическое ожидание;

x – значение случайной величины.

Выбросы представляют собой значимые отклонения от нормального распределения. Если случайная величина x , при заданном уровне значимости α , выходит за пределы распределения – она считается выбросом. Однако в формуле 2.3 используются среднее значение μ и стандартное отклонение σ , на которые существенно влияют выбросы. Решение этой проблемы – использование робастных параметров, а именно медианы и MAD (медианное абсолютное отклонение):

$$MAD = Med(|X - Med(X)|) \quad (2.4)$$

$$\sigma = k * MAD \quad (2.5)$$

$$\mu = Med(X) \quad (2.6)$$

где:

X – случайная величина;

$Med(X)$ – медиана случайной величины;

k – масштабный множитель, равный 1.4826 для нормального распределения.

Подставляя равенства 2.5 и 2.6 в уравнение 2.3, получим функцию плотности вероятности нормального распределения на основе робастных статистик:

$$f(x) = \frac{1}{1.4826 * MAD \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - Med(X))^2}{2 * (1.4826 * MAD)^2}} \quad (2.7)$$

Полученная формула имеет два ключевых ограничения. Первое заключается в том, что MAD не должна быть равна нулю, иначе мы получаем в формуле 2.7 деление на ноль. В норме температуры изменяются постоянно и вероятность получить ноль при вычислении MAD достаточно низка. Однако если это все же произошло, к данным можно добавить небольшой шум или пропустить итерацию цикла при условии, что MAD равна нулю. Второе ограничение – жёсткое требование к нормальности распределения. В нашем случае, во временном ряде остатков присутствует нестационарность дисперсии, что может влиять на нормальность. Однако эта проблема решается путём применения скользящего окна для получения выборки.

Для данных 82 пунктов мониторинга, с помощью уравнения 2.7, при уровне значимости $\alpha = 0.01$, были определены значения x , значительно отклоняющиеся от распределения $f(x)$ и отфильтрованы выбросы. Для оценки

эффективности фильтрации выбросов было рассчитано изменение количества пропусков в процентах и проведена оценка значимости изменения дисперсии по критерию Левене (см. приложения 15, 16). Результаты фильтрации выбросов представлены в приложении 12.

3. ПРИМЕНИМОСТЬ НОВЫХ ДАННЫХ О ТЕМПЕРАТУРАХ ГРУНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

3.1 Оценка связи между новыми данными и данными метеостанций за совместный период

Новые средства измерений позволяют фиксировать температуру грунта до глубины 25м, что является куда более информативным, чем измерения от 2 до 320 см на метеостанциях. Поэтому актуальным является исследование по сопоставлению данных стандартных и новых средств измерений.

В данном исследовании использовался коэффициент корреляции Пирсона, так как связь между измерениями предполагается линейной. Формула расчёта включает ковариацию и стандартные отклонения. Значения коэффициента интерпретируются по шкале от "очень слабой" ($\pm 0.1-0.2$) до "очень сильной" ($\pm 0.8-1$) связи. Однако метод имеет ограничения: чувствительность к выбросам, применимость только к линейным зависимостям и необходимость нормального распределения данных. Для проверки значимости коэффициента применяется t-критерий Стьюдента.

Проведён корреляционный анализ температур грунта, измеренных разными методами (вытяжными термометрами и устройствами термометрического мониторинга). Данные охватывают несколько пунктов (Оймякон, Кош-Агач, Тарко-Сале) на разных глубинах (0.2–3.2 м). Результаты представлены в виде матрицы корреляции и диаграмм рассеяния с линиями регрессии.

Корреляционный анализ подтвердил высокую согласованность измерений на большинстве глубин, за исключением отдельных случаев, связанных с сезонными эффектами или методическими различиями. Для повышения точности необходимы более длительные совместные наблюдения. При совместном использовании данных вытяжных термометров и устройств

термометрического мониторинга, необходимо вносить поправку на систематическую погрешность измерений.

3.1.1 Краткие сведения о корреляционном анализе

Корреляционный анализ — это статистический метод, позволяющий оценить степень и направление взаимосвязи между двумя или более переменными. Основная цель такого анализа — выявить, насколько изменения одной переменной связаны с изменениями другой. При этом важно понимать, что корреляция не означает причинно-следственную связь, а лишь указывает на наличие статистической зависимости.

Корреляция может быть положительной (если увеличение одной переменной сопровождается ростом другой), отрицательной (если увеличение одной переменной приводит к уменьшению другой) или отсутствовать (если изменения переменных не связаны). Для количественной оценки корреляции используются коэффициенты корреляции, среди которых наиболее распространены следующие:

- Коэффициент корреляции Пирсона (r) — измеряет линейную зависимость между двумя количественными переменными.
- Коэффициент корреляции Спирмена (ρ) — оценивает монотонную (не обязательно линейную) зависимость, применяется для ранговых данных.
- Коэффициент корреляции Кендалла (τ) — также используется для ранговых данных, менее чувствителен к выбросам, чем Спирмена.

В нашем случае будет использоваться коэффициент корреляции Пирсона, поскольку связь между одним и тем же измеряемым параметром для различных средств измерения всегда является линейной. Коэффициент корреляции Пирсона — это мера линейной зависимости между двумя переменными. Он показывает, насколько сильно и в каком направлении (прямая или обратная связь) одна переменная связана с другой. Формула

коэффициента корреляции Пирсона для генеральной совокупности приведена ниже:

$$r = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3.1)$$

$$cov(X, Y) = \frac{\sum (X_i - \mu_X) (Y_i - \mu_Y)}{N} \quad (3.2)$$

$$\sigma_X = \frac{\sum (X_i - \mu_X)^2}{N}, \quad \sigma_Y = \frac{\sum (Y_i - \mu_Y)^2}{N} \quad (3.3)$$

где:

N – размер генеральной совокупности;

X – Предиктор;

Y – Предиктант;

σ_X, σ_Y – стандартные отклонения;

μ_X, μ_Y – истинные средние;

$cov(X, Y)$ – ковариация.

Для значений коэффициента корреляции часто применяют шкалу степени связи, разбивающую значения коэффициентов корреляции на подмножества, характеризуемые определённой степенью связи. Число градаций шкалы степени связи зависит от области исследований, в которой она применяется. Часто используют следующую градацию:

Таблица 3.1 Градация коэффициентов корреляции по степени связи

Значение “ r ”	Степень связи
от ± 0.1 до ± 0.2	Очень слабая
от ± 0.2 до ± 0.4	Слабая
от ± 0.4 до ± 0.6	Умеренная
от ± 0.6 до ± 0.8	Сильная
от ± 0.8 до ± 1	Очень сильная

Коэффициент корреляции Пирсона имеет ряд ограничений. Коэффициент применим лишь к линейным зависимостям (нелинейная зависимость даст r близкий к нулю), чувствителен к выбросам, неустойчив при малых выборках, не учитывает гетероскедантность (нестационарность дисперсии при стационарном среднем). Для оценки значимости коэффициента корреляции Пирсона применяют t -критерий Стьюдента:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3.4)$$

где:

n – объём выборки ($n=N$ для генеральной совокупности);

r – коэффициент корреляции Пирсона.

Статистика критерия Стьюдента сравнивается с её критическим значением, взятым для выбранного уровня значимости. Превышение критического значения указывает на значимость корреляции Пирсона. Важно также учитывать, что t -критерий применим только в случае нормального закона распределения.

3.1.2 Корреляционный анализ новых и стандартных источников данных за совместный период

В процессе работы, была построена матрица коэффициентов корреляции Пирсона на совместных глубинах за совместные периоды наблюдений по имеющимся на данный момент данным. Ниже приведена таблица совместных периодов наблюдений в днях:

Таблица 3.2 Количество дней совместных наблюдений

Название пункта	Глубина, м						
	0.2 м	0.4 м	0.8 м	1.2 м	1.6 м	2.4 м	3.2 м
АЭ Оймякон	108	108	108	34	108	84	84
М-2 Кош-Агач	23	23	23	23	23		23
ОГМС Тарко-Сале	184	184	184	184	184		

Как показано в таблице 3.1, на данный момент совместных периодов наблюдений достаточно мало. Это связано во многом с существенной задержкой в предоставлении данных ВНИИГМИ МЦД. Все данные из таблицы 3.1 получены за 2023 год. На основе данных о температурах почвы за совместные периоды наблюдений, была построена матрица коэффициентов корреляции Пирсона:

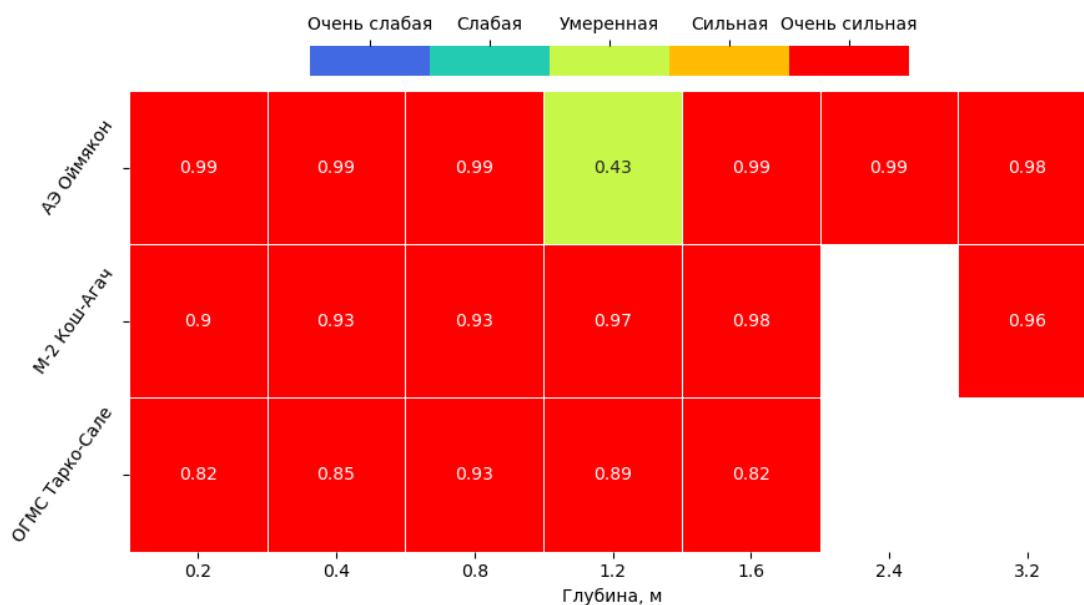


Рисунок 3.1 Корреляционная матрица Пирсона для температур грунта, измеренных вытяжными термометрами и устройствами термометрического мониторинга.

Исходя из полученных коэффициентов, связь между температурами является достаточно сильной, а различия объяснимы разницей в методике измерений, упомянутой в первой главе. Получение совместных рядов за более длительный период и нахождение связи между средними значениями, позволило бы существенно усилить корреляцию. Умеренная корреляция на глубине 1.2 метра в Оймжоне объясняется попаданием совместного периода наблюдений в начало переходного сезона, вероятно проявившегося на глубине 1.2 метра с задержкой, относительно температур прочих глубин. Совмещённый временной ряд приведён на рисунке 3.2:

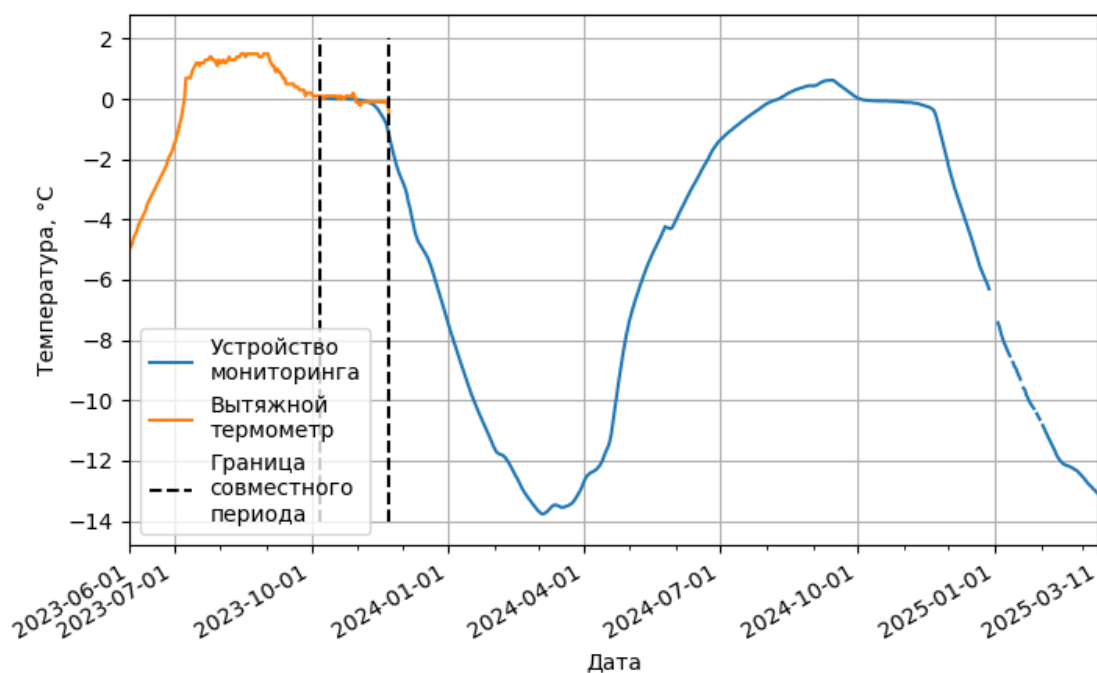


Рисунок 3.2 Совместный график температуры, грунта на глубине 1.2 метра, измеренной вытяжным термометром и устройством термометрического мониторинга.

В качестве примера, на рисунках 3.3 – 3.5 приведены графики линейной зависимости между температурами грунта, измеренными на метеостанции и в термоскважине:

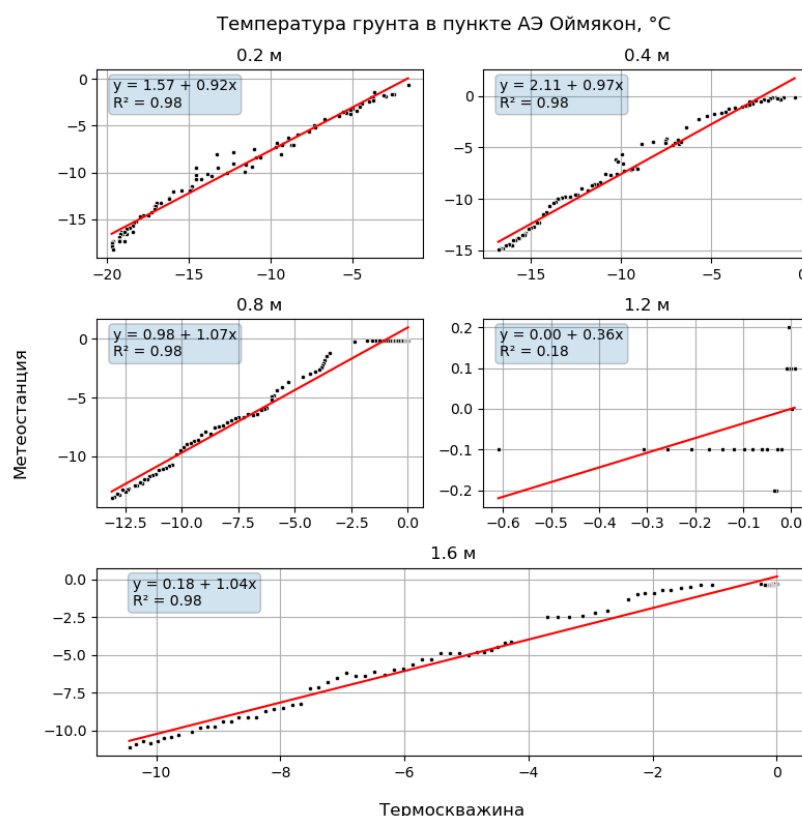


Рисунок 3.3 Диаграмма рассеяния с линией регрессии пункта “АЭ Оймякон”

На рисунке 3.3, на глубинах 0.2 м, 0.4 м и 0.8 м наблюдается исключительно высокая степень соответствия между измерениями в термоскважине и на метеостанции. Значения коэффициента детерминации для всех трёх глубин составляют $R^2=0.98$, что свидетельствует о почти идеальной линейной зависимости. Наклоны регрессионных прямых находятся в диапазоне от 0.92 до 1.07, а свободные коэффициенты варьируются от 0.98 до 2.11. Это может указывать на наличие незначительных систематических смещений, но общее качество аппроксимации остаётся крайне высоким. Точки распределены вдоль линии регрессии равномерно и с минимальными отклонениями, что подтверждает согласованность данных двух источников.

Ситуация резко меняется на глубине 1.2 м. Здесь значение коэффициента детерминации падает до 0.18, что указывает на крайне слабую линейную связь между двумя наборами данных. Точки на графике формируют плотную группу, в которой практически отсутствует тренд, а линия регрессии

проходит далеко от большинства наблюдений, однако этот эффект уже был объяснён ранее.

На глубине 1.6 м регрессия снова демонстрирует высокую степень соответствия: коэффициент детерминации составляет 0.98, а наклон линии регрессии близок к 1.04, что говорит о практически линейной и масштабно адекватной зависимости между измерениями. Свободный член уравнения регрессии равен 0.18, что может быть интерпретировано как незначительное систематическое смещение.

Таким образом, на станции АЭ Оймякон на глубинах 0.2, 0.4, 0.8 и 1.6 м измерения температуры в термоскважине и на метеостанции находятся в почти идеальном согласии, что позволяет использовать данные взаимозаменяемо с высокой степенью доверия.

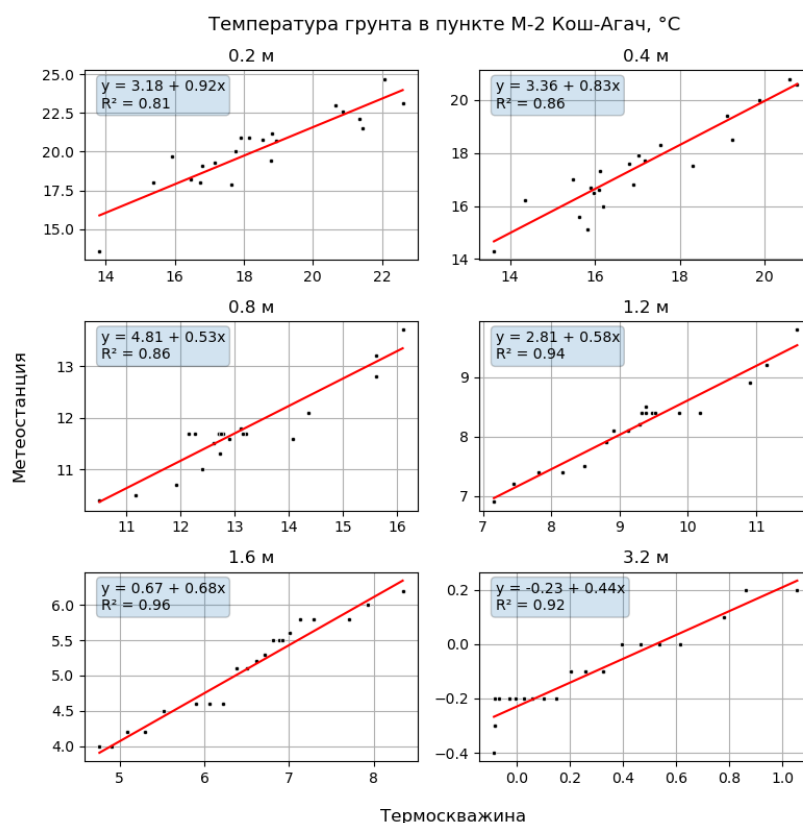


Рисунок 3.4 Диаграмма рассеяния с линией регрессии пункта “М-2 Кош-Агач”

На рисунках 3.3-3.5 представлены графики зависимости между температурой грунта, измеренной в термометрической скважине (ось абсцисс) и полученной с помощью вытяжных термометров на метеостанции (ось ординат). Анализ данных выявил чёткую положительную линейную связь между этими двумя методами измерений на всех исследованных глубинах – от 0.2 до 3.2 метров.

Наибольший разброс значений наблюдается в поверхностных слоях грунта (0.2-0.8 м), где коэффициенты детерминации R^2 составляют 0.81-0.86, а угловые коэффициенты регрессионных уравнений достигают 0.53-0.92. Это свидетельствует о хорошей, но не идеальной согласованности методов, что может быть связано с влиянием внешних факторов, таких как инсоляция и атмосферные осадки, более выраженным в верхних слоях грунта. По мере увеличения глубины (1.2-1.6 м) согласованность измерений, в целом, улучшается – значения R^2 возрастают, а угловые коэффициенты снижаются, что может отражать уменьшение влияния краткосрочных температурных колебаний и большую стабильность термического режима.

Особый интерес представляют данные для глубины 3.2 метра, где температура приближается к 0°C . Здесь, несмотря на экстремальные условия, сохраняется высокая точность измерений ($R^2=0.92$), что подтверждает надёжность обоих методов мониторинга. При этом свободные члены регрессионных уравнений последовательно уменьшаются с глубиной – от +3.18 на 0.2 м до -0.23 на 3.2 м, что может указывать на систематические погрешности.

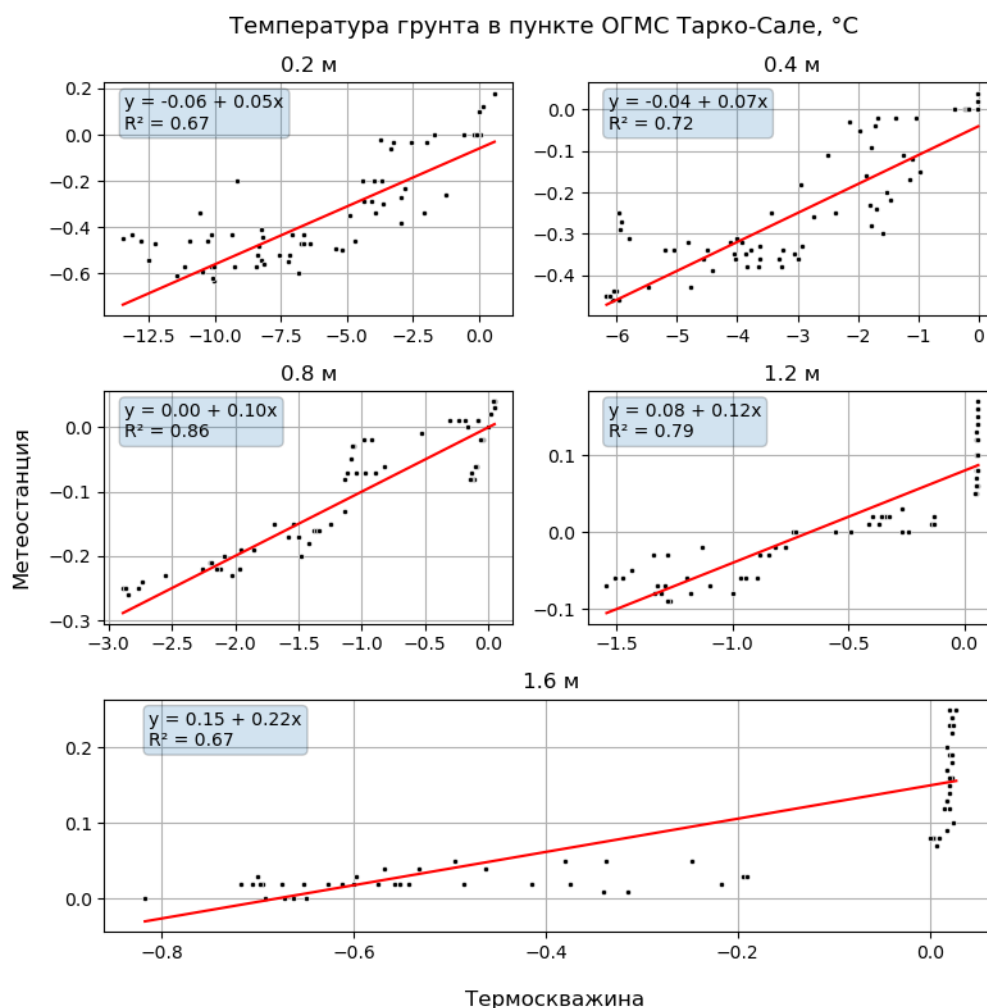


Рисунок 3.5 Диаграмма рассеяния с линией регрессии пункта “ОГМС Тарко-Сале”

В пункте ОГМС Тарко-Сале, на глубине 0.2 м наблюдается положительная линейная зависимость между измерениями, однако значение коэффициента детерминации ($R^2=0.67$) указывает на умеренную точность аппроксимации. Значительный разброс точек, особенно в области отрицательных температур, свидетельствует о высокой изменчивости температур у поверхности грунта. На глубине 0.4 м коэффициент детерминации возрастает до 0.72, что указывает на усиление зависимости между измерениями. Хотя разброс данных уменьшается по сравнению с более мелкой глубиной, отклонения от линии регрессии всё ещё заметны.

На глубине 0.8 м регрессия демонстрирует наилучшее соответствие между двумя источниками данных: коэффициент детерминации достигает 0.86, а уравнение регрессии практически не содержит смещения (свободный коэффициент близок к нулю). Точки плотно сгруппированы вдоль линии регрессии, что говорит о высокой согласованности измерений. На глубине 1.2 м точность прогноза несколько снижается ($R^2=0.79$), при этом появляется положительное смещение, что может свидетельствовать о систематических различиях в калибровке оборудования или микроклиматических условиях между площадками измерений.

Наибольшие отклонения от линии регрессии наблюдаются на глубине 1.6 м. Несмотря на положительный наклон и коэффициент детерминации 0.67, значительное рассеяние точек, особенно вблизи нуля, указывает на возможное влияние тепловой инерции грунта и стабильных температурных условий, характерных для глубин ниже глубины промерзания.

3.2 Оценка климатических изменений на основе новых источников информации

Почва является естественным фильтром, сглаживающим высокочастотные (суточные, сезонные) колебания температуры. Начиная с некоторой глубины, на нижней границе деятельного слоя происходит уже регистрация климатических изменений. Чем глубже, тем более низкочастотные колебания климата будут регистрироваться. Поэтому дополнительно к математическим методам фильтрации и декомпозиции многолетних временных рядов температур воздуха, можно использовать и температуру грунта на разных глубинах, где эти высокочастотные колебания разных временных масштабов будут выделены естественным путем.

Итогом анализа стало подтверждение зависимости температурного режима пород от географической широты, климата и теплофизических свойств

грунта. Для точной оценки температурного режима необходимо учитывать все эти факторы, а также проводить комплексные измерения и расчёты.

3.2.1 Теоретические сведения

Ключевым параметром, описывающим температурный режим горных пород, является температура на глубине нулевых годовых амплитуд. Её можно определить расчётным способом или экспериментально, через натурные измерения [18].

Поскольку проведение круглогодичного мониторинга температуры пород во время геокриологической съемки не всегда осуществимо, для оценки среднегодовой температуры применяют приближённый метод, основанный на разовом измерении температуры в скважине [16,17].

При длительных периодических колебаниях температуры на поверхности в массиве пород возникают синхронные колебания с тем же периодом T , при этом их амплитуда экспоненциально затухает с увеличением глубины (первый закон Фурье):

$$A_z = A_{\pi} e^{-z\sqrt{\pi/aT}} \quad (3.5)$$

$$z = \sqrt{aT/\pi} \ln(A_{\pi}/A_z) \quad (3.6)$$

где:

z — мощность слоя, на поверхности которого амплитуда колебаний равна A_{π} , а на его подошве A_z ;

a — коэффициент температуропроводности грунтов;

T — период колебаний температуры.

В случае годовых колебаний температуры ($T = 8760$ ч) при $A_z = \varepsilon$,

При годовых колебаниях температуры (период $T=8760$ часов), если амплитуда колебаний на глубине z достигает значения $A_z=\varepsilon$ (где ε — погрешность измерений температуры в скважинах, обычно $0,1^\circ\text{C}$), можно считать, что на этой глубине колебания фактически исчезают. Таким образом, глубина z соответствует глубине затухания годовых температурных колебаний (глубине «нулевых» амплитуд), обозначаемой как $z=H_0$. В этом случае уравнение (3.6) принимает вид:

$$H_0 = \sqrt{aT/\pi} \ln(A_p/0,1) \quad (3.7)$$

Как следует из уравнения (3.7), глубина проникновения годовых температурных колебаний зависит от двух ключевых факторов:

- коэффициента температуропроводности грунтов;
- амплитуды колебаний температуры на земной поверхности.

Данная закономерность справедлива только для районов, где отсутствуют как многолетняя, так и сезонная мерзлота. Если же наблюдается сезонное промерзание или оттаивание (ξ), то фазовые переходы влаги значительно нарушают указанную зависимость. В таких условиях глубину H_0 следует определять как сумму:

$$H_0 = \xi + h \quad (3.8)$$

где:

ξ — мощность слоя сезонного промерзания или оттаивания;

h — глубина распространения годовых колебаний температуры, отсчитываемая от подошвы слоя ξ .

При этом величину h можно рассчитать по формуле (3.7), поскольку в этой зоне фазовые переходы уже не происходят. Её значение будет

определяться теплофизическими характеристиками пород в слое h и амплитудой колебаний температуры на границе подошвы слоя $\xi(A_\xi)$. При отсутствии асимметрии огибающих температурных кривых, A_ξ должна равняться t_ξ , что и показывает равенство (3.8). В свою очередь h равно:

$$h = \sqrt{aT/\pi} \ln(t_\xi/0,1) \quad (3.9)$$

Без учёта геотермического градиента, t_{H0} можно принять равной t_ξ . По данным температурных измерений в скважине (на произвольную дату) можно аналитически подобрать значение глубины h , что позволит определить температуру t_{H0} . Эта величина будет приблизительно соответствовать среднегодовой температуре геологического разреза.

Если в изучаемом интервале присутствует геотермический градиент, то температура на глубине сезонного промерзания/оттаивания (t_ξ) будет отличаться от t_{H0} на определённую величину. Геотермический градиент может быть определён из следующего уравнения:

$$g = (t_{h1} - t_h)/(h_1 - h) \quad (3.10)$$

t_h – температура пород на некоторой глубине h_1 ниже слоя нулевых годовых амплитуд.

В соответствии с (3.10), уравнение (3.9) можно переписать следующим образом:

$$t_\xi = t_h - (t_{h1} - t_h)h/(h_1 - h) \quad (3.11)$$

$$A_\xi = t_\xi \rightarrow h = \sqrt{aT/\pi} \ln([t_h - (t_{h1} - t_h)h/(h_1 - h)]/0,1) \quad (3.12)$$

Для решения задачи можно использовать метод подбора параметров, анализируя график вертикального распределения температуры, построенный по данным скважинных измерений. При этом необходимо соблюдать важное условие: величина h_1 должна превышать h как минимум на 10 метров. К температурному профилю обязательно прилагается:

- геологическая колонка с литологической характеристикой пород
- данные о теплофизических свойствах вмещающих отложений
- отметка глубины сезонного промерзания/оттаивания

Для того чтобы найти среднегодовую температуру пород t_{H_0} , необходимо определить глубину H_0 . В случае безградиентной температурной кривой с предполагаемой глубины h , отсчитанной от подошвы слоя ξ , снимается значение температуры, которую принимают равной t_ξ , рассчитывается средневзвешенное значение a для выбранного слоя h . Значения t_h , h и a подставляются в уравнение (3.9). Расчёт повторяется до тех пор, пока выбранные значения t_h и h не обеспечат тождества. В этом случае глубина $(h+\xi)$ является глубиной нулевых годовых амплитуд, а температура пород на этой глубине и есть искомая температура. Аналогично решается задача и с учетом геотермического градиента. Исследование температурного режима горных пород требует комплексного анализа всех ключевых природных факторов, влияющих на процессы теплообмена.

3.2.2 Анализ температурных профилей, построенных с использованием новых данных

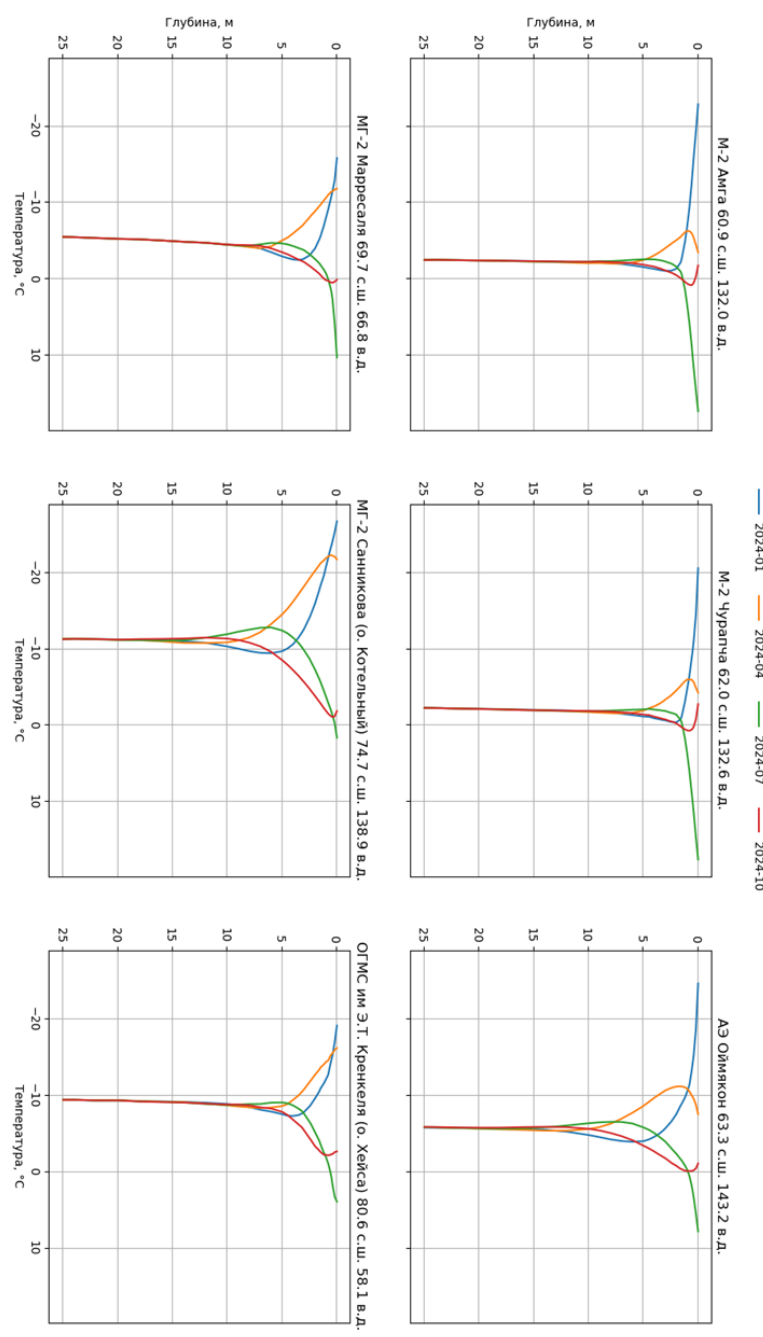


Рисунок 3.6 Среднемесячные температурные профили грунта, построенные за 2024-й год для различных пунктов мониторинга

Представленные на рисунке 3.6 данные позволяют детально изучить особенности распределения температуры грунта на разных глубинах в нескольких географических точках, расположенных преимущественно в северных широтах. Каждая из этих локаций обладает уникальными климатическими и геологическими характеристиками, что отражается на поведении температурных профилей. Рассмотрим каждый график в отдельности, чтобы выявить общие закономерности и локальные особенности.

Начнём с точки М-2 Амга, расположенной на 60.9° северной широты и 132.0° восточной долготы. На графике чётко прослеживается тенденция к снижению температуры с увеличением глубины. Примерно с 15 до 25 метров наблюдается практически постоянная температура, что свидетельствует о затухании теплового воздействия с поверхности. Такая картина типична для регионов с выраженными сезонными колебаниями температур, где тепло проникает лишь на ограниченную глубину, не достигая нижних слоёв грунта.

Переходя к следующей точке — М-2 Чурапча (62.0° с.ш., 132.6° в.д.), можно отметить, что при переходе к 15-метровой отметке температура также начинает снижаться, но этот процесс происходит менее резко, чем в случае с Амгой. Такое различие может быть обусловлено рядом факторов, включая различия в составе грунта и теплопроводности. Кроме того, нельзя исключать влияние локальных геологических особенностей, таких как наличие подземных вод или специфический минералогический состав почвы.

Третья точка, МГ-2 Марресаля (69.7° с.ш., 66.8° в.д.), расположена значительно севернее предыдущих, в арктической зоне. В отличие от предыдущих локаций, температурные значения на всех глубинах оставались стабильно низкими, с минимальными колебаниями. Это характерно для районов распространения вечной мерзлоты, где сезонное протаивание затрагивает лишь самые верхние слои грунта, а на глубине температура остаётся практически неизменной в течение всего года. Незначительные изменения температуры между 15 и 25 метрами подтверждают, что в этом

регионе тепловое воздействие с поверхности крайне ограничено, а грунт находится в промёрзшем состоянии на значительной глубине.

Следующая точка, МГ-2 Санникова (о. Котельный, 74.7° с.ш., 138.9° в.д.). Остров Котельный находится в зоне сплошной многолетней мерзлоты, где сезонные колебания температуры поверхности практически не влияют на глубокие слои грунта. Однако для более точного анализа необходимо располагать информацией о глубине измерений, так как даже в условиях вечной мерзлоты могут наблюдаться незначительные изменения температуры в верхних слоях.

Пятая точка, АЭ Оймякон (63.3° с.ш., 143.2° в.д.). Эта локация находится в зоне резко континентального климата, для которого характерны экстремальные перепады температур между сезонами. Зимой здесь возможны сильные морозы, а летом — относительно высокие температуры. В таких условиях можно ожидать значительных колебаний температуры грунта в верхних слоях, с быстрым затуханием теплового воздействия с глубиной, что и прослеживается на графике.

Наконец, данные с ОГМС им. Э.Т. Кренкеля (о. Хейса, 80.6° с.ш., 58.1° в.д.). Эта арктическая станция расположена в одном из самых холодных регионов, где грунт круглый год находится в промёрзшем состоянии. Температура здесь, остаётся стабильно низкой на всех исследованных глубинах, с минимальными сезонными вариациями.

Подводя итоги, можно выделить несколько общих закономерностей. Во-первых, наблюдается чёткая зависимость температуры грунта от географической широты: чем севернее расположена точка, тем ниже температурные значения и слабее сезонные колебания. Во-вторых, во всех локациях прослеживается снижение температуры с глубиной, что отражает затухание теплового воздействия с поверхности. В-третьих, на о. Котельный и в Оймяконе, глубина нулевых амплитуд температуры совпадает и находится глубже чем в остальных пунктах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в первой главе анализ данных о температуре грунта в зоне многолетней мерзлоты России за период 1963-2023 годов, полученных с 264 метеорологических станций, выявил устойчивую тенденцию к потеплению, имеющую выраженную пространственную дифференциацию. Наиболее интенсивный рост температур зафиксирован в высокоширотных районах, где на станциях о. Визе и о. Голомянный отмечено увеличение температур на 0,18 и 0,16°C/год соответственно на глубине 0,8 метра. В южных районах криолитозоны, таких как Якутск, темпы потепления оказались существенно ниже - 0,03°C/год на глубине 2,4 метра. Особую тревогу вызывает сокращение количества станций, фиксирующих устойчиво отрицательные температуры грунта за период наблюдений, что свидетельствует о прогрессирующей деградации многолетней мерзлоты.

Анализ температурного режима на глубине 3,2 метра, показал существенные изменения в различных регионах. В Верхоянске, несмотря на значительный рост температур (до 3,7°C в зимние месяцы), значения остаются отрицательными, хотя в октябре уже приближаются к нулевой отметке (-2,3°C). В Якутске положительные температуры на этой глубине теперь наблюдаются с сентября по ноябрь, тогда как ранее они отсутствовали. В Олекминске и Кош-Агаче период с положительными температурами увеличился до 6 месяцев в году, что свидетельствует о переходе этого горизонта в зону сезонного протаивания. Эти изменения указывают на необходимость пересмотра традиционных представлений о глубине залегания многолетней мерзлоты и разработки новых подходов к ее мониторингу.

Полученные результаты убедительно демонстрируют необходимость модернизации системы наблюдений за мерзлотными грунтами. В первую очередь требуется внедрение автоматизированных методов измерений, позволяющих получать непрерывные данные о температурном режиме грунтов. Особое внимание следует уделить увеличению глубины мониторинга,

так как традиционная глубина 3,2 метра во многих регионах уже не отражает состояние многолетней мерзлоты. Не менее важной задачей является создание единого стандартизированного банка данных, который позволит объединить информацию из различных источников и обеспечить ее доступность для научного сообщества. Эти меры позволят повысить достоверность прогнозов и лучше понять динамику изменений в криолитозоне в условиях глобального потепления.

Описанный во второй главе процесс обработки данных термометрического мониторинга представляет собой комплексное решение, включающее несколько ключевых компонентов. Для сбора исходных данных было создано специализированное программное обеспечение, состоящее из двух взаимосвязанных приложений: IMAP-клиента для получения данных с почтового сервера и парсера для преобразования полученной информации в единый стандартизированный формат. IMAP-клиент обеспечивает устойчивое подключение к серверу, автоматическую сортировку и сохранение вложений в соответствующие директории, что значительно упрощает процесс сбора данных с почтового сервера. Парсер выполняет критически важную функцию унификации данных, поступающих от различных типов устройств (как оснащенных GPS-приемниками, так и передающих координаты через систему IRIDIUM), что позволяет работать с единым форматом данных на последующих этапах обработки.

Особое внимание было уделено решению проблемы географической привязки данных, возникающей вследствие частой замены термометрических устройств. Для этого был успешно применен алгоритм кластеризации DBSCAN, который продемонстрировал высокую эффективность в разделении данных по географическому признаку. Алгоритм показал хорошие результаты даже в сложных условиях, когда требовалось различать кластеры с близко расположенными центрами (как в случае с поселком Актру) или отделять валидные данные от тестовых измерений (пример поселка Кош-Агач). Применение DBSCAN с методом силуэтов доказало свою эффективность для

кластеризации GPS-данных, но требует доработок для координат, определённых с помощью системы IRIDIUM. Полученные результаты указывают на возможность автоматизации привязки IMEI устройств к координатам скважин или БПН, что могло бы существенно оптимизировать работу системы мониторинга состояния вечной мерзлоты. Дальнейшие исследования следует направить на тестирование альтернативных алгоритмов и модификаций, методов определения оптимального числа кластеров, а также разработку гибридного подхода для данных с разной точностью, плотностью и формой кластеров. На данный момент, автоматическая кластеризация возможна только для координат, полученных с помощью GPS. Совместная обработка пока возможна только в полу ручном режиме.

Для выявления и устранения неоднородностей во временных рядах температурных данных была разработана оригинальная методика, основанная на вейвлет-анализе и робастных статистиках. Применение биортогонального вейвлета bior3.1 позволило эффективно выделить и удалить сезонную компоненту и тренд из исходных данных, что особенно важно для анализа температурных колебаний в мерзлых грунтах. Последующее использование медианного абсолютного отклонения (MAD) вместо стандартного отклонения обеспечило устойчивость алгоритма к наличию выбросов в данных. Разработанный подход показал свою эффективность при анализе данных с 82 пунктов мониторинга, продемонстрировав способность надёжно выявлять аномалии, связанные с техническими неисправностями оборудования.

Практическая значимость проведенной работы заключается в создании инструментария для обработки данных термометрического мониторинга, который может быть использован как в научных исследованиях динамики мерзлых грунтов, так и в прикладных задачах. Автоматизация процессов обработки данных значительно сокращает временные затраты на их анализ и минимизирует влияние человеческого фактора.

Проведенное во второй главе исследование продемонстрировало значительный потенциал новых методов мониторинга температур грунтов для

оценки климатических изменений в криолитозоне. Корреляционный анализ данных, полученных с помощью традиционных вытяжных термометров и современных термометрических устройств, показал высокую степень согласованности измерений на большинстве исследованных глубин (0.2-3.2 м). Особенно сильная корреляция ($R^2=0.98$) была выявлена на станции АЭ Оймякон для глубин 0.2, 0.4, 0.8 и 1.6 м, что подтверждает надежность новых методов измерений и возможность их взаимозаменяемого использования с традиционными. Однако на глубине 1.2 м в том же пункте была обнаружена существенно более слабая корреляция ($R^2=0.18$), что объясняется синергетическим эффектом попадания периода наблюдений на переходный сезон и существенной разницы в методике измерений. Для более точной оценки возможности использования новых источников информации нужны более продолжительные ряды наблюдений, однако уже сейчас, после предварительного корреляционного анализа, возможно использование этих данных как наилучшей альтернативы.

Анализ температурных профилей, построенных по новым данным, позволил выявить четкие географические закономерности в распределении температур грунта. Установлено, что в арктических регионах (например, на станции МГ-2 Марресаля и ОГМС им. Э.Т. Кренкеля) температурные значения остаются стабильно низкими на всех исследованных глубинах (до 25 м) с минимальными сезонными колебаниями, что характерно для зон сплошной многолетней мерзлоты. В то же время в более южных районах (например, М-2 Амга и М-2 Чурапча) наблюдается выраженное снижение температуры с глубиной с постепенным затуханием сезонных колебаний. Особый интерес представляют данные по станции АЭ Оймякон, расположенной в зоне резко континентального климата, где зафиксированы наиболее значительные сезонные колебания температур в верхних слоях грунта.

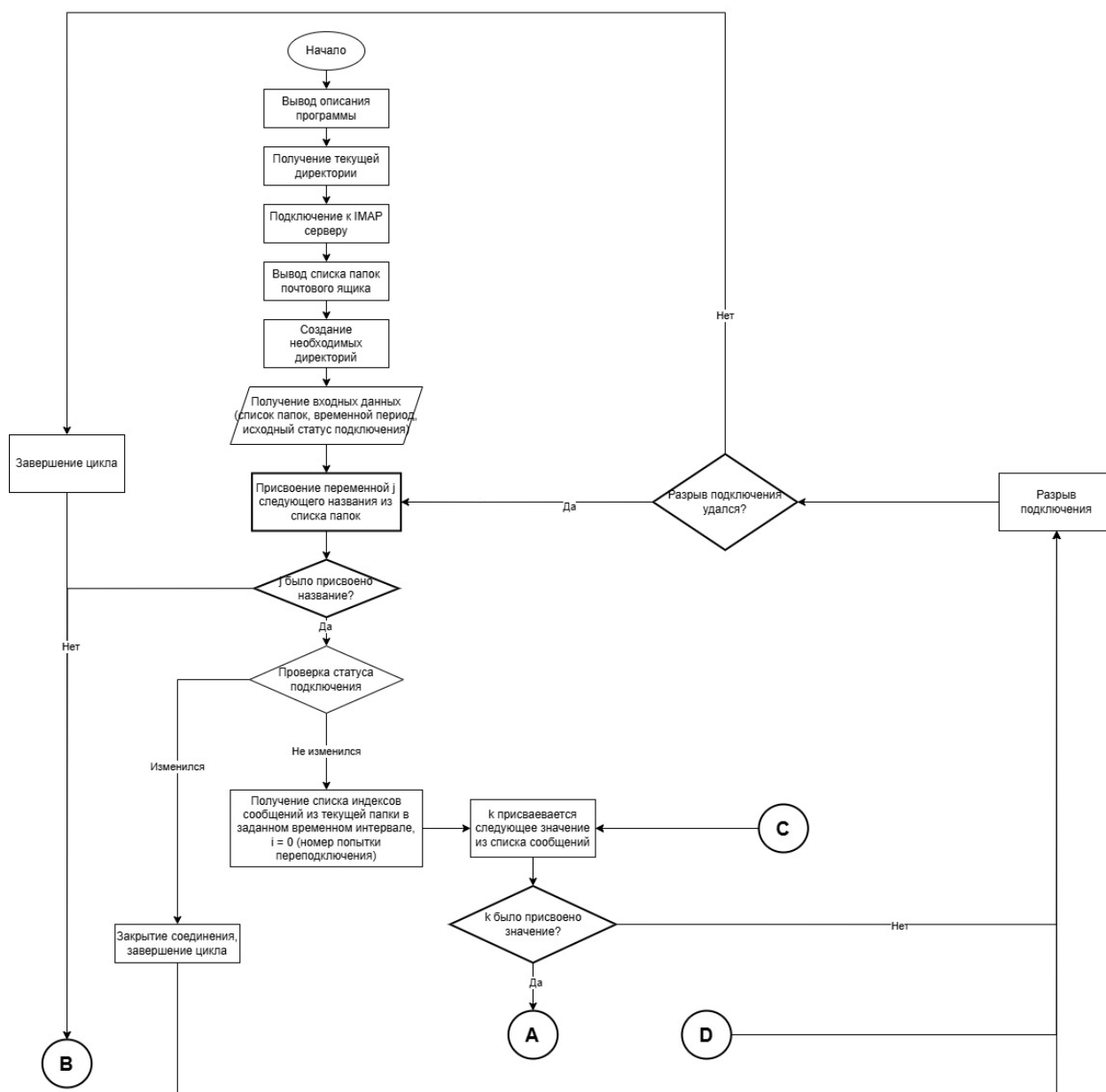
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

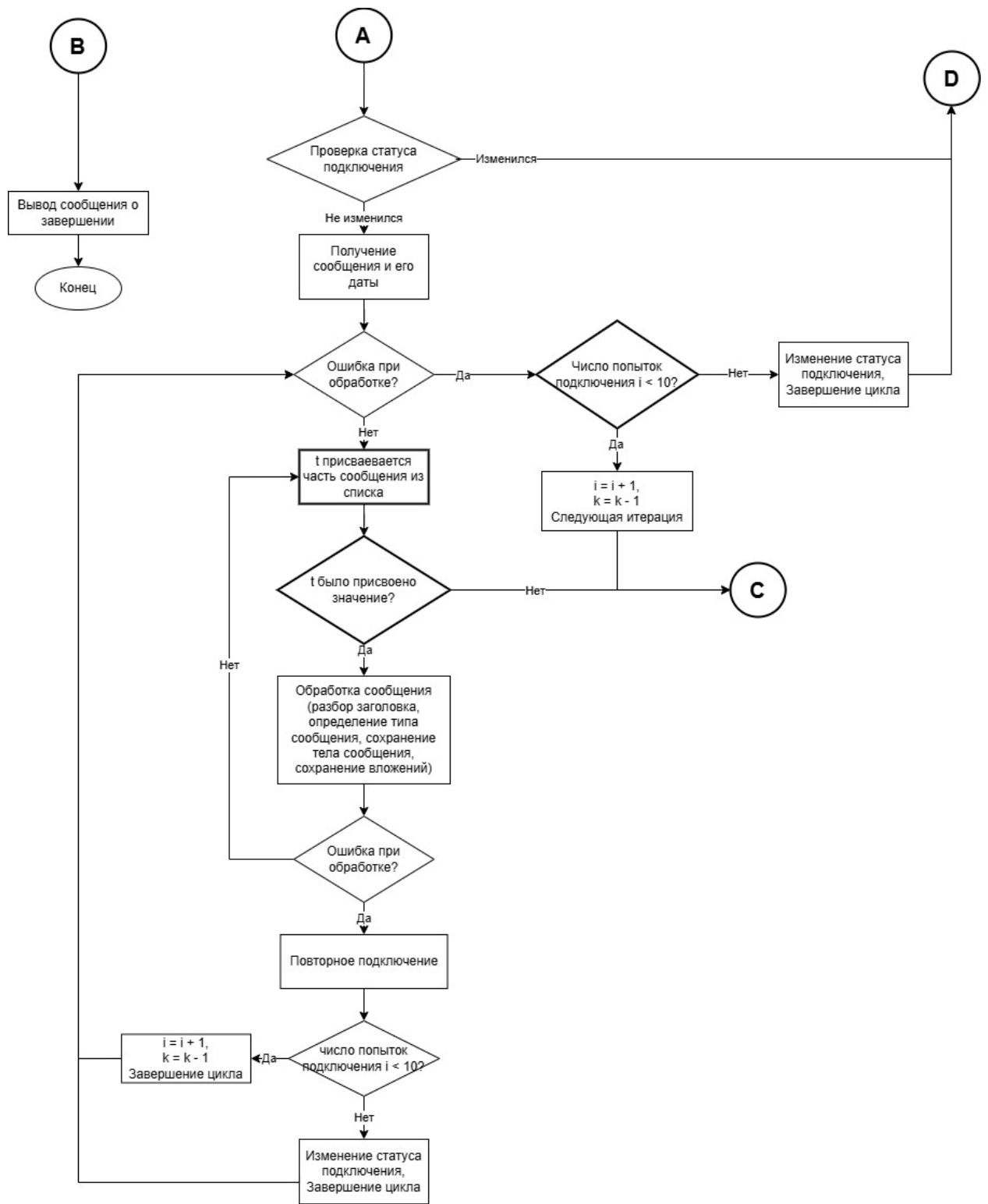
1. О проекте GTN-P [Электронный ресурс] // Arctic Portal. – URL: <https://gtnp.arcticportal.org/about-the-gtnp/introduction-to-the-gtn-p> (дата обращения: 25.05.2025).
2. Информационные системы и технологии [Электронный ресурс] // ВНИИГМИ-МЦД. – URL: <http://meteo.ru/activity/it/> (дата обращения: 25.05.2025).
3. Demidov N. E., Anisimov O. A., Anisimov M. A. et al. Conception and first results of the Russian National System of Background Permafrost Monitoring // *Advances in Polar Science*. – 2025. – Vol. 36, № 1. – P. 51–60. – DOI: 10.12429/j.advps.2024.0036.
4. Примеры сравнения алгоритмов кластеризации [Электронный ресурс] // Scikit-learn. – URL: https://scikit-learn.org/stable/auto_examples/cluster/plot_cluster_comparison.html (дата обращения: 25.05.2025).
5. Документация DBSCAN [Электронный ресурс] // Scikit-learn. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.DBSCAN.html> (дата обращения: 25.05.2025).
6. Метрика силуэта (silhouette_score) [Электронный ресурс] // Scikit-learn. – URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.silhouette_score.html (дата обращения: 25.05.2025).
7. Парные расстояния (pairwise_distances) [Электронный ресурс] // Scikit-learn. – URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.pairwise_distances.html (дата обращения: 25.05.2025).
8. Температура почвы [Электронный ресурс] // Meteo.ru. – URL: <http://meteo.ru/data/temperature-precipitation> (дата обращения: 23.05.2025).

9. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Метеорологические наблюдения на станциях. Ч. I / Госкомгидромет СССР; [ред. коллегия: О.А. Городецкий (пред.) и др.]; отв. ред. Д.П. Беспалов. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. — URL: https://meteo59.ru/files/books/Наставление_гидромет_станциям_и_постам-вып.3_ч.1.pdf (дата обращения: 05.07.2024).
10. GTN-P Borehole Database // Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). — URL: <http://gtnpdatabase.org/boreholes> (дата обращения: 05.07.2024)
11. geojson.io: a web-based GeoJSON editor and converter [Электронный ресурс]. — URL: <https://geojson.io> (дата обращения: 05.07.2024).
12. [scipy.stats.linregress](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.linregress.html) [Электронный ресурс] // SciPy Documentation. — URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.linregress.html> (дата обращения: 05.07.2024).
13. Thorne P. W., Allan R. J., Ashcroft L. et al. Toward an integrated... // Bulletin of the American Meteorological Society. 2017. Vol. 98, № 12. P. 2539-2558.
14. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. Кн. 1. В 2 кн.: учебник. — СПб.: РГГМУ, 2016. — 332 с.
15. Демидов Н.Э., Баранюк В.В., и др. Новые данные о мерзлотных условиях острова Врангеля // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. - Выпуск 11. — 2024г. - DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-512-519
16. Полевые методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова, Г.И. Гордеевой. М.: Изд-во МГУ, 1986. 142 с.
17. Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований. Под ред. В.А. Королева, Г.И. Гордеевой, С.О. Гриневского, В.А. Богословского. М.: Изд-во МГУ, 2000. 352 с.

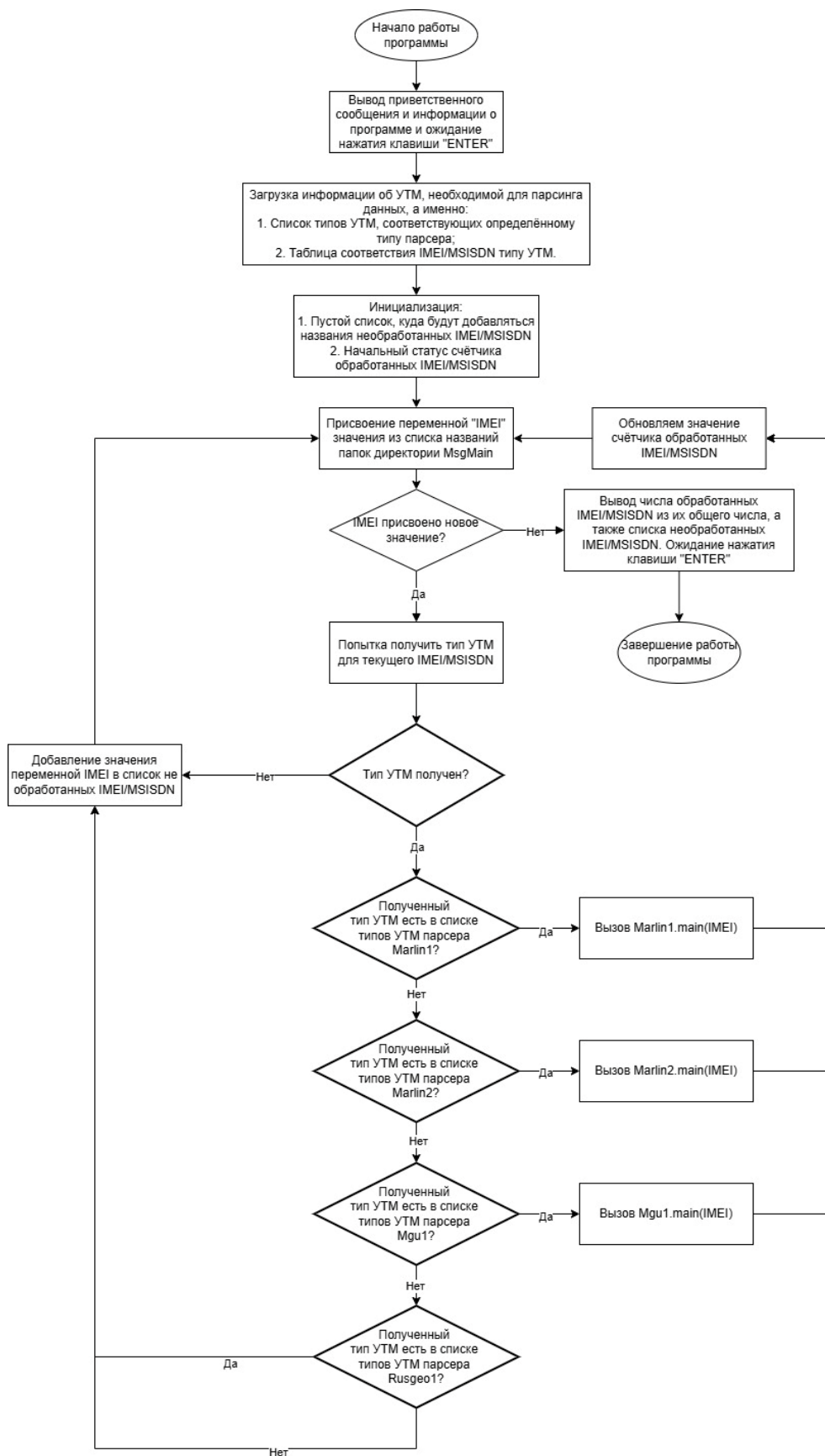
18. Методы геокриологических исследований: Учеб. пособие / М54 Под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ. 2004. — 512 с: ил. ISBN 5-211-06121-7
19. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Климатические изменения и многолетняя мерзлота: прогнозы и риски. — СПб.: Наука, 2021. — 245 с.
20. Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения криолитозоны России в условиях глобального потепления. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2022. — 180 с.
21. Romanovsky V.E., Smith S.L., Isaksen K. Permafrost Thermal State in the Polar Northern Hemisphere During the International Polar Year 2007–2009: A Synthesis // Permafrost and Periglacial Processes. — 2022. — Vol. 33, No. 1. — P. 6–34.
22. Гребенец В.И., Лейбман М.О. Деградация многолетней мерзлоты в Западной Сибири: анализ данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений // Криосфера Земли. — 2023. — Т. 27, № 2. — С. 15–28.
23. Шполянская Н.А., Замолодчиков Д.Г. Прогноз изменения мощности деятельного слоя мерзлоты в условиях различных климатических сценариев // Лёд и Снег. — 2022. — Т. 62, № 3. — С. 345–360.
24. Biskaborn B.K. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. — 2023. — Vol. 14, No. 1. — P. 1–12. DOI: 10.1038/s41467-023-42131-7

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Упрощённая блок-схема программы “MailCollector” для получения данных с почтового сервера.

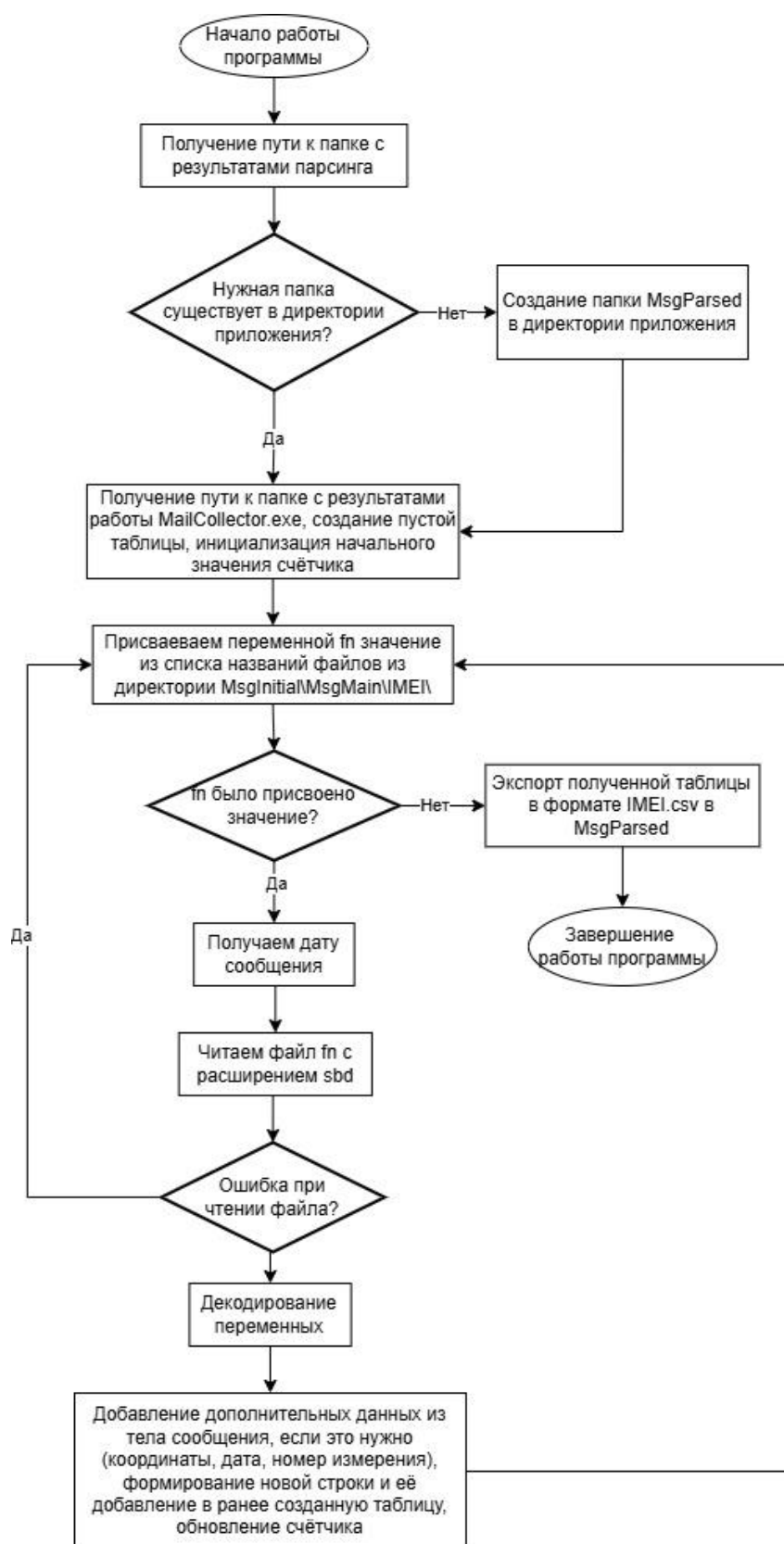




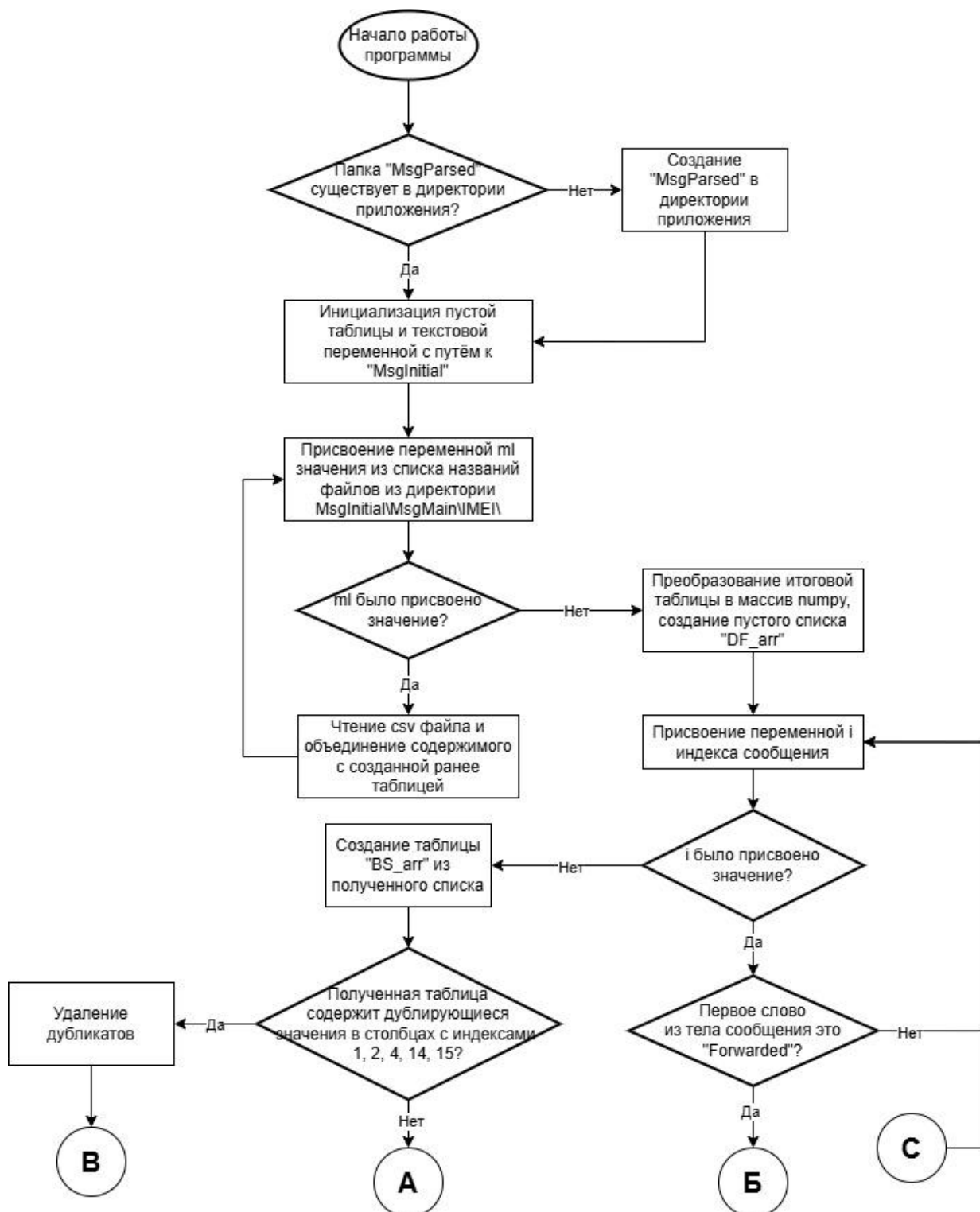
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Упрощённая блок-схема программы “MailParser” для преобразования данных, полученных “MailCollector”.

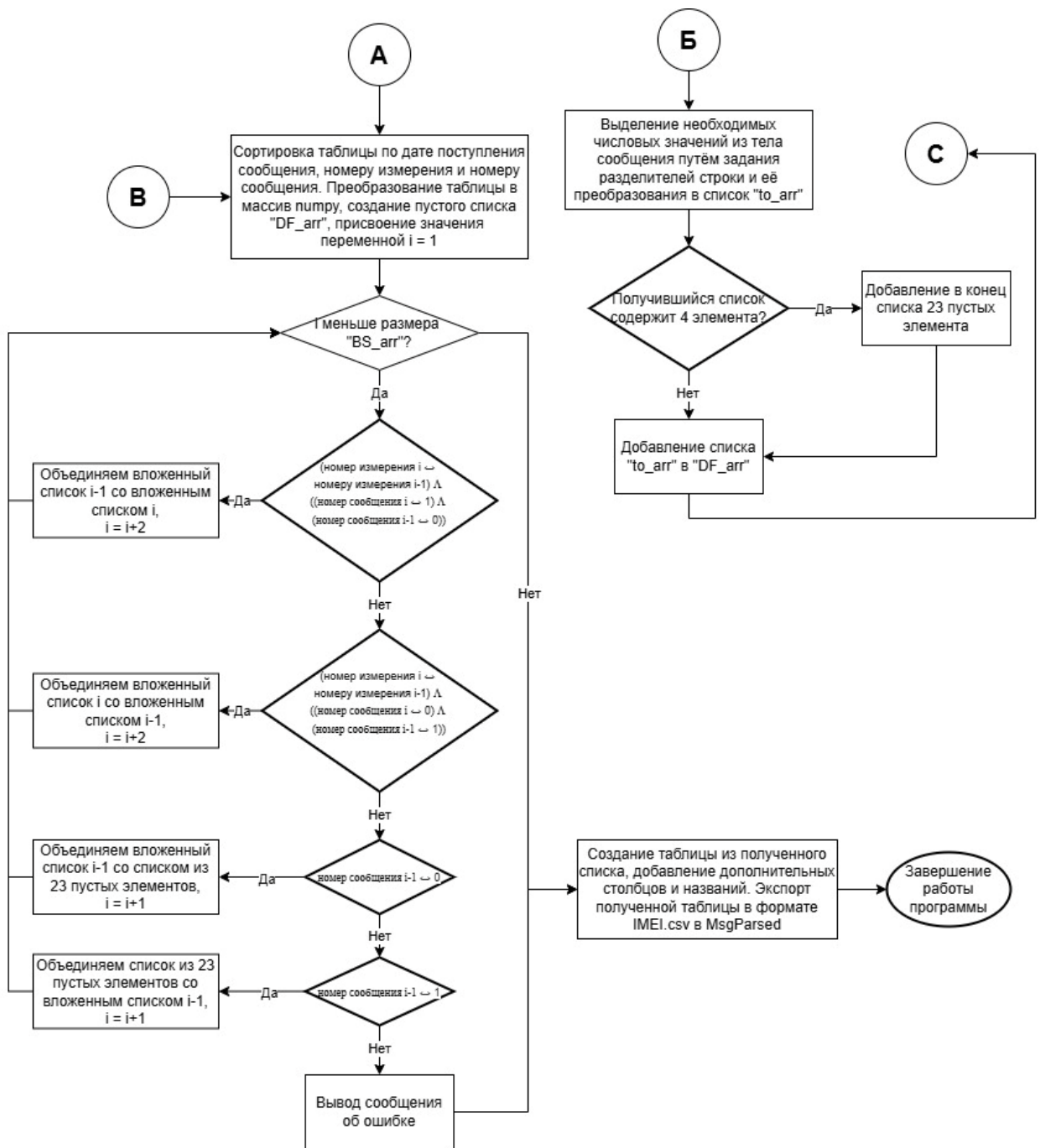


ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Упрощённая блок-схема подпрограмм “Marlin1” и “Mgu1”, вызываемых из “MailParser”.

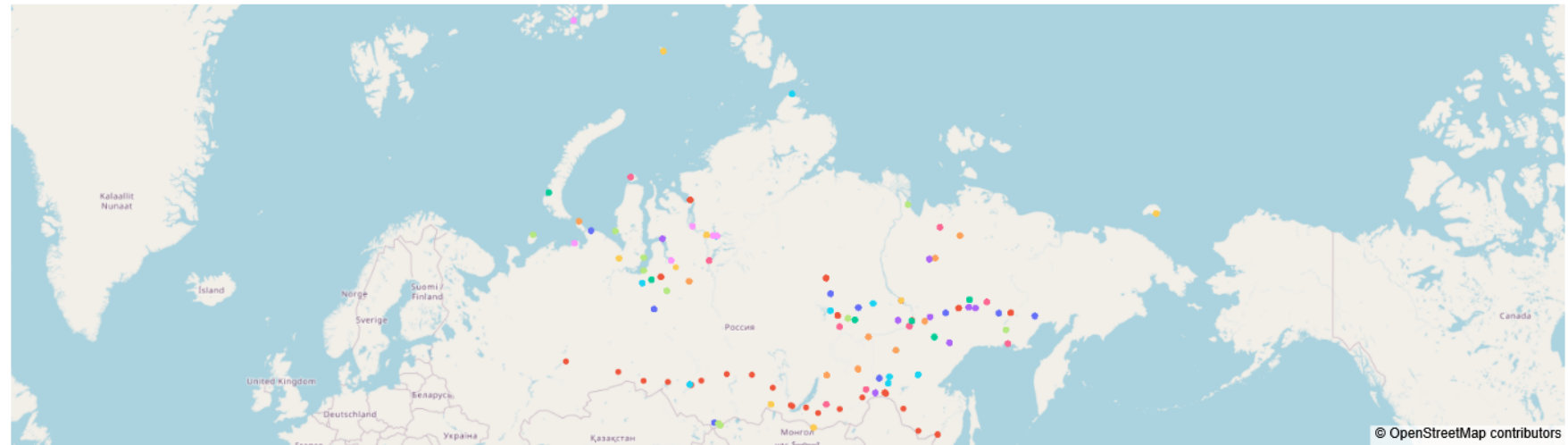


ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Упрощённая блок-схема подпрограммы “Marlin2”, вызываемой из “MailParser”.





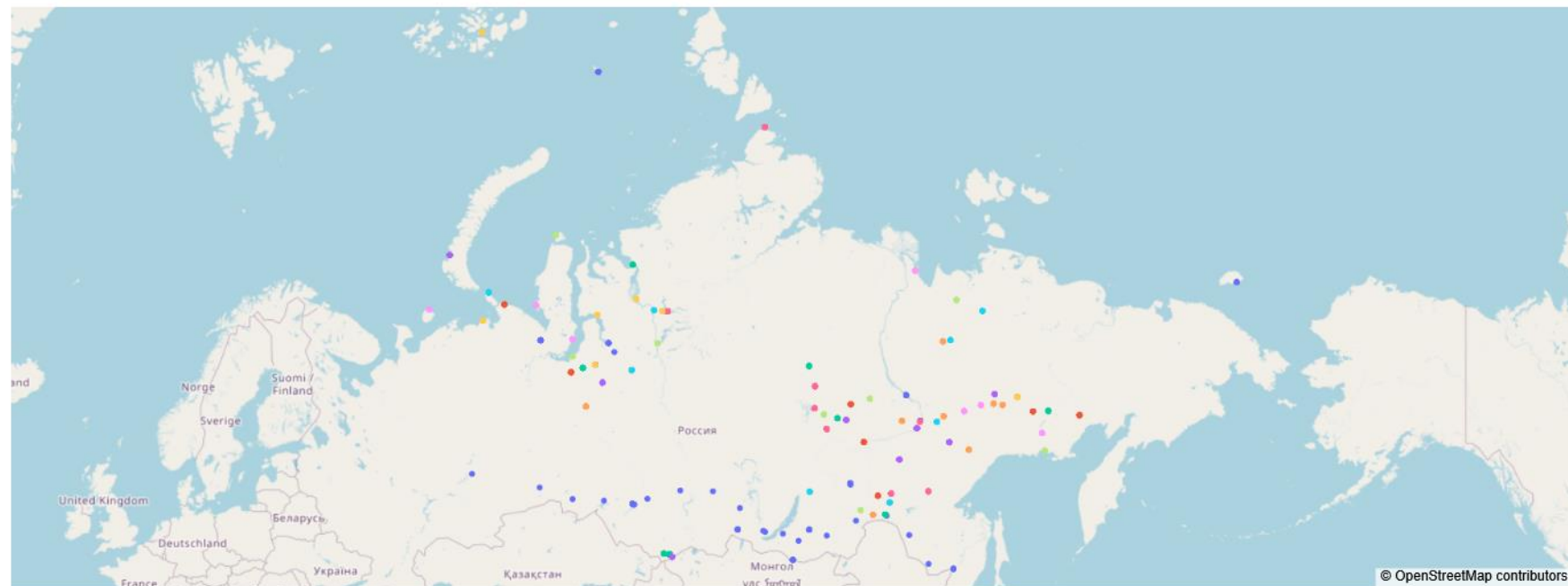
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Местоположения, переданные с устройств с GPS-модулем, до кластеризации



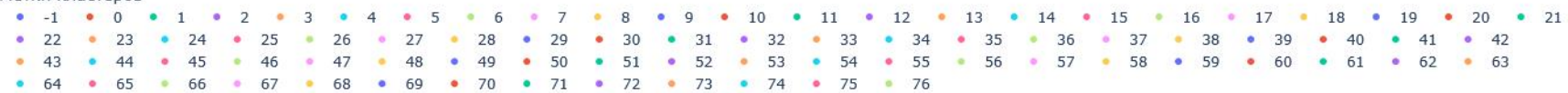
Идентификаторы сообщений

[illegible]

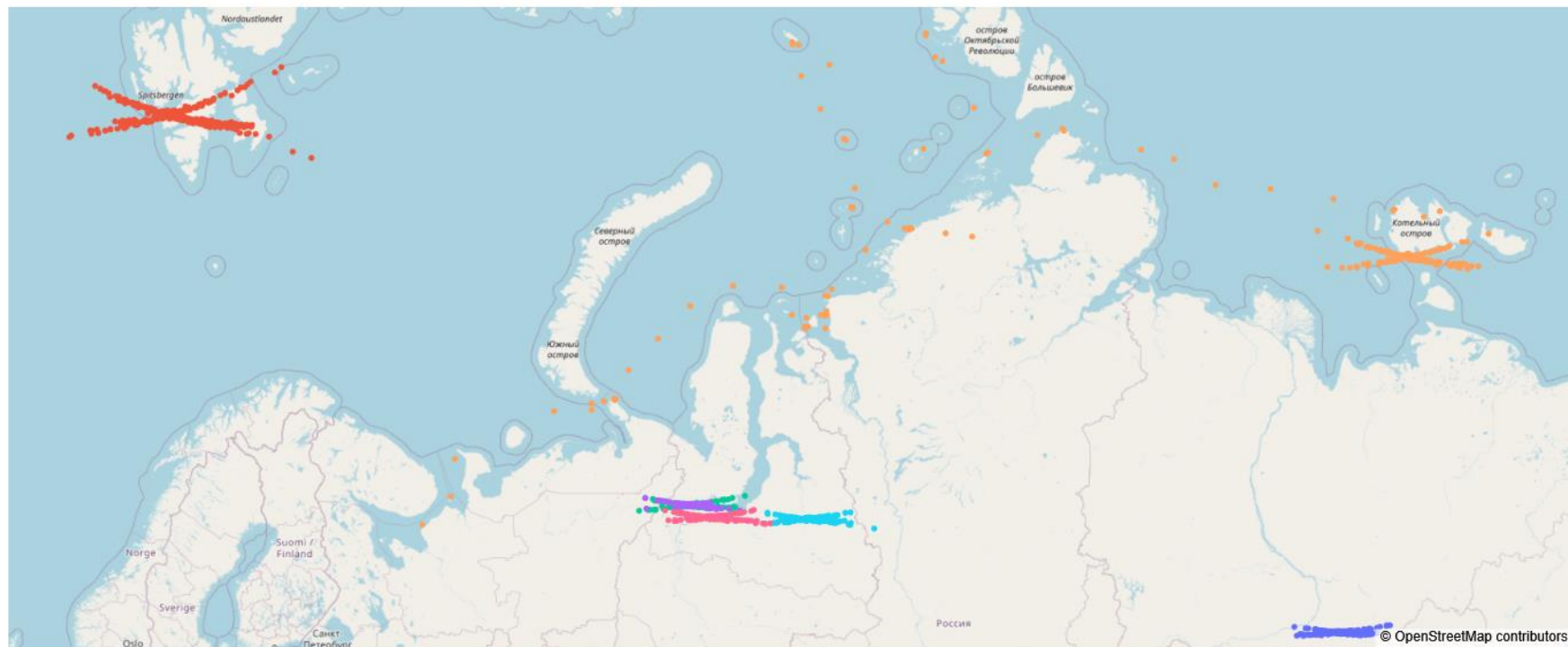
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Местоположения, переданные с устройств с GPS-модулем, после кластеризации



Метки кластеров



ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Местоположения, переданные с устройств без GPS модуля, до кластеризации



Идентификаторы сообщений

● 300234069701800 ● 300234069705780 ● 300234069707830 ● 300234069900230 ● 300234069905210 ● 300434069405210 ● 300434069408150

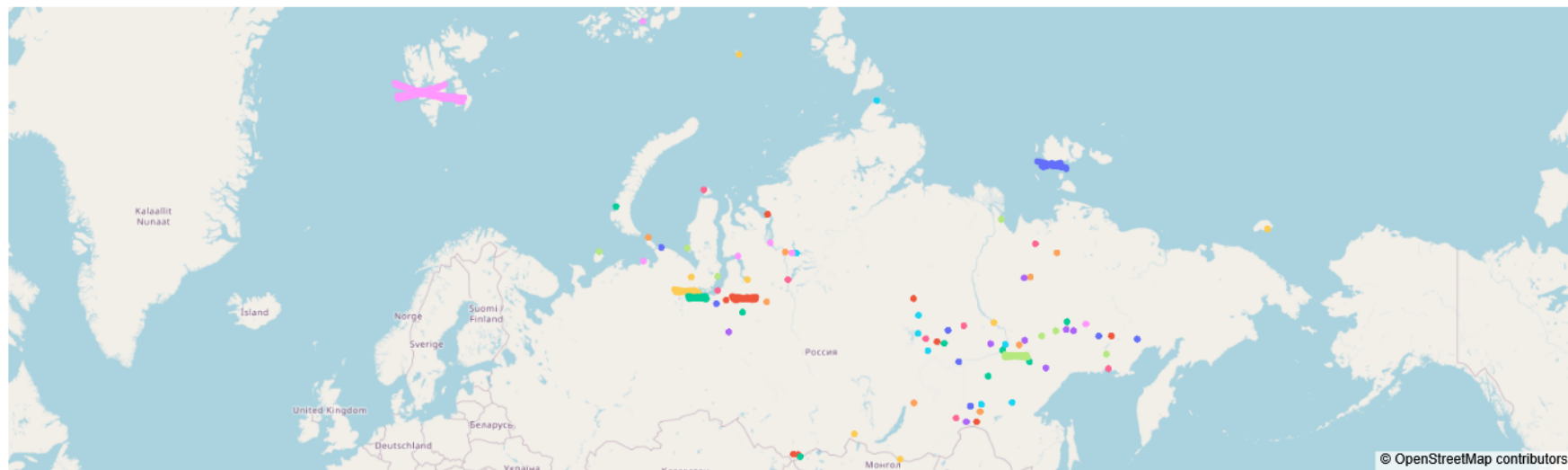
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Местоположения, переданные с устройств без GPS модуля, после кластеризации



Метки кластеров

• 0 • -1 • 1 • 2 • 3 • 4 • 5

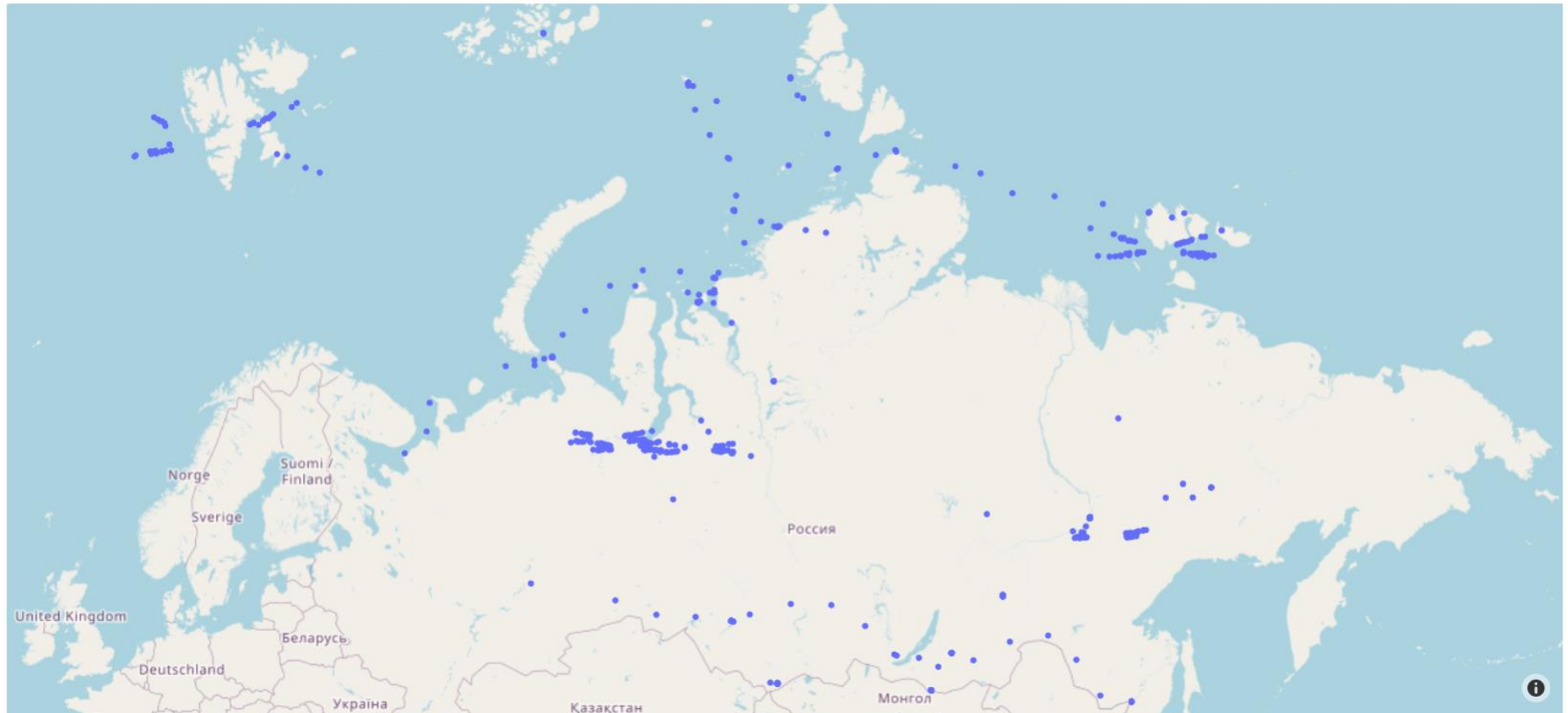
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Местоположения после объединения данных и присвоения меткам названий базовых пунктов



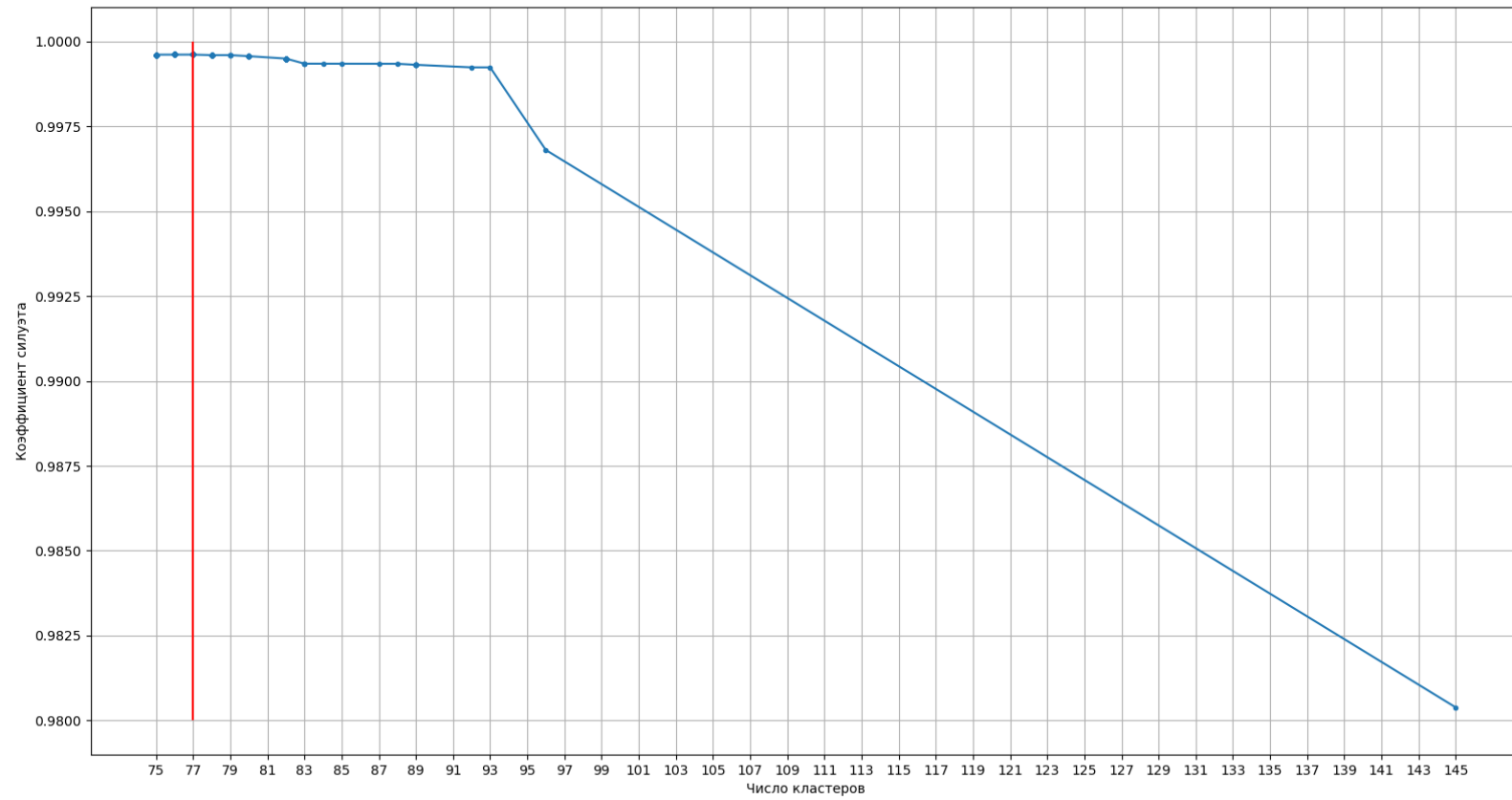
Названия кластеров

- АМСГ-2 Нюрба
 ● М-2 Крестьях
 ● А Покровск
 ● М-2 Ытык-Кюёль
 ● АМСГ-2 Батагай
 ● ОГМС им. Е.К. Федорова
 ● ППП-3 Усть-Куйга
 ● МГ-2 Колгуев Северный
- МГ-2 Варандей
 ● М-2 Орлик
 ● МГ-2 Амдерма
 ● ОГ Айхал
 ● АЭ Малые Кармакулы
 ● ОГМС Верхоянск
 ● МГ-2 им. Е.К. Федорова
 ● О Чернышевский
 ● М-2 Игарка
- ГМО Тикси
 ● М-2 Караул
 ● М-2 Менза
 ● М-2 Сусуман
 ● М-2 Эльген, совхоз
 ● М-2 Юрты
 ● М-2 Агаякан
 ● АМСГ-4 Красноселькуп
 ● М-2 Токо
 ● М-2 Тупик
- МГ-2 Новый порт
 ● АМСГ-1 Новый Уренгой
 ● АМСГ-4 Тазовский
 ● АМСГ-1 Надым
 ● М-2 Пангоды
 ● М-2 Томмот
 ● М-2 Югоренок
 ● М-2 Чурапча
 ● ОГМС Якутск
- АЭ Вилуйск
 ● М-2 Восточная
 ● М-2 Делянكير
 ● МГ-2 Остров Врангеля
 ● М-2 Лопча
 ● МГ-2 Сопочная Карга
 ● АМСГ-4 Сунтар
 ● М-2 Бердигестях
 ● АМСГ-4 Депутатский
- ЦГМС Таймырский
 ● МГ-2 им. М.В. Попова
 ● МГ-2 Марресаля
 ● ОГМС им Э.Т. Кренкеля (о. Хейса)
 ● МГ-2 о. Визе
 ● АМС Актру_1
 ● АМС Актру_2
 ● ОГМС Тарко-Сале
- АЭ Оймякон
 ● М-3 Уоян
 ● М-2 Нагорный
 ● М-2 Армань
 ● ОГМС Усть-Омчуг
 ● АМСГ-4 Норильск
 ● АМС Лаборовая
 ● СЛ Омсукчан
 ● М-2 Сковородино
- АМСГ-4 Усть-Мая
 ● М-2 Ерофей Павлович
 ● ГМБ-2 Тында
 ● М-2 Дорожный
 ● М-2 Ныда
 ● АМСГ-4 Теплый Ключ
 ● М-2 Антипаюта
 ● АМСГ-4 Сангары
 ● АМСГ-3 Олекминск
- М-2 Кош-Агач
 ● АМС Ташанта
 ● АМСГ-3 Ноябрьск
 ● АМС Дудинка
 ● М-2 Хабардино
 ● АМСГ-2 Мирный
 ● М-2 Амга
 ● ГМО СП Баренцбург
 ● М-2 Салехард М-II
- МГ-2 Санникова
 ● АМСГ-4 Уренгой
 ● М-2 Полуи

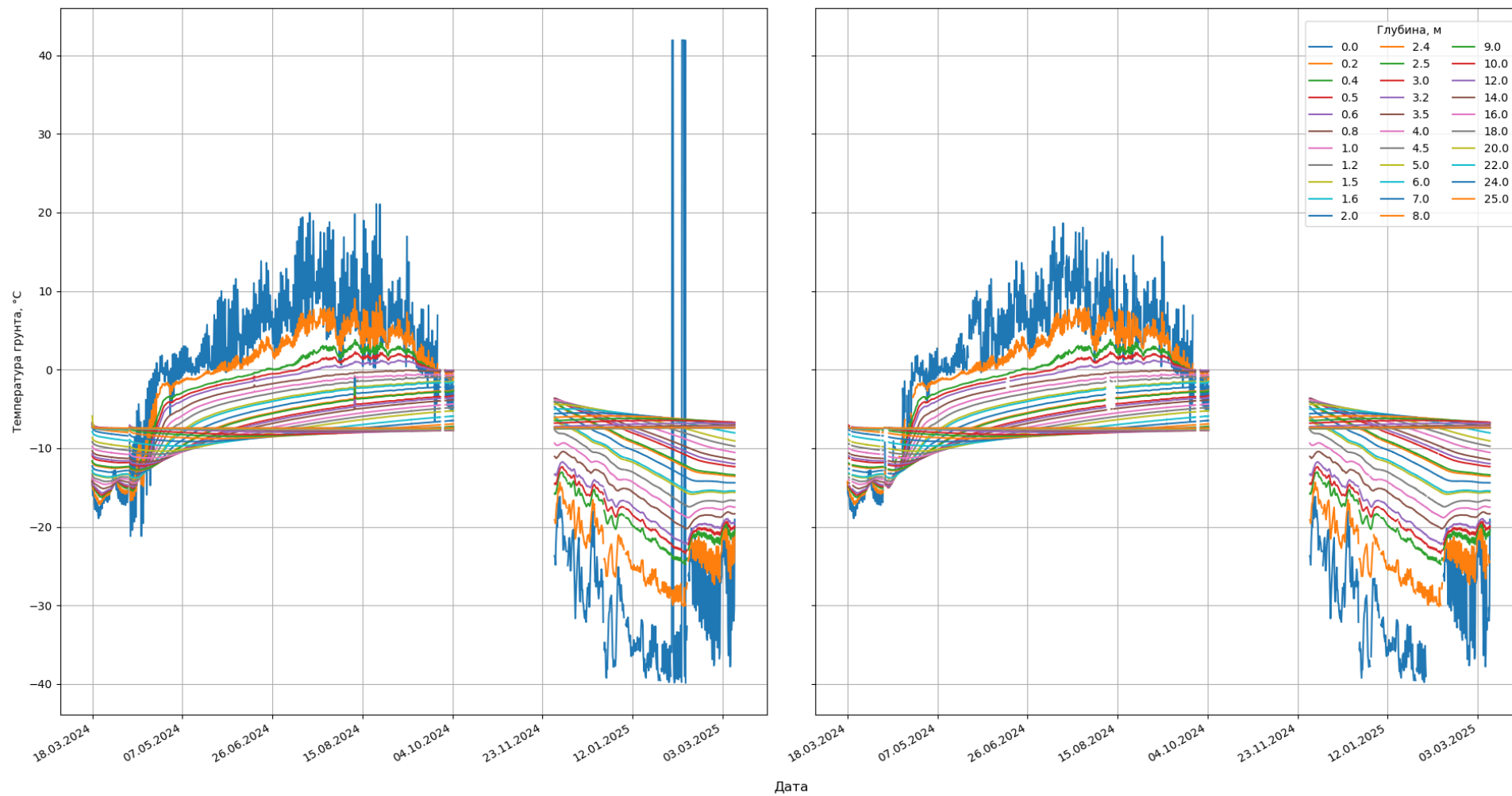
ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Местоположения, определённые DBSCAN как выбросы



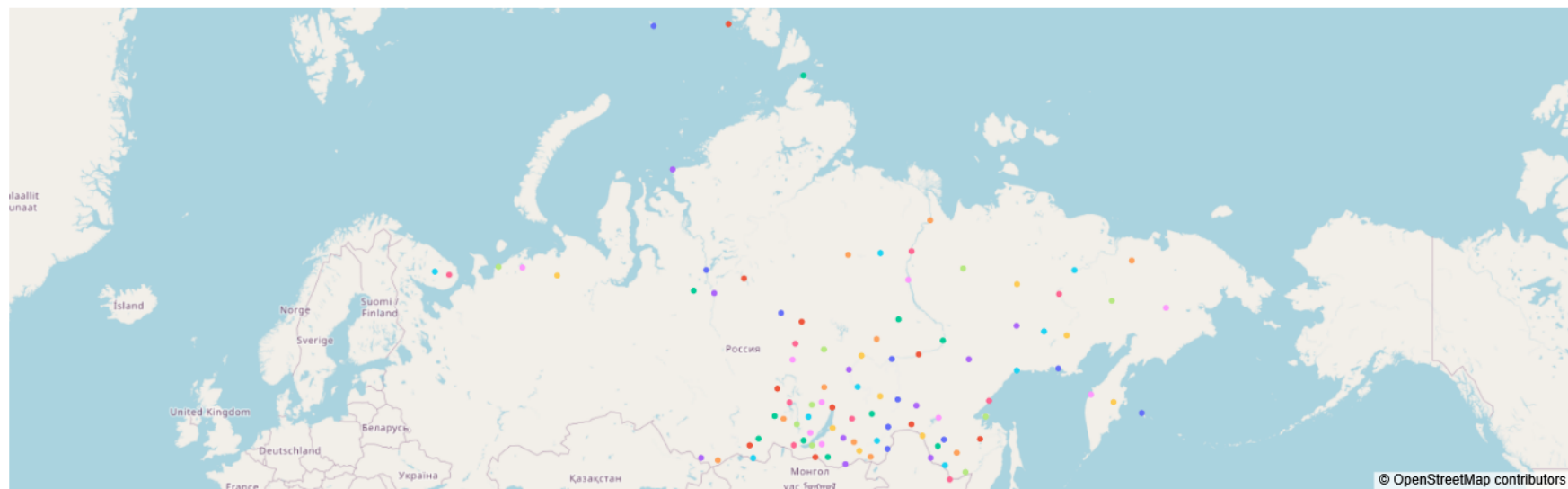
ПРИЛОЖЕНИЕ 11. График силуэта (Красной вертикальной линией отмечено максимальное значение)



ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Пример фильтрации выбросов в пункте М-2 Делянкир



ПРИЛОЖЕНИЕ 13. Метеостанции, на которых проводятся измерения температуры грунта, расположенные в пределах границ вечной мерзлоты



Идентификаторы сообщений

- О.Визе
- О.Голомянный
- Им.Е.К.Федорова
- О.Диксон
- Кюсюр
- Краснощелье
- Каневка
- Индига
- Нарьян-Мар
- Хоседа-Хард
- Игарка
- Агата
- Янов Стан
- Туруханск
- Оленек
- Сухана
- Джарджан
- Верхоянск
- Жиганск
- Усть-Момы
- Тура
- Кислокан
- Вилуйск
- Оймякон
- Сунтар
- Сусуман
- Стрелка Чуня
- Ербогачен
- Ванавара
- Ленск
- Олекминск
- Иситель
- Якутск
- Усть-Мая
- Островное
- Среднеколымск
- Зырянка
- Омолон
- Марково
- Среднекан
- Магадан
- Нагаева бухта
- Червянка
- Нижнеудинск
- Витим
- Киренск
- Мамакан
- Братск,обс.
- Орлинг
- Казачинское, АМСГ
- Чара
- Усть-Нюкжа
- Нижнеангарск
- Калакан
- Нагорный
- Тулун
- Жигалово
- Троицкий прииск
- Балаганск
- Баяндай
- Баргузин
- Могоча
- Сковородино
- Иркутск,обс.
- Сосново-Озерское
- Чита
- Среднекан
- Тунка
- Бабушкин
- Улан-Удэ,город
- Агинское
- Нерчинский з-д
- Кяхта
- Красный Чикой
- Кыра
- Борзя
- Охотск
- Аян
- Большой Шантар
- Бомнак
- Черняево
- Норск
- Им.П.Осипенко
- Мазаново
- Благовещенск
- Чекунда
- Архара
- Екатерино-Никольское
- Смидович
- Усть-Хайрюзово
- Ключи
- Никольское (О.Беринга)
- Кызыл (Тув. ЦГМС)
- Тоора-Хем
- Усть-Кокса
- Кош-Агач
- Эрзин

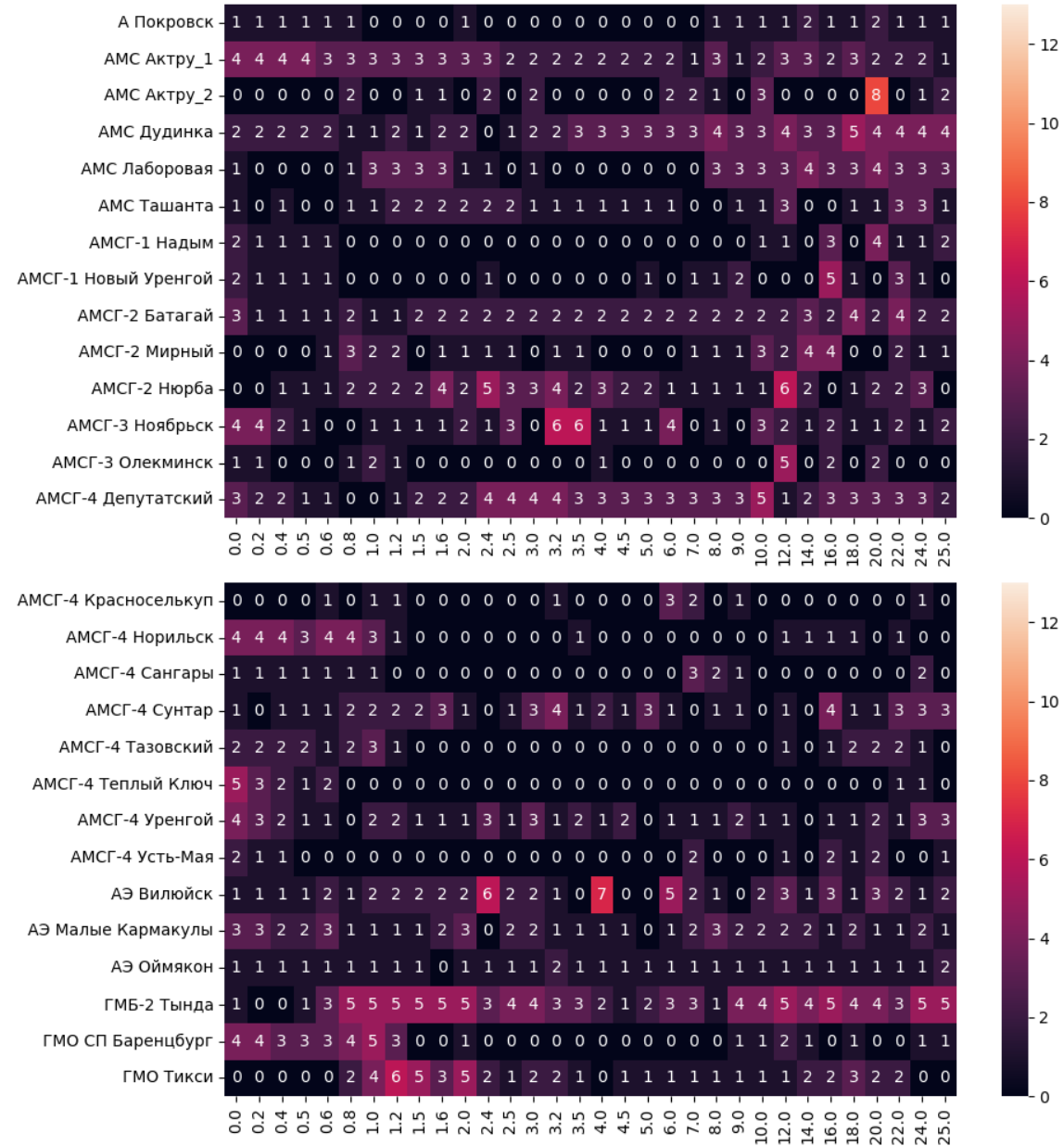
ПРИЛОЖЕНИЕ 14. Таблица среднегодовых температур грунта и периодов, за которые имеются данные в свободном доступе

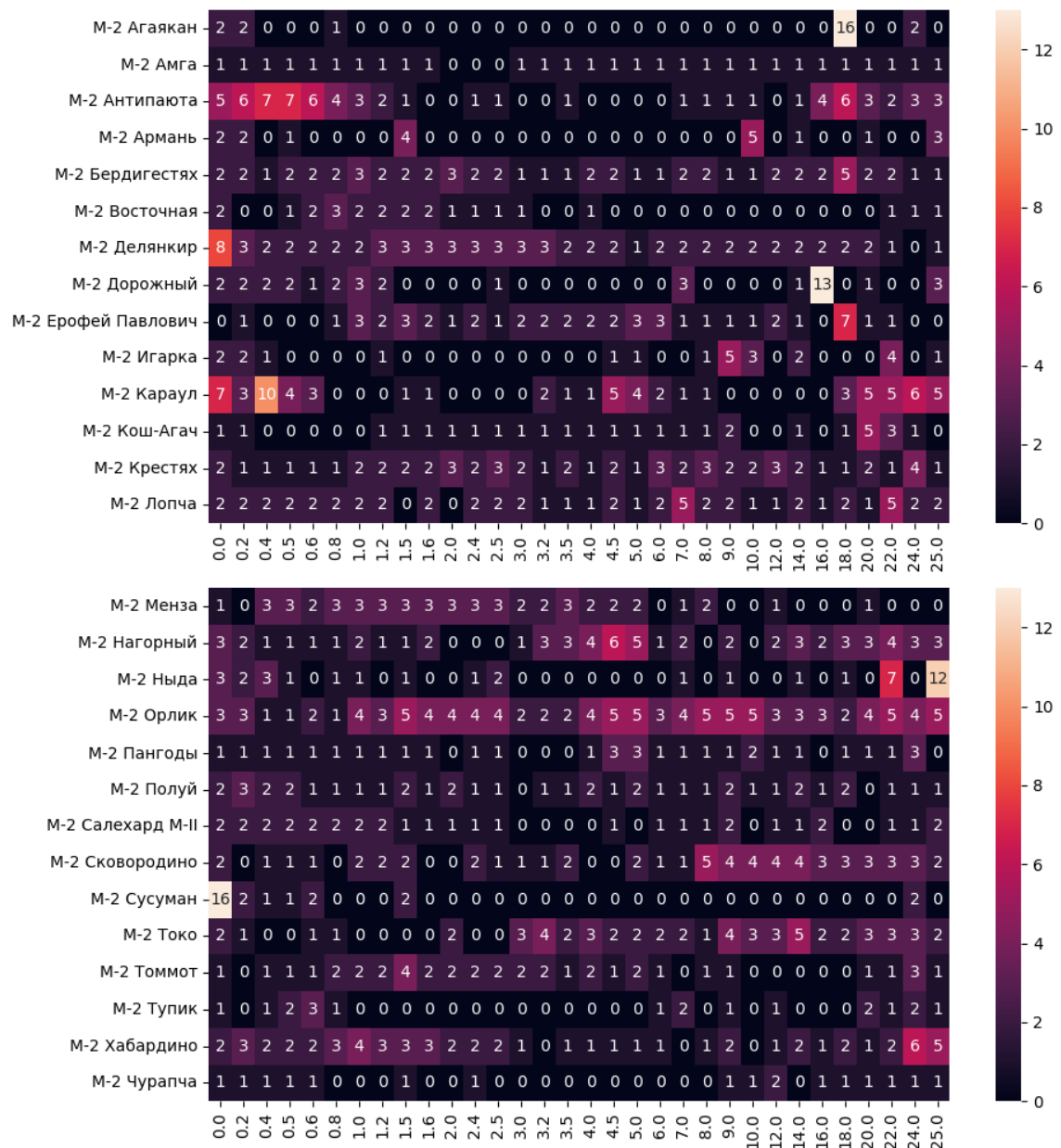
Название станции	Глубина, м	Первый год временного ряда	$T_{ср}$	Последний год временного ряда	$T_{ср}$
Верхоянск	1.6	1968	-7,56	2023	-1,71
Верхоянск	3.2	1967	-6,36	2023	-2,45
Джарджан	1.6	1978	-3,82	2023	-0,29
Джарджан	2.4	1985	-3,2	1997	-0,42
Джарджан	3.2	1981	-3,56	1987	-3,25
Жиганск	3.2	1965	-2,98	1989	0
Зырянка	3.2	1977	-0,22	2022	0,1
Игарка	3.2	1983	-0,14	2023	3
Им.Е.К.Федорова	0.8	1989	-14,31	2020	-8,37
Иситель	1.2	1965	-2,77	2023	0,82
Иситель	1.6	1966	-3,25	1997	-2,68
Иситель	2.4	1965	-2,92	2023	0,49
Иситель	3.2	1965	-2,99	2020	-0,1
Калакан	2.4	1977	-1,77	1979	-1,95
Калакан	3.2	1977	-1,81	1986	-1,63
Кислокан	3.2	1978	-0,33	1994	-0,46
Кюсюр	1.6	1977	-6,33	1999	-5,2
Кюсюр	3.2	1977	-6,11	1990	-3,77
Нерчинский з-д	2.4	1977	-1,21	2023	1,35
Нерчинский з-д	3.2	1977	-0,98	2023	1,21
О.Визе	0.4	1992	-12,31	2018	-8,54
О.Визе	0.8	1989	-13,38	2018	-8,77

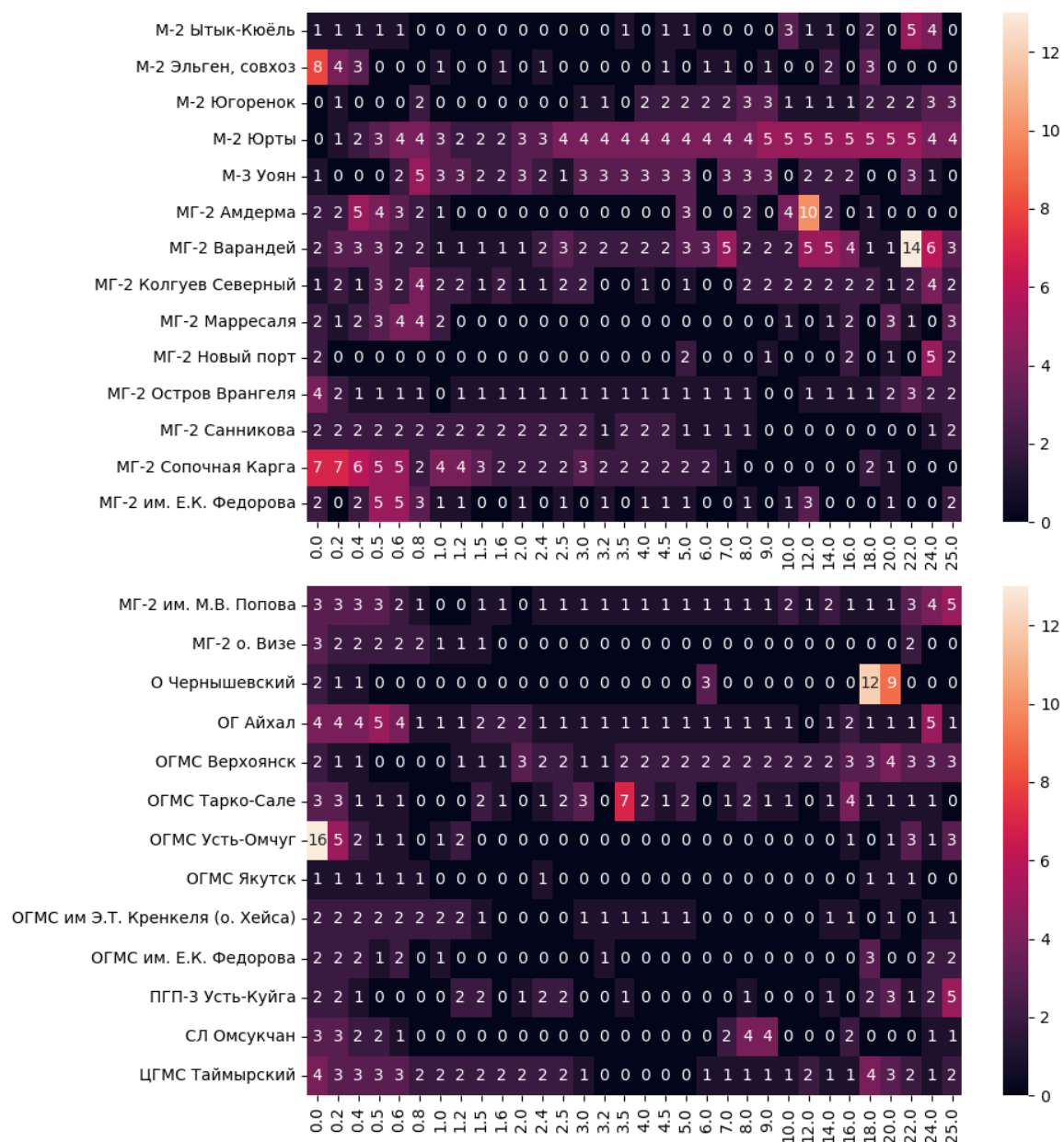
О.Голомянный	0.2	1992	-15,32	2020	-8,04
О.Голомянный	0.4	1990	-14,52	2021	-9,9
О.Голомянный	0.8	1989	-13,3	2021	-9,36
О.Голомянный	1.2	1989	-13,28	2021	-9,42
О.Диксон	0.8	1989	-10,05	2023	-4,9
Оймякон	1.6	1966	-8,23	2019	-5,71
Оймякон	3.2	1966	-8,34	1974	-6
Олекминск	3.2	1969	-0,61	2008	0,06
Омолон	1.6	1992	-3,66	1997	-2,73
Омолон	3.2	1988	-2,9	1997	-2,71
Сосново-Озерское	2.4	1977	-1,29	1990	-0,62
Сосново-Озерское	3.2	1977	-1,26	1990	-0,75
Среднеколымск	1.6	1978	-1,02	2008	0,35
Среднеколымск	2.4	1988	-1,9	1995	-2,77
Среднеколымск	3.2	1977	-2,88	1989	-4,27
Сунтар	1.2	1965	-3,47	2023	1,28
Сунтар	1.6	1965	-3,11	1995	0,44
Сунтар	2.4	1965	-2,79	1990	1,16
Сунтар	3.2	1965	-2,74	2004	0,11
Сусуман	1.6	1985	-4,96	2022	-3,11
Сусуман	2.4	2022	-3,13	2022	-3,13
Сусуман	3.2	1977	-5,33	2022	-3,25
Сухана	2.4	1985	-3,86	1993	-3,34
Тура	3.2	1969	-2,13	1970	-0,82
Усть-Мая	2.4	1975	-0,35	2023	0,38
Усть-Мая	3.2	1981	-0,75	2023	0,04
Усть-Мома	0.8	1984	-7,7	2023	-6,92

Усть-Мома	1.2	1989	-8,08	2023	-6,86
Усть-Мома	1.6	1977	-8,56	2023	-7,01
Усть-Мома	2.4	1985	-7,1	2023	-6,93
Усть-Мома	3.2	2022	-6,21	2023	-6,94
Усть-Нюкжа	1.6	1999	-0,36	2023	0,13
Хоседа-Хард	1.6	1968	-0,26	1993	1,57
Чара	2.4	1977	-2,84	1991	-1,85
Чара	3.2	1977	-2,77	1991	-1,85
Якутск	2.4	1969	-0,56	2022	0,6
Якутск	3.2	1965	-1,14	2022	0,17

ПРИЛОЖЕНИЕ 15. Тепловые карты изменения количества пропусков после фильтрации выбросов, в процентах. По горизонтали откладывается глубина в метрах, по вертикали – название пункта.







ПРИЛОЖЕНИЕ 16. Процент глубин, для которых отвергается нулевая гипотеза по критерию Левене.

Название пункта	$p < 0.01$	$p < 0.05$	$p < 0.1$
А Покровск	0	0	3,1
АМС Актру_1	100	100	100
АМС Актру_2	0	3,1	3,1
АМС Дудинка	75	78,1	81,2

АМС Лаборовая	31,2	43,8	43,8
АМС Ташанта	34,4	37,5	46,9
АМСГ-1 Надым	3,1	3,1	3,1
АМСГ-1 Новый Уренгой	0	0	0
АМСГ-2 Батагай	56,2	65,6	65,6
АМСГ-2 Мирный	3,1	12,5	15,6
АМСГ-2 Нюрба	31,2	37,5	46,9
АМСГ-3 Ноябрьск	9,4	12,5	18,8
АМСГ-3 Олекминск	0	3,1	3,1
АМСГ-4 Депутатский	62,5	75	75
АМСГ-4 Красноселькуп	0	0	0
АМСГ-4 Норильск	0	0	3,1
АМСГ-4 Сангары	0	0	3,1
АМСГ-4 Сунтар	28,1	31,2	40,6
АМСГ-4 Тазовский	6,2	9,4	18,8
АМСГ-4 Теплый Ключ	0	0	0
АМСГ-4 Уренгой	6,2	21,9	31,2
АМСГ-4 Усть-Мая	0	0	0
АЭ Вилюйск	34,4	46,9	56,2
АЭ Малые Кармакулы	18,8	28,1	28,1
АЭ Оймякон	56,2	71,9	87,5
ГМБ-2 Тында	37,5	62,5	68,8
ГМО СП Баренцбург	25	31,2	34,4
ГМО Тикси	9,4	25	34,4

М-2 Агаякан	0	3,1	3,1
М-2 Амга	50	71,9	75
М-2 Антипаюта	18,8	31,2	34,4
М-2 Армань	0	0	3,1
М-2 Бердигестях	53,1	81,2	93,8
М-2 Восточная	21,9	25	31,2
М-2 Делянкир	56,2	84,4	84,4
М-2 Дорожный	0	0	0
М-2 Ерофей Павлович	3,1	18,8	34,4
М-2 Игарка	0	0	3,1
М-2 Караул	15,6	15,6	18,8
М-2 Кош-Агач	40,6	43,8	43,8
М-2 Крестях	62,5	71,9	75
М-2 Лопча	21,9	50	65,6
М-2 Менза	28,1	37,5	46,9
М-2 Нагорный	18,8	37,5	37,5
М-2 Ныда	3,1	3,1	6,2
М-2 Орлик	65,6	68,8	81,2
М-2 Пангоды	3,1	18,8	18,8
М-2 Полуй	0	0	3,1
М-2 Сковородино	0	18,8	31,2
М-2 Сусуман	3,1	3,1	3,1
М-2 Токо	15,6	28,1	34,4
М-2 Томмот	43,8	46,9	46,9
М-2 Тупик	0	0	0
М-2 Хабардино	28,1	46,9	46,9

М-2 Чурапча	0	0	0
М-2 Ытык-Кюёль	3,1	6,2	6,2
М-2 Эльген, совхоз	0	3,1	3,1
М-2 Югоренок	28,1	31,2	37,5
М-2 Юрты	65,6	75	75
М-3 Уоян	31,2	40,6	46,9
МГ-2 Амдерма	0	3,1	6,2
МГ-2 Варандей	40,6	59,4	59,4
МГ-2 Колгуев Северный	21,9	28,1	40,6
МГ-2 Марресаля	3,1	12,5	18,8
МГ-2 Новый порт	0	0	0
МГ-2 Остров Врангеля	12,5	28,1	37,5
МГ-2 Санникова	71,9	71,9	71,9
МГ-2 Сопочная Карга	37,5	56,2	62,5
МГ-2 им. Е.К. Федорова	3,1	9,4	9,4
МГ-2 им. М.В. Попова	59,4	71,9	81,2
МГ-2 о. Визе	0	0	3,1
О Чернышевский	0	3,1	3,1
ОГ Айхал	6,2	21,9	37,5
ОГМС Верхоянск	53,1	68,8	68,8
ОГМС Тарко-Сале	0	12,5	18,8
ОГМС Усть-Омчуг	3,1	6,2	6,2
ОГМС Якутск	0	0	0

ОГМС им Э.Т. Кренкеля (о. Хейса)	9,4	15,6	15,6
ОГМС им. Е.К. Федорова	0	0	0
ПГП-3 Усть-Куйга	9,4	18,8	21,9
СЛ Омсукчан	0	0	0
ЦГМС Таймырский	43,8	90,6	100
М-2 Салехард М-II	25	28,1	31,2

ПРИЛОЖЕНИЕ 17. Таблица процентов пропусков в рядах температуры грунта на различных глубинах

Название станции	Длина временного ряда	Количество лет	0,02м	0,05м	0,1м	0,15м	0,2м	0,4м	0,6м	0,8м	1,2м	1,6м	2,4м	3,2м
Абакан (Хак. ЦГМС)	1977-2024	48	100	100	100	100	18	22	100	1	35	1	35	2
Агата	1977-1993	17	100	100	100	100	47	47	100	1	100	100	100	100
Агинское	1977-2024	48	100	100	100	100	19	19	100	2	2	2	100	85
Александров Гай	1964-2024	61	100	100	100	100	17	15	92	5	14	37	13	39
Александровск-Сахал.	1963-2024	62	100	100	100	100	17	17	100	4	100	4	100	5
Александровское	1963-2024	62	100	100	100	100	16	37	99	3	96	1	100	6
Архангельск	1965-2024	60	96	96	96	96	15	33	97	3	88	3	100	3
Архара	1963-2024	62	100	100	100	100	15	14	100	1	100	4	100	1
Астрахань, ГМО	1963-2024	62	94	94	94	94	15	13	93	2	85	1	100	100
Ахты	1977-2024	48	100	100	100	100	16	17	100	16	100	15	100	15
Ачинск, ж.д. ст.	1977-1992	16	91	91	100	100	61	61	100	13	11	11	65	6
Аян	1963-2024	62	100	100	100	100	14	37	100	4	100	3	100	15
Бабушкин	1963-2024	62	100	100	100	100	21	20	94	9	26	12	26	9
Байкит	1963-1994	32	100	100	100	100	38	78	100	14	100	6	100	19
Бакчар	1963-2024	62	100	100	100	100	15	37	100	2	100	2	100	4
Балаганск	1967-2023	57	97	97	98	97	19	21	100	10	98	6	100	4
Барабинск	1963-2024	62	100	100	100	100	22	41	92	6	6	6	100	100

Баргузин	1963-2024	62	99	99	99	99	28	20	100	5	99	8	100	12
Барнаул	1963-2024	62	100	100	100	100	16	15	89	2	3	2	1	2
Баяндай	1965-2023	59	100	100	100	100	18	18	92	5	5	8	7	100
Безенчук	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	1	1	2	2	2
Белогорка	1976-2024	49	100	100	100	100	20	19	100	5	5	5	5	8
Березово	1963-2024	62	100	100	100	100	15	37	88	3	86	4	100	4
Бийск- Зональная	1977-2024	48	100	100	100	100	19	20	100	4	5	4	11	11
Бисер	1963-2024	62	100	100	100	100	30	51	100	17	99	58	94	86
Благовеще нск	1963-2014	52	100	100	100	100	18	18	87	1	2	2	0	0
Богородиц кое- Фенино	1965-2024	60	100	100	100	100	19	19	100	8	12	8	16	8
Богородск ое	1977-2024	48	100	100	100	100	20	25	100	6	11	5	5	2
Богучаны	1963-2024	62	89	90	92	94	17	40	92	1	7	2	26	1
Бологое	1976-2024	49	100	100	100	100	25	27	100	9	100	9	100	11
Большой Шантар	1977-2023	47	100	100	100	100	24	24	100	14	100	12	100	100
Бомнак	1963-2024	62	100	100	100	100	24	44	100	9	95	9	100	55
Бор	1977-2024	48	100	100	100	100	19	20	100	3	100	4	100	27
Борзя	1963-2024	62	100	100	100	100	19	18	100	5	99	5	100	100
Братск,обс .	1963-2023	61	100	100	100	100	17	36	100	3	100	3	100	4
Бреды	1966-2024	59	100	100	100	100	21	22	95	9	40	48	56	47
Брянск, АМСГ	1963-2024	62	100	100	100	100	18	19	100	10	99	6	99	6
Буденновс к	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	9	100	9	100	9

Валуйки	1965-2024	60	100	100	100	100	22	21	97	9	9	9	13	9
Ванавара	1963-2024	62	92	93	94	90	19	42	98	22	19	2	36	7
Великие Луки	1963-2024	62	96	95	95	96	21	35	91	5	5	7	34	56
Великий Устюг	1976-2004	29	100	100	100	100	29	32	100	4	7	5	40	41
Верхнее дуброво	1965-2024	60	100	100	100	100	24	34	99	11	100	10	99	10
Верхнеимб атск	1977-1997	21	100	100	100	100	39	39	100	1	100	14	100	18
Верхнеура льск	1963-2024	62	99	99	99	100	54	56	93	43	53	49	82	91
Верхний Баскунчак	1989-2024	36	100	100	100	100	3	3	100	3	100	3	100	100
Верхоянск	1964-2024	61	100	100	100	100	24	50	100	16	100	13	100	8
Вилуйск	1964-2024	61	99	99	99	99	30	49	94	9	6	4	38	3
Витим	1963-2024	62	100	100	100	100	17	40	100	10	100	5	100	2
Владивост ок,порт	1963-2024	62	100	100	100	100	17	17	89	3	2	3	4	100
Вологда, Прилуки	1971-2024	54	100	100	100	100	15	26	100	11	85	11	85	11
Воронеж,А ГРО	1963-2024	62	94	94	94	94	13	14	93	3	1	1	12	4
Вытегра	1963-2024	62	100	100	100	100	15	35	99	7	95	17	100	35
Гигант	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	2	1	1	1	1
Грозный,А МСГ	1963-1994	32	86	86	86	86	25	24	87	2	45	2	73	2
Дальнереч енск	1963-2024	62	100	100	100	100	18	18	89	3	3	3	13	41
Дербент	1988-2024	37	100	100	100	100	9	12	100	4	100	6	100	7

Джарджан	1977-2024	48	100	100	100	100	22	31	100	16	16	10	72	79
Дуван	1967-2024	58	100	100	100	100	20	36	97	13	25	12	19	100
Екатерино-Никольское	1963-2024	62	100	100	100	100	43	43	90	43	44	37	54	46
Елабуга	1989-2024	36	100	100	100	100	7	7	100	2	100	5	100	17
Елатьма	1963-2024	62	100	100	100	100	16	38	100	2	99	2	100	1
Енисейск	1963-2024	62	93	90	89	91	15	38	100	45	84	6	100	6
Ербогачен	1963-2023	61	100	100	100	100	45	58	89	37	10	8	22	41
Ершов	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	2	2	2	2	2
Жигалово	1963-2013	51	100	100	100	100	24	47	100	7	100	5	100	3
Жиганск	1964-2024	61	100	100	100	100	37	52	100	22	52	23	54	79
Жижгин, остров	1965-2024	60	100	100	100	100	39	72	100	28	100	54	100	64
Земетчино	1977-2024	48	100	100	100	100	17	17	100	2	2	3	2	24
Зилаир	1963-2024	62	100	100	100	100	18	20	92	7	7	7	9	12
Златоуст	1963-2024	62	100	100	100	100	18	37	100	16	76	11	76	18
Змеиногорск	1963-2024	62	100	100	100	100	38	37	99	36	36	36	36	36
Золотой	1963-2010	48	100	100	100	100	40	41	100	11	99	10	8	100
Зырянка	1977-2024	48	100	100	100	100	22	21	100	9	100	6	100	3
Ивдель	1963-2024	62	100	100	100	100	16	40	100	3	100	2	100	2
Игарка	1977-2024	48	100	100	100	100	26	25	100	17	100	7	100	16
Ижевск	1963-1989	27	100	100	100	100	33	85	100	1	100	1	100	7
Им.Е.К.Федорова	1977-2022	46	100	100	100	100	30	32	100	29	100	100	100	100
Им.П.Осипенко	1963-2024	62	100	100	100	100	18	21	90	2	1	3	6	3
Индига	1976-2024	49	100	100	100	100	27	27	100	13	100	17	100	64

Иркутск,об с.	1963-2023	61	100	100	100	100	14	14	89	3	2	0	0	1
Иситель	1964-2024	61	100	96	96	97	19	41	91	49	16	46	25	16
Ишим	1978-2024	47	100	100	100	100	16	16	100	1	1	1	24	89
Йошкар- Ола	1963-2023	61	100	100	100	100	23	38	89	8	8	8	9	9
Казачинск ое, АМСГ	1970-2008	39	100	100	100	100	28	44	100	11	100	8	100	100
Калакан	1977-2013	37	100	100	100	100	27	28	100	19	3	9	88	72
Калевала	1976-2024	49	100	100	100	100	18	18	100	3	3	3	30	59
Каменная степь	1963-2024	62	100	100	100	100	13	13	91	1	1	1	1	1
Камень- на-Оби	1977-2024	48	100	100	100	100	18	19	100	1	1	1	1	1
Кандалакш а	1963-2024	62	100	100	100	100	16	38	89	4	5	4	42	33
Каневка	1977-2024	48	100	100	100	100	24	24	100	8	6	99	100	100
Каргополь	1976-2024	49	100	100	100	100	19	21	100	3	100	3	100	100
Кемерово, АГРО	1966-2024	59	100	100	100	100	17	33	96	1	1	1	4	1
Киренск	1963-2023	61	96	96	96	96	24	43	100	2	100	4	98	0
Кислокан	1977-1999	23	100	100	100	100	39	42	100	10	100	10	100	20
Ключи	1963-2024	62	96	96	96	96	21	40	95	6	14	4	18	3
Койнас	1963-2024	62	89	91	89	89	16	36	94	5	2	3	41	14
Кологрив	1963-2024	62	100	100	100	100	30	47	100	14	20	10	36	25
Коломна	1976-2024	49	91	91	91	97	35	44	100	26	33	21	47	35
Колпашев о	1963-2024	62	99	99	99	99	14	37	95	1	6	2	9	2
Кострома	1963-2024	62	99	99	99	99	16	39	93	2	1	1	9	11
Кош-Агач	1963-2024	62	98	98	98	100	22	23	93	13	10	4	92	3

Красноуфимск	1963-2024	62	100	100	100	100	14	40	89	4	38	2	15	2
Краснощелье	1965-2024	60	100	100	100	100	40	38	100	23	100	23	100	27
Красноярск, оп.п.	1963-2024	62	93	94	94	93	20	37	90	2	2	2	28	11
Красный Чикой	1977-2024	48	100	100	100	100	37	32	100	5	2	2	2	2
Красный Яр	1977-1998	22	100	100	100	100	46	46	100	4	4	4	4	100
Кузедеево	1977-2024	48	100	100	100	100	20	20	100	4	4	7	4	31
Кумены	1984-2023	40	100	100	100	100	6	6	100	3	100	3	100	3
Курган, Вороновка	1963-2024	62	100	100	100	100	28	40	89	18	20	17	18	24
Курск, АЭ	1963-2024	62	99	99	98	98	15	13	93	2	1	1	8	2
Кызыл (Тув. ЦГМС)	1977-1995	19	100	100	100	100	51	54	100	10	100	9	100	3
Кыра	1963-2024	62	99	99	99	99	15	15	89	2	5	3	3	2
Кюсюр	1977-2000	24	100	100	100	100	46	44	100	12	100	16	100	49
Кяхта	1963-2024	62	98	98	98	98	34	25	91	12	11	10	75	100
Ларьяк	1978-2024	47	100	100	100	100	17	17	100	2	8	6	8	3
Ленск	1985-2024	40	100	100	100	100	5	6	100	4	100	5	100	7
Лермонтовка	1977-2024	48	100	100	100	100	18	27	100	2	12	11	2	15
Леуши	1963-2024	62	100	100	100	100	26	49	100	18	100	19	100	14
Магадан, Нагаева бухта	1963-2024	62	92	92	93	92	15	40	95	2	4	3	15	2
Мазаново	1990-2024	35	100	100	100	100	11	9	100	6	100	4	100	4

Макушино	1965-2024	60	100	100	100	100	19	36	94	7	7	7	52	52
Мамакан	1967-2023	57	100	100	100	100	19	33	100	6	100	6	100	5
Марково	1963-2023	61	100	100	100	100	22	44	100	5	100	9	100	43
Махачкала	1963-2024	62	100	100	100	100	41	41	100	9	10	9	97	100
Мезень	1964-2024	61	100	100	100	100	34	34	100	22	22	22	34	22
Минусинск	1963-2024	62	99	100	100	99	16	16	100	4	96	3	92	9
Могоча	1963-2024	62	100	100	100	100	18	18	100	36	100	42	100	100
Можайск	1976-2024	49	100	100	100	100	40	46	100	24	59	24	71	24
Мыс Лопатка	1988-2006	19	100	100	100	100	17	24	100	19	13	47	82	100
Мыс Терпения	1977-2018	42	100	100	100	100	27	28	100	20	26	18	100	100
Нагорный	1977-2002	26	100	100	100	100	36	35	100	12	10	6	34	100
Напас	1963-2024	62	99	99	99	100	17	36	100	5	20	4	23	8
Нарьян- Мар	1986-2024	39	100	100	100	100	3	4	100	2	100	2	100	2
Нерчински й з-д	1977-2024	48	100	100	100	100	22	22	100	3	2	10	13	3
Нижнеанга рск	1977-2024	48	100	100	100	100	21	19	100	2	3	2	2	3
Нижнеуди нск	1963-2023	61	100	100	100	100	17	38	100	1	100	1	100	0
Никольск	1976-2024	49	100	100	100	100	19	19	100	4	75	4	74	77
Никольско е (О.Беринга)	1988-2024	37	100	100	100	100	30	33	100	34	31	38	47	33
Норск	1963-2019	57	100	100	100	100	17	16	88	2	2	3	3	3
Няксимвол ь	1963-2024	62	100	100	100	100	20	42	89	9	9	11	23	76

О.Визе	1989-2022	34	100	100	100	100	9	11	100	7	100	97	100	97
О.Голомян ный	1989-2022	34	100	100	100	100	8	6	100	1	1	100	100	100
О.Диксон	1977-2024	48	100	100	100	100	27	31	100	31	99	100	100	100
Огурцово	1977-2024	48	100	100	100	100	18	18	100	1	1	1	1	1
Оймякон	1963-2024	62	100	100	100	100	23	41	100	23	99	31	99	86
Октябрьск ий Городок	1963-2024	62	100	100	100	100	13	13	92	1	2	1	1	1
Октябрьск ое	1978-2024	47	100	100	100	100	16	17	100	2	2	2	100	100
Олекминск	1964-2024	61	99	99	99	100	16	36	92	2	48	8	55	32
Оленек	1966-2024	59	100	100	100	100	33	82	94	23	23	20	99	100
Омолон	1988-2023	36	100	100	100	100	2	1	100	6	100	70	100	69
Омск, степ ная	1963-2024	62	92	94	93	92	15	37	94	4	43	4	62	3
Онега	1963-2024	62	96	89	99	89	13	35	95	1	73	3	100	33
Оренбург, ЗГМО	1963-2024	62	100	100	100	100	15	13	89	1	2	2	1	1
Орлинга	1964-2023	60	100	100	100	100	27	71	100	19	100	11	100	9
Островное	1977-2023	47	100	100	100	100	28	29	100	10	100	4	100	100
Охотск	1963-1989	27	100	92	93	92	51	100	100	7	100	42	100	7
Павелец	1963-2024	62	100	100	100	100	16	16	100	1	100	2	100	1
Пенза, ГМО	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	2	2	2	2	3
Первомайс кое	1977-2024	48	100	100	100	100	18	19	100	1	42	6	45	30
Пермь	1963-2024	62	100	100	100	100	19	37	89	5	3	3	3	17
Петрозаво дск	1963-2024	62	100	100	100	100	13	35	100	2	100	2	100	1
Петрунь	1976-2024	49	100	100	100	100	18	18	100	3	88	3	100	3

Печора	1963-2024	62	100	100	100	100	14	35	99	3	97	2	100	2
Погранич ный	1963-1996	34	100	100	100	100	32	33	80	6	18	5	19	19
Поныри	1972-2024	53	100	100	100	100	15	15	100	1	1	2	15	50
Порецкое	1967-2023	57	96	96	97	96	29	35	100	13	93	13	100	13
Посъет	1977-1998	22	100	100	100	100	45	45	100	4	4	4	4	4
Приморск о-Ахтарск	1966-2024	59	91	92	91	92	65	31	100	20	3	15	7	100
Псков	1993-2024	32	100	100	100	100	7	24	100	5	100	14	100	7
Пудино	1963-2024	62	100	100	100	100	16	38	100	2	97	2	100	7
Пушкински е Горы	1976-2024	49	100	100	100	100	21	22	100	3	100	3	100	29
Реболы	1963-2024	62	99	99	99	99	13	37	95	10	13	44	97	100
Ребриха	1984-2013	30	100	100	100	100	4	4	100	3	100	2	100	3
Рубцовск	1963-2024	62	100	100	100	100	17	18	91	3	3	3	2	5
Санкт- Петербург	1963-2024	62	91	91	93	93	19	35	100	8	12	7	100	7
Саранпаул ь	1978-2024	47	100	100	100	100	18	18	100	3	100	3	100	100
Сарапул	1963-2023	61	100	100	100	100	24	38	90	10	9	10	9	9
Саратов,цг мс	1981-2024	44	100	100	100	100	29	29	100	12	13	13	13	36
Светлолоб ово	1977-2024	48	100	100	100	100	28	69	100	31	28	10	14	2
Свиягино	1977-1997	21	100	100	100	100	51	51	100	9	9	9	9	9
Северное	1963-2024	62	100	100	100	100	14	36	89	1	1	9	10	27
Северо- Енисейски й	1977-2019	43	100	100	100	100	20	20	100	8	100	21	100	54

Сковородино	1963-2024	62	100	100	100	100	38	37	100	22	69	57	100	100
Славгород	1963-2024	62	100	100	100	100	14	14	89	1	1	1	1	1
Смидович	1977-2024	48	100	100	100	100	20	21	100	2	100	5	100	24
Смоленск	1963-2024	62	95	97	97	95	13	35	89	7	10	2	23	3
Советская Гавань	1977-2024	48	100	100	100	100	29	28	100	18	100	13	100	35
Солянка	1977-2024	48	100	100	100	100	22	22	100	5	83	6	82	6
Сортавала	1963-2024	62	100	100	100	100	12	35	100	2	95	13	100	100
Сосново-Озерское	1977-2024	48	100	100	100	100	23	23	100	9	9	11	81	81
Сочи, ГМО	1963-2024	62	100	100	100	100	19	15	91	3	7	3	12	5
Среднекан	1977-2005	29	100	100	100	100	33	38	100	8	100	7	100	1
Среднеколымск	1977-2009	33	100	100	100	100	26	34	100	15	3	2	70	89
Средний Васюган	1963-2024	62	99	99	99	99	14	37	92	3	1	3	39	2
Сретенск	1963-2024	62	99	99	99	99	26	26	94	13	13	13	15	13
Ставрополь, АМСГ	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	6	100	4	100	100
Стерлитамак	1963-2024	62	100	100	100	100	25	25	93	13	14	13	99	99
Стрелка Чуня	1977-1999	23	100	100	100	100	58	44	100	21	1	100	100	1
Сунтар	1964-2024	61	100	100	100	100	20	36	90	7	2	60	63	40
Сура	1976-2024	49	100	100	100	100	17	17	100	3	100	3	100	3
Сургут, АМСГ	1963-1978	16	100	100	100	100	21	100	60	20	56	17	17	62
Сусуман	1977-2024	48	100	100	100	100	31	34	100	21	90	70	94	83
Сухана	1977-2002	26	100	100	100	100	54	57	100	35	62	45	63	100

Сухиничи	1964-2024	61	100	100	100	100	31	29	100	25	95	25	95	32
Сыктывкар	1967-2024	58	100	100	100	100	14	30	100	3	98	3	100	2
Таганрог	1977-2024	48	100	100	100	100	16	17	100	2	2	1	6	3
Тайга	1982-2024	43	100	100	100	100	8	8	100	5	100	7	100	9
Тайшет	1963-2023	61	100	100	100	100	19	40	100	3	100	3	100	14
Тамбов	1963-2024	62	100	100	100	100	15	17	92	8	2	2	7	12
Тара	1963-2024	62	100	100	100	100	14	36	89	3	3	3	3	3
Тарко-Сале	1978-2024	47	100	100	100	100	32	31	100	7	21	21	100	100
Татарск	1977-2024	48	100	100	100	100	18	18	100	2	100	1	100	9
Тимирязевский	1977-2024	48	100	100	100	100	22	22	100	3	3	4	3	4
Тихвин	1976-2024	49	100	100	100	100	18	18	100	3	3	3	3	13
Тобольск	1963-2024	62	100	100	100	100	14	36	100	3	100	3	100	3
Толька	1978-2024	47	100	100	100	100	16	16	100	10	11	1	16	10
Томск	1963-2024	62	100	100	100	100	23	42	94	19	20	18	20	20
Тоора-Хем	1977-1992	16	100	100	100	100	53	54	100	5	100	5	100	6
Торопец	1976-2024	49	100	100	100	100	31	29	100	38	100	56	100	51
Тотьма	1976-2024	49	100	100	100	100	18	18	100	4	100	3	100	56
Троицкий прииск	1963-2024	62	100	100	100	100	29	56	94	13	33	15	100	100
Троицко-Печорское	1963-2024	62	100	100	100	100	13	35	90	1	7	2	23	38
Тулун	1964-2023	60	98	98	98	98	18	18	92	6	8	11	8	5
Тунка	1963-2024	62	100	100	100	100	21	22	94	8	8	8	8	10
Тура	1963-1997	35	97	98	98	97	28	64	99	7	93	2	100	94
Туринск	1978-2013	36	100	100	100	100	20	25	100	0	6	16	3	100
Туруханск	1963-2024	62	85	91	86	90	15	37	100	12	79	12	100	2
Тымовское	1977-2024	48	100	100	100	100	20	20	100	4	4	4	4	4
Тюмень	1978-2024	47	100	100	100	100	16	16	100	1	1	8	1	1

Углегорск	1977-2024	48	100	100	100	100	20	20	100	3	100	3	100	100
Улан-Удэ,город	1963-2024	62	89	89	89	89	16	17	89	2	2	2	13	3
Урюпинск	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	2	1	1	1	1
Усть-Кокса	1980-2024	45	100	100	100	100	20	21	100	15	15	15	15	15
Усть-Мая	1964-2024	61	100	100	100	100	19	37	100	6	15	14	20	57
Усть-Мома	1977-2024	48	100	100	100	100	49	38	100	36	45	55	52	94
Усть-Нюкжа	1977-2024	48	100	100	100	100	22	20	100	2	4	13	100	100
Усть-Уса	1976-2024	49	100	100	100	100	18	18	100	3	3	6	21	15
Усть-Хайрюзово	1986-2024	39	100	100	100	100	6	8	100	7	30	6	100	100
Усть-Цильма	1963-2024	62	100	100	100	100	14	35	92	2	2	2	34	2
Фролово	1986-2024	39	100	100	100	100	2	2	100	2	2	2	2	2
Халесовая	1978-1993	16	100	100	100	100	56	58	100	19	53	20	99	49
Ханты-Мансийск	1963-2024	62	100	100	100	100	16	38	89	5	7	12	28	87
Хоседа-Хард	1963-1997	35	98	98	97	98	26	69	86	9	4	11	77	34
Цимлянск	1966-2024	59	90	90	91	91	14	14	100	5	55	53	99	65
Чара	1977-2017	41	100	100	100	100	21	22	100	3	2	1	65	79
Чекунда	1963-2003	41	100	100	100	100	30	23	84	10	7	10	61	60
Червянка	1963-2023	61	100	100	100	100	20	41	100	5	100	9	100	11
Черняево	1977-2024	48	100	100	100	100	19	19	100	2	2	3	2	100
Чертково	1963-2024	62	100	100	100	100	31	31	99	19	99	31	100	43
Чита	1963-2024	62	100	100	100	100	27	25	91	13	12	12	12	22
Чулпаново	1977-2024	48	100	100	100	100	16	17	100	2	2	2	2	2
Шаджатма з	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	2	100	100	100	100

Шадринск	1966-2024	59	100	100	100	100	21	34	95	9	8	25	9	94
Шенкурск	1976-2024	49	100	100	100	100	17	18	100	3	100	3	100	3
Элиста, АМ СГ	1963-2024	62	100	100	100	100	13	13	99	1	98	1	99	2
Эльтон	1977-2024	48	100	100	100	100	16	16	100	1	1	1	1	1
Эрзин	1977-1992	16	100	100	100	100	77	64	100	22	100	30	100	45
Южно- Курильск	1963-2003	41	100	100	100	100	23	23	100	4	100	4	100	4
Южно- Сахалинск	1977-2024	48	100	100	100	100	20	20	100	4	100	4	100	4
Яйлю	1963-2024	62	100	100	100	100	15	15	91	4	1	1	25	82
Якутск	1964-2024	61	100	100	100	100	18	38	91	4	6	3	8	8
Янов Стан	1977-1993	17	100	100	100	100	49	49	100	17	9	16	49	7
Яшкуль	1965-1988	24	100	100	100	100	90	84	98	66	63	64	79	68