МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Долгопериодная изменчивость температуры почвы и воздуха в районе Норильска»

Исполнитель **Филина Мария Михайловна**
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Топтунова Ольга Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«7» июня **2021 г.**

Санкт–Петербург
2021

Содержание

Введение 3
1 Глава. Основные теоретические сведения 5
1 Климатические особенности города Норильска и прилегающих районов ... 5
1.2. Поток тепла в почву и атмосферу 8
1.3 Методика проведения анализа 11
2 Глава. Анализ результатов исследования 15
2. 1. Аномалии температуры воздуха за период с 1981 по 2020 года 15
2. 2. Аномалии температуры почвы за период с 1981 по 2020 года 21
Список использованных источников: 47

Введение

Норильск является самый северным городом мира с численностью населения более 150 тысяч человек. Он относится к Крайнему северу и имеет важное промышленное значение для страны.

29 мая на ТЭЦ-3 г Норильска произошла колоссальная по своим масштабам авария, приведшая к настоящей экологической катастрофе и получившая широкий резонанс во всем мире. Разрушился резервуар с дизельным топливом. В итоге в реки Далдыкан и Амбарная попало около 15 тысяч тонн углеводородов, а еще 6 тысяч тонн - в грунт. Общая площадь загрязнения составила 180 тысяч квадратных километров. Одной из возможных причин такой катастрофы по мнению некоторых экспертов и администрации самого «Норникеля» стала деградация вечной мерзлоты. В виду актуальности данной проблематики данное исследование посвящено исследованию изменений температуры почвы в районе Норильска и ее связью с изменением температуры воздуха.

Авария повлекла за собой экологическую катастрофу и экономические потери. Чтобы предотвратить убытки, следует внимательно следить за изменением климата. В данном исследовании изучается деградация вечной мерзлоты в районе Норильска.

Целью данной работы является исследование взаимосвязи и анализ изменения температуры воздуха и почвы в районе Норильска.

Тема работы *актуальна*, потому что изменение климата существенно влияет на различные сферы жизни человечества.

Для выполнения цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать изменение температуры почвы от десятилетия к десятилетию на разных уровнях;
2. Проанализировать изменение температуры воздуха от десятилетия к десятилетию;
3. Проанализировать взаимосвязь происходящих изменений.

Для анализа температуры почвы и воздуха использовались данные реанализа ERA 5 с 1981 по 2020 год. Из всех доступных средств анализа реанализ является самым современным продуктом для всесторонних исследований, это новый, улучшенный реанализ Европейского центра среднесрочных прогнозов, являющийся улучшенной версией реанализа ERA INTERIM.

Выпускная квалификационная работа состоит из двух глав, 1 таблицы, 98 рисунков.

В первой главе описываются теоретические сведения о климате Норильска и прилегающих районов.

Во второй главе описывается анализ полученных исследований по температуре воздуха и почвы, а также взаимосвязь между ними.

1 Глава. Основные теоретические сведения

1 Климатические особенности города Норильска и прилегающих районов

Климат в Норильске субарктический и суровый, обусловлен в первую очередь сравнительной удаленностью от морского побережья и тем что, он расположен севернее полярного круга. Это один из самых холодных и ветреных городов мира. Зима в Норильске долгая и длится с половины сентября до начала мая. Погода зимой отличается достаточно сильными морозами и сильными ветрами примерно 27 м/с. Очень часто с сильными понижениями температур усиливается скорость ветра. Город находится в списке самых ветреных городов, где средняя скорость ветра в течение года достигает 6 м/с. Самый холодный месяц — январь со средней температурой примерно -25°— -30°С. Лето в Норильске очень короткое — с конца июня до конца августа. Погода летом холодная и пасмурная, со средней температурой примерно +9° — +15° С. Максимум температуры летом, зарегистрированный в Норильске составил +32° С. Среднегодовое количество осадков в Норильске составляет около 350 мм, максимум в августе и минимум в январе-феврале.

По измерениям с метеорологической станции в Норильске использованы данные по среднемесячным температурам и среднегодовым (рисунок 1.1 и 1.2) видно, как происходит увеличение среднегодовой температуры воздуха. Это связанно с деградацией вечной мерзлоты – криолитозоны. Такое изменение может вызывать множество опасных аварий, как на производственных заводах, так и в жилых домах.

В данное время, эта проблема приобрела большую значимость, так как более глубокие слои почвы постепенно прогреваются. Особые мерзлотно–экологические проблемы возникают при уплотнении городской застройки или при реконструкции объектов на урбанизированных территориях, где в течение предшествующих лет (или десятилетий) на вечномерзлые основания

воздействовали различные техногенные нагрузки. В Норильске средняя температура вечной мерзлоты на глубине 10–12 м (здесь не сказываются сезонные колебания) до застройки составляла минус 3° С; преобладали достаточно простые и стабильные геокриологические условия, свойства мерзлоты были благоприятны для устройства надежных фундаментов, несущая способность которых реализовывалась благодаря вмерзанию боковых поверхностей и торцов в грунты. Натурные наблюдения мерзлотной лаборатории Норильского комбината им. Завенягина в глубокой скважине в центре Норильска показали, что в интервале глубин 20–60 м температура многолетне–мерзлых пород повысилась за период с 1955 по 1985 годы на 0,5–1° С. Геотермические замеры Норильского отдела НИИОСП им. Герсеванова в скважине глубиной 135 м на вершине горы Рудной (рудник “Медвежий ручей”) выявили повышение температуры грунтов в интервале глубин 20–90 м за последние 50 лет от минус 3,5–4°С до минус 1,5–2°С. На глубинах более 15–20 м не сказываются сезонные колебания климатических параметров, изменения обусловлены постоянным отепляющим “техногенным прессом”.

год	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	за год
1981	-14.5	-27.6	-23.4	-10.1	-7.4	5.8	13.3	13.8	3.0	-12.8	-16.1	-21.2	-8.1
1982	-29.6	-21.1	-26.0	-10.0	-5.5	7.0	14.3	11.2	2.4	-14.6	-26.6	-23.4	-10.2
1983	-22.8	-22.1	-18.4	-17.6	-6.4	7.9	13.1	11.1	6.6	-4.8	-13.2	-22.2	-7.4
1984	-18.6	-24.6	-21.5	-22.0	-4.8	10.3	18.5	11.9	6.4	-9.4	-27.9	-27.8	-9.1
1985	-29.5	-30.6	-23.7	-11.4	-4.1	11.9	13.1	12.3	4.6	-5.2	-20.0	-23.1	-8.8
1986	-26.3	-23.5	-22.3	-16.5	-4.1	5.9	17.8	12.0	2.7	-4.9	-13.7	-28.6	-8.5
1987	-33.0	-24.5	-25.6	-15.1	-4.0	1.1	14.6	12.6	5.0	-9.0	-26.9	-24.6	-10.8
1988	-25.2	-32.2	-20.3	-20.9	-2.3	8.5	12.8	11.5	5.0	-7.8	-17.8	-15.0	-8.6
1989	-28.4	-20.5	-21.0	-17.5	-2.8	2.2	10.4	9.7	0.9	-7.6	-23.3	-22.8	-10.1
1990	-35.3	-26.0	-16.7	-9.4	-3.5	8.2	17.4	9.2	4.2	-10.1	-25.5	-29.5	-9.8
1991	-24.6	-30.0	-26.3	-11.8	-4.3	6.3	15.8	11.0	8.6	-8.8	-16.1	-26.0	-8.9
1992	-23.0	-24.1	-20.4	999.9	999.9	2.3	11.7	13.4	1.3	-14.7	-23.3	-22.8	999.9
1993	-20.2	-19.6	-12.1	-15.8	-6.5	8.3	12.2	11.0	5.3	-8.7	-18.0	-24.9	-7.4
1994	-32.0	-35.4	-13.1	-14.7	-5.4	7.8	16.7	10.6	2.4	-3.6	-20.6	-26.0	-9.4
1995	999.9	-15.5	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9
1996	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	5.1	16.1	9.2	0.9	-7.5	-15.8	-29.2	999.9
1997	-25.2	-28.9	-17.4	-4.1	-0.4	4.4	11.7	999.9	7.5	-2.7	-21.6	-29.8	999.9
1998	-27.1	-29.5	-16.0	-17.4	-5.7	5.6	15.4	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9
1999	999.9	999.9	999.9	-15.0	-2.6	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9
2000	999.9	-24.3	-15.1	-12.5	-2.6	7.7	13.3	15.6	3.0	-13.3	-27.8	-37.3	999.9
2001	-36.4	-27.0	-25.1	-19.2	-3.8	12.0	14.7	14.9	4.8	-9.3	-14.3	-21.0	-9.1
2002	-29.4	-26.0	-16.6	-17.4	-4.9	9.3	13.4	11.9	0.3	-6.3	-19.5	-28.6	-9.5
2003	-24.7	-26.8	-20.8	-12.5	-2.0	10.9	11.4	14.2	6.3	-7.6	-25.7	-20.3	-8.1
2004	-25.6	-29.2	-25.6	-15.9	-5.4	7.7	14.8	7.8	3.5	-6.5	-16.4	-30.2	-10.1

Рисунок 1.1 — Среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха в Норильске с 1981 по 2004 года

2005	-22.9	-25.0	-20.1	-13.8	-2.9	9.7	14.8	9.6	6.6	-5.0	-14.8	-21.9	-7.1
2006	-34.3	-24.9	-21.5	-19.2	-4.6	7.9	16.5	10.3	3.7	-10.9	-22.0	-17.9	-9.7
2007	-15.7	-37.3	-20.9	-3.5	-5.9	9.8	15.3	10.5	4.7	-4.2	-18.0	-22.0	-7.3
2008	-24.1	-21.2	-23.0	-14.7	-1.8	7.3	14.4	11.5	6.9	-5.4	-18.9	-23.0	-7.7
2009	-22.0	-33.1	-23.4	-9.3	-5.1	6.7	17.3	12.1	6.3	-6.1	-23.1	-33.5	-9.4
2010	-28.3	-36.0	-19.1	-9.7	-2.7	7.0	12.0	9.5	2.5	-4.6	-21.0	-27.8	-9.9
2011	-23.0	-28.8	-12.3	-5.9	2.1	12.4	12.2	10.8	7.5	-3.8	-17.3	-14.9	-5.1
2012	-25.6	-17.5	-18.9	-11.6	-2.9	11.2	16.0	10.2	7.4	-9.3	-22.2	-23.3	-7.2
2013	-26.2	-26.0	-27.5	-10.1	1.9	11.3	19.2	12.9	2.0	-8.1	-17.0	-19.8	-7.3
2014	-38.7	-30.3	-13.2	-8.1	-2.3	7.6	13.8	8.2	2.7	-12.3	-25.4	-15.9	-9.5
2015	-29.9	-24.8	-17.6	-6.7	0.3	11.0	15.7	10.6	3.8	-9.3	-16.9	-20.8	-7.1
2016	-20.3	-20.1	-16.5	-6.7	-4.8	12.8	18.5	10.8	8.6	-5.5	-27.1	-30.0	-6.7
2017	-25.5	-25.0	-7.5	-12.7	-4.5	9.9	15.4	9.5	2.9	-6.2	-23.2	-19.8	-7.2
2018	-26.7	-24.5	-23.2	-12.7	-6.4	13.6	11.6	11.4	5.4	-0.3	-20.8	-23.6	-8.0
2019	-24.5	-23.1	-10.8	-13.0	-3.8	6.5	17.1	15.9	5.5	-4.2	-20.9	-20.5	-6.3
2020	-19.2	-15.7	-16.5	-2.8	3.9	11.8	15.3	17.2	9.2	-7.6	-13.0	-27.9	-3.8

Рисунок 2.2 — Среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха в Норильске с 2004 по 2020 года

1.2. Поток тепла в почву и атмосферу

Процесс обмена теплом между поверхностью почвы и её глубинными слоями тесно связан с молекулярной теплопроводностью, обусловленной разностью температур различных почвенных слоев. Она является основным механизмом, посредством которого осуществляется передача тепла в почве

Деятельным слоем называют такой слой почвы или воды, температура которого испытывает суточные и годовые колебания. Наблюдения показывают, что на суше суточные колебания распространяются до глубины 1 - 2 м, годовые — на слой в несколько десятков метров. В морях и океанах толщина деятельного слоя в десятки раз больше, чем на суше.

Поток тепла направлен от более нагретых слоев к менее нагретым: летом — в глубь почвы, зимой — к её поверхности. На теплообмен в почве существенно влияют снежный покров, растительность, рельеф (например, глубокий снежный покров из-за своей малой теплопроводности значительно уменьшает потери тепла почвой).

Скорость теплообмена зависит от влажности почвы. В сухой почве поры заполнены воздухом (обладает низкой теплопроводностью) и тепло передаётся через точки соприкосновения почвенных частиц между собой: процессы теплообмена протекают медленно. С увеличением влажности теплопроводность почвы увеличивается и скорость теплообмена повышается.

Изменения теплообмена наблюдаются в течение суток и года. Наличие положительного теплообмена связано с тем, что температура понижается с глубиной. Такой тип распределения температуры в почве называется типом инсоляции. Он характерен для тех моментов и промежутков времени, когда поглощение радиации земной поверхностью превышает излучение (обычно днём и летом). Отрицательный теплообмен связан, наоборот, с повышением температуры почвы с глубиной. Такой тип распределения называется типом

излучения. В данном типе излучение радиации земной поверхностью преобладает над поглощением (ночью и зимой).

Вследствие затухания периодических колебаний температуры с глубиной теплообменом охватывается некоторый слой почвы. Чем больше период колебаний, тем больше этот слой. Данный слой, в котором происходят суточные и годовые колебания температуры называют активным слоем почвы. В годовом теплообмене участвуют слои земли до 10—20 м, в суточном — до 100 см.

На его нижней границе температура не изменяется и располагается слой, который называется слоем постоянной годовой температуры почвы. Ниже слоя постоянной годовой температуры начинается непрерывное повышение температуры к центральным частям земного шара, характеризуемое величиной геотермического градиента температуры. В коренных породах земли он составляет 0,0003°/см. Общее количество тепла, идущего от центра земного шара к поверхности достаточно мало (около 55 кал/см*год) в сравнении с солнечной радиацией.

Теплообмен в атмосфере — обмен теплотой, происходящий в атмосфере в горизонтальном и в вертикальном направлениях. Поток тепла направлен от более нагретых областей к менее нагретым, а его интенсивность тем больше, чем больше разность температур. В тропосфере температура убывает от экватора к полюсам, а на каждой данной широте понижается с возрастанием высоты. Вследствие междуширотного теплообмена атмосфера в тропических и субтропических широтах (в Северном полушарии до 40°) теряет тепло, а в более высоких широтах — получает его. Кроме того, теплообмен происходит также и в направлении широт вследствие неоднородности тепловых свойств подстилающей поверхности (например, суши и моря). При вертикальном теплообмене в атмосфере поток тепла направлен главным образом вверх от земной поверхности. В связи с существованием годовых и суточных

изменений температуры и суточных колебаний скорости ветра наблюдается годовой и суточный ход интенсивности теплообмена.

Перенос тепла в атмосфере осуществляется:

- конвекцией (включая адвекцию), то есть горизонтальным и вертикальным переносом воздуха;
- лучистым теплообменом, т.е. теплообменом, обусловленным испарением воды и конденсацией водяного пара,
- молекулярной теплопроводностью (незначительно).

Лучистый теплообмен происходит вследствие поглощения и излучения длинноволновой радиации водяным паром, пылью, углекислым газом, облаками и др. газами и аэрозолями атмосферы. В результате лучистого теплообмена в конечном счёте происходит теплоотдача из атмосферы в мировое пространство. Количество отдаваемого тепла составляет в среднем 400 кал/см*сут. Потеря тепла в мировое пространство, в общем, уменьшается от низких широт к высоким.

Теплообмен, вызванный процессами испарения и конденсации, приводит к переносу тепла с земной поверхности в атмосферу в среднем в количестве около 120 кал/см*сут. Наибольшее количество тепла этим путём переносится в низких широтах.

Горизонтальный конвективный (адвективный) теплообмен между южным и северным широтами осуществляется меридиональным переносом воздушных масс и составляет около 1019 кал/сут. Конвективный теплообмен в вертикальном направлении вызывается как упорядоченными вертикальными перемещениями воздуха в областях циклонов и антициклонов, так и турбулентностью. В среднем для Северного полушария вертикальный поток тепла составляет около 50 кал/см*сут.

Турбулентный поток между подстилающей поверхностью и атмосферой возникает вследствие разности температуры земной поверхности и температуры располагающихся над ней слоёв воздуха. Он зависит от интенсивности турбулентного перемешивания и стратификации приземного слоя атмосферы.

1.3 Методика проведения анализа

В работе исследовались произошедшие изменения в температуре почвы и воздуха во всем регионе от десятилетия к десятилетию, их взаимосвязь. В качестве исходных данных использовались данные реанализа Era 5 Land (ERA5L, 0.1° x 0.1°) с 1981 по 2020 гг [1]. Реанализ сегодня является одним из самых современных и объективных методов для исследования. Это самая последняя и самая современная версия, разработанная консорциумом ECMWF. По результатам опубликованных результатов в высоких широтах качество реанализа ERA5 превосходит ERA - Interim, MERRA - 2, CFSR и JRA - 55.

ERA5, преемник ERA-Interim, предоставляет глобальные оценки атмосферных переменных, для температуры почвы доступно разрешение приблизительно 9 км (0.1° x 0.1°) . Произведенный ECMWF, ERA5 в настоящее время простирается до 1979 года; в конечном счете он будет расширен до 1950 года. ERA5 представляет собой самые прогрессивные данные, полученные в результате моделирования и ассимиляции данных с момента выпуска ERA-Interim. Многочисленные улучшения и достижения обсуждаются в Руководстве экспертов и цитируемой литературе. Хотя это самый современный продукт, пользователи все же должны учитывать некоторые его ограничения: два из основных из них заключаются в том, что нефизические тенденции и изменчивость могут присутствовать в данных из-за изменений в системе наблюдений и что климатические характеристики некоторых переменных,

таких как потоки поверхностной энергии, представлены здесь не очень хорошо.

В ходе работы анализировались данные с 1981 по 2020 года. Для каждого месяца были рассчитаны нормы за 40 лет, а также аномалии за каждое десятилетие.

Для анализа связи температуры в ходе исследования рассчитывалось климатическое значение температуры для всех глубин каждого месяца, а также для приземной температуры воздуха. Эти величины рассчитывались как среднее значение температуры в анализируемом месяце за 40 лет.

$$T_{month} = \frac{\sum T_i}{40} \quad (1.1)$$

Где Ti – среднемесячная температура i-ого года.

Согласно рекомендациям ВМО осредненные характеристики за временной промежуток не менее 30 лет можно считать климатическими [2]. Нормы были рассчитаны для каждого месяца, кроме того, рассчитывалась аномалия величин температуры, она определялась как разница между значением среднемесячной температуры в заданном месяце и климатическим средним той же величины, рассчитанной для заданного месяца, формула (1.2)

$$AnT = Tmonth - \overline{T} \quad (1.2)$$

Полученные аномалии температуры воздуха коррелировались с аномалиями температуры 0-7 см, значимость корреляции оценивалась критерием Фишера на пятипроцентном уровне значимости. Также для Яунде были построены тренды изменения аномалий, значимость тренда также была оцене-

на с помощью F-статистики Фишера. Формула для расчёта критерия Фишера для проверки значимости приведена ниже (1.3, 1.4).

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} * \frac{f_2}{f_1}, \text{ где} \quad (1.3)$$

$$f_2 = N - f_1 - 1 \quad (1.4)$$

где R^2- квадрат коэффициента корреляции, f_1- число степеней свободы тренда (для линейного тренда f_1=1), f_2- число степеней свободы выборки, N- количество лет в используемой выборке. При сравнении рассчитанного результата с табличным (таблица 1.1) уровень значимости брался равным 5%.

Таблица 1.1 − Значения критерия Фишера (F-критерия) для уровня значимости p = 0.05

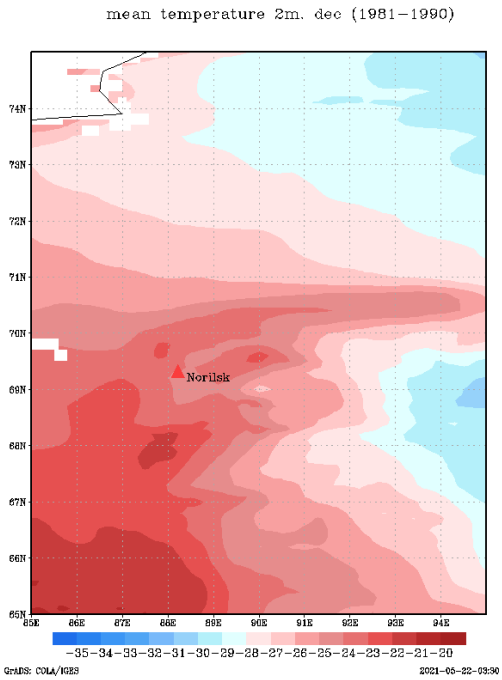
f1											
f2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	245.95
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.43
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.70
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.86
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.62
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	3.94
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.51
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.22
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.01
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.85
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.72

12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.62
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.53
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.46
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.40
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.35
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.31
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.27
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.23
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.20

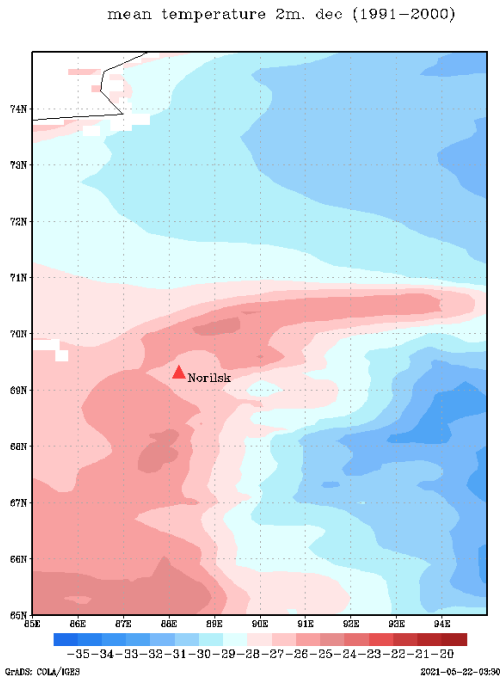
2 Глава. Анализ результатов исследования

2. 1. Аномалии температуры воздуха за период с 1981 по 2020 года.

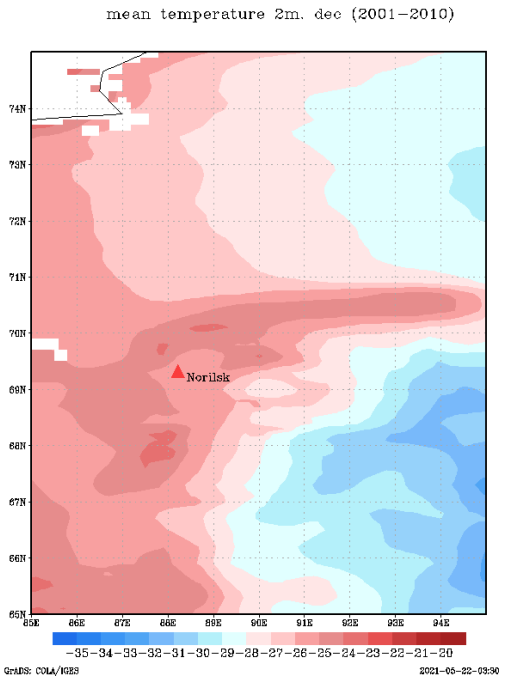
В ходе исследования было проанализировано изменение средней температуры для каждого месяца, рассчитанное по десятилетиям. Согласно рекомендациям ВМО период в 10 лет считается достаточным для выявления общих закономерностей изменения температуры. Ниже представлен ход аномалий для самого холодного периода с декабря по февраль.



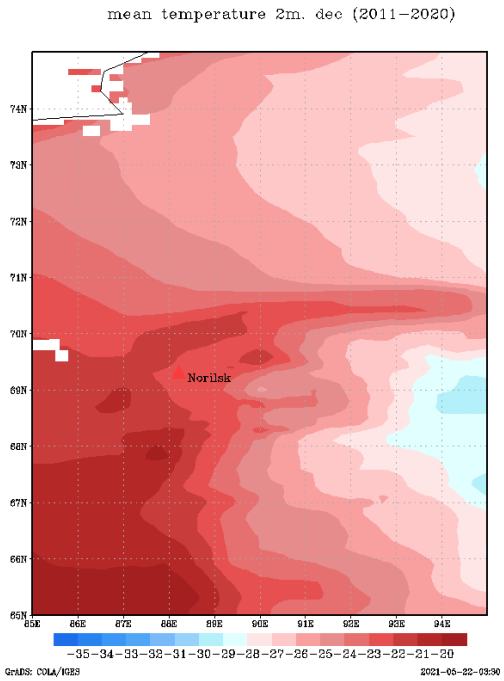
а)



б)

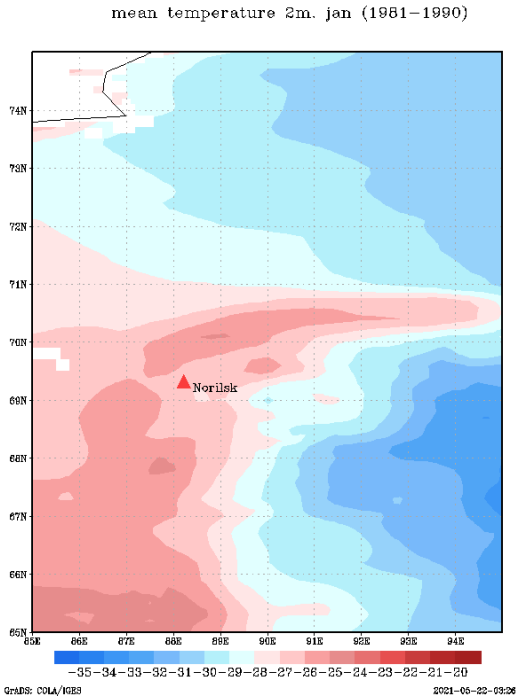


в)

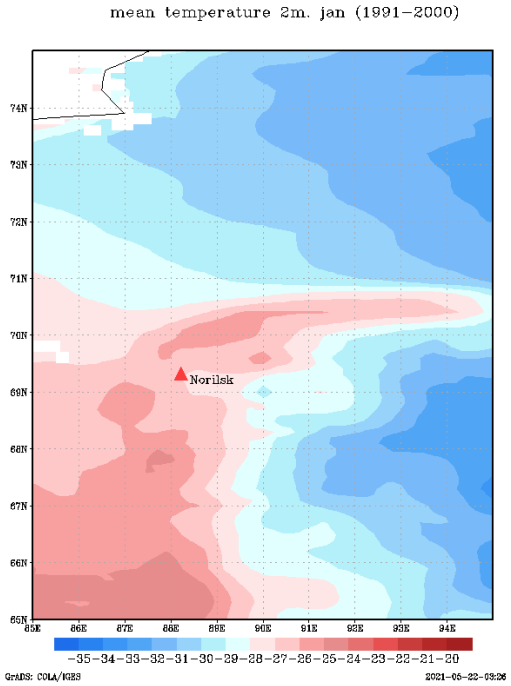


г)

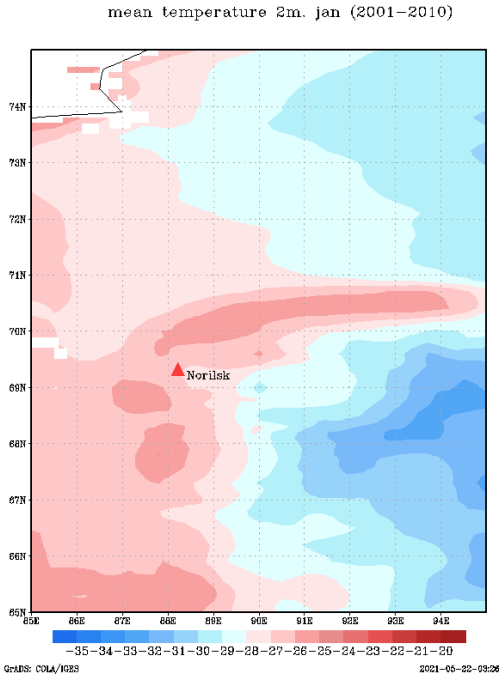
Рисунок 2.1 — Температура воздуха в декабре за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)



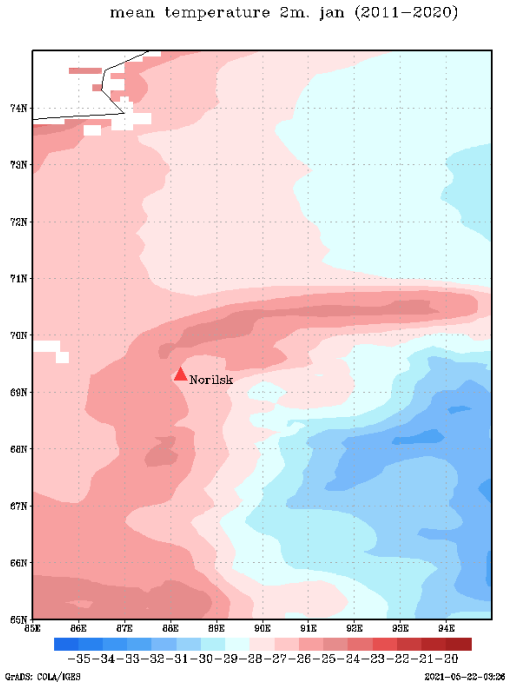
а)



б)

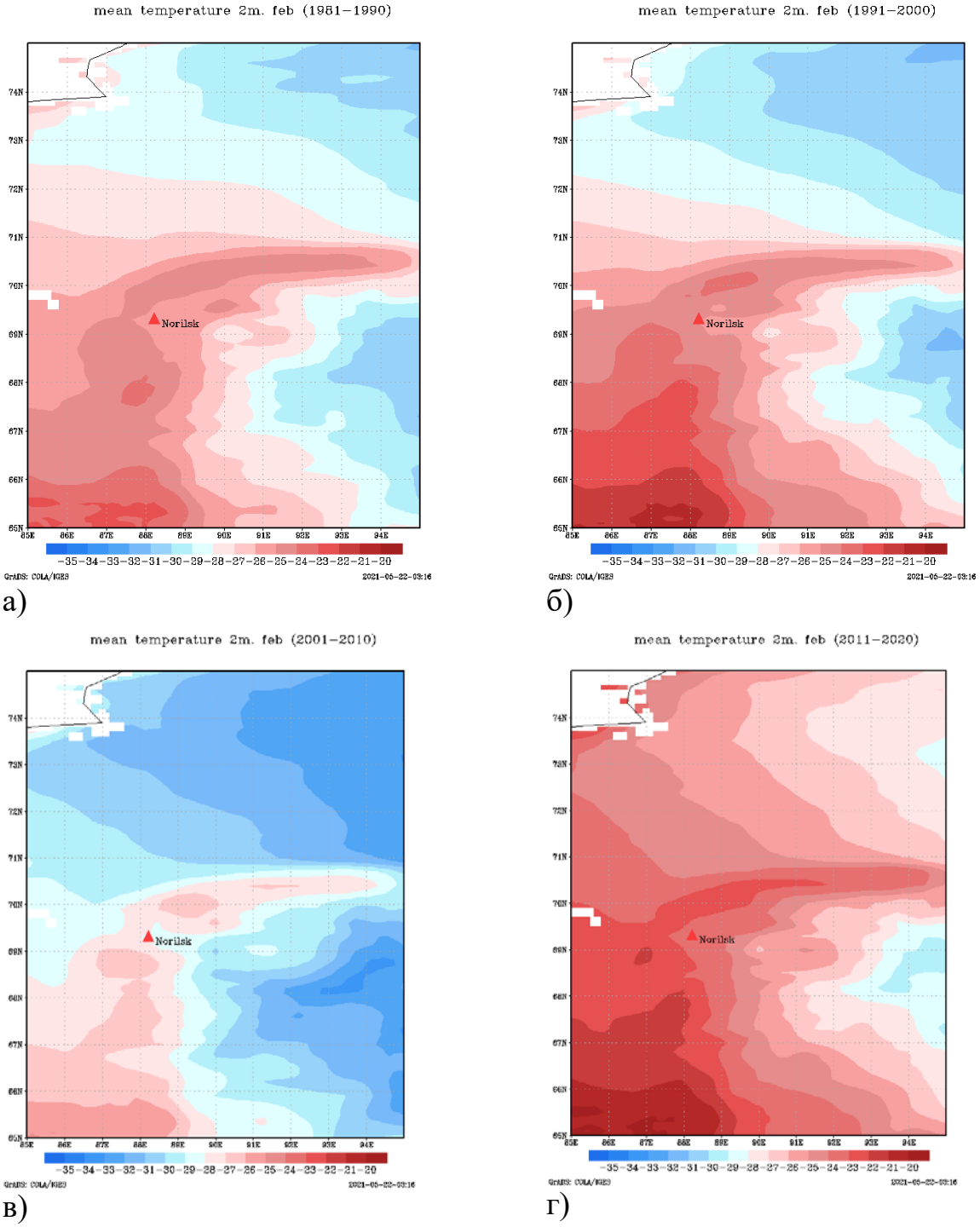


в)



г)

Рисунок 2.2 — Температура воздуха в январе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

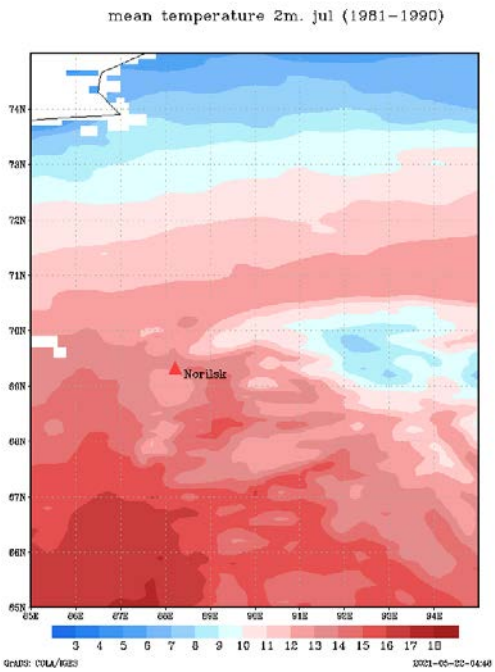


а) б)

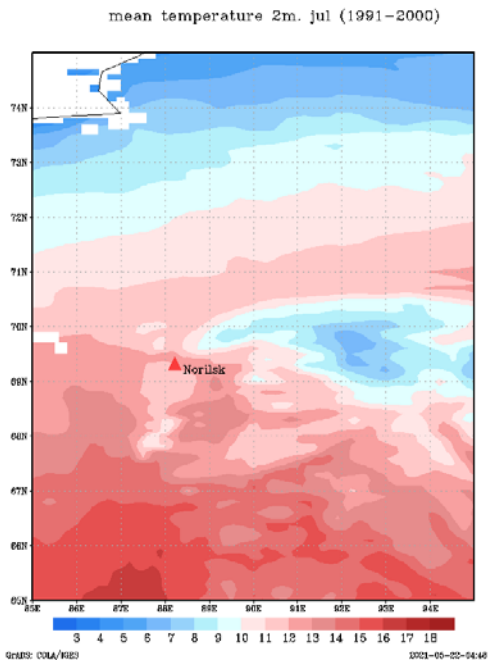
в) г)

Рисунок 2.3 — Температура воздуха в феврале за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

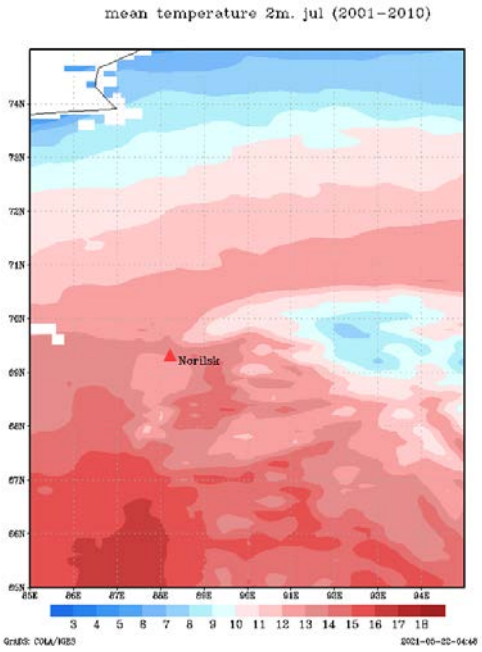
Как видно, температуры воздуха растут, особенно это заметно на юго-западе региона. Наиболее сильные изменения отмечены в последнее дясятилетие. Сравним полученные закономерности с результатами для наиболее теплых месяцев, июля и августа.



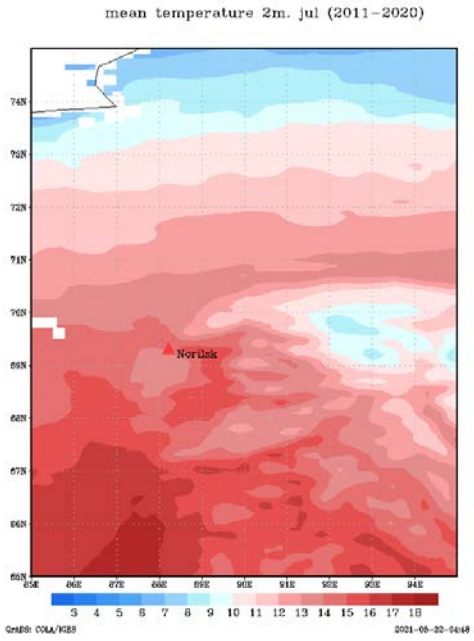
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.4 — Температура воздуха в июле за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

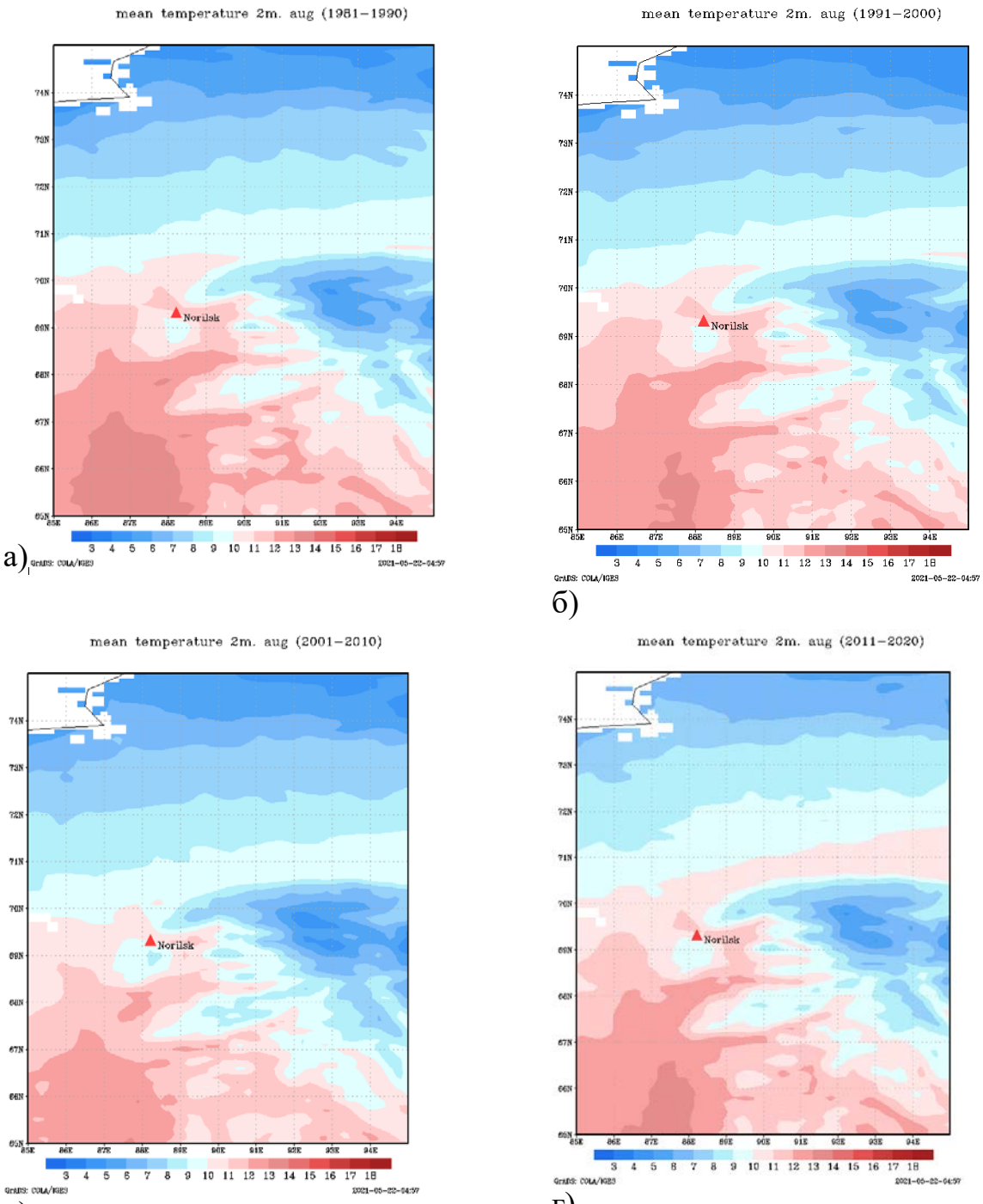


Рисунок 2.5 — Температура воздуха в августе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

Как видно, здесь картина аналогичная, в последнее десятилетие теплеет особенно интенсивно, особенно на юго-западе региона

2. 2. Аномалии температуры почвы за период с 1981 по 2020 года

Всего для анализа были взяты несколько уровней. Первый уровень располагается на глубине 0-7 см, второй на глубине 7-28 см, третий на глубине 28-100 см и четвёртый на глубине 100-289 см.

Так как для деградации вечной мерзлоты наиболее показательны теплые месяцы, то есть июль и август, остановимся сначала на них.

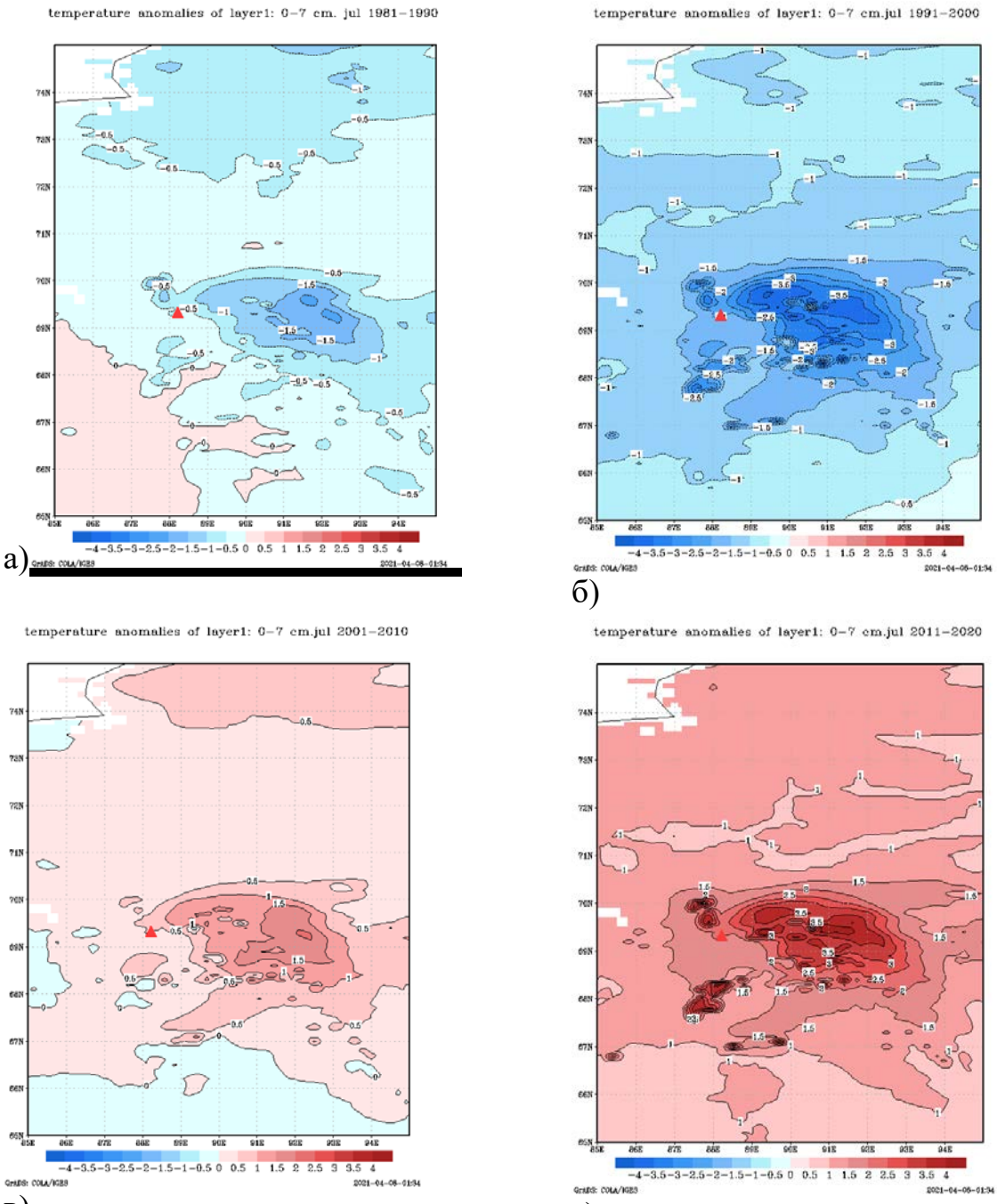


Рисунок 2.1 — Аномалии температуры почвы на глубине 0-7 см в июле за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с

2011 по 2020 гг. (г)

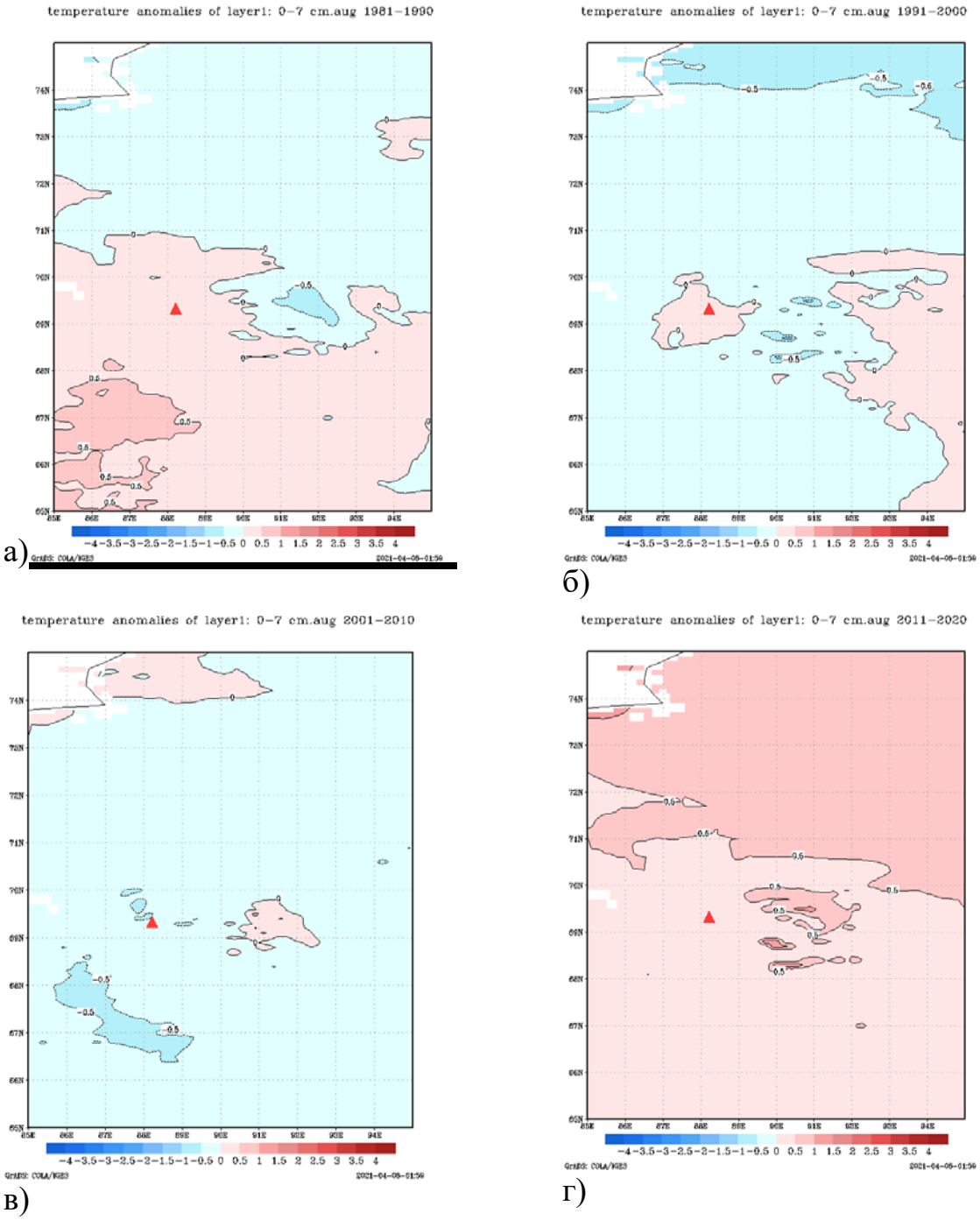


Рисунок 2.2 — Аномалии температуры почвы на глубине 0-7 см в августе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

Для июля и августа на глубине 0-7 см температура также оказывается около нормы, положительные аномалии в последнее десятилетие сдвигаются к полюсу. Для остальных месяцев отмечаются сходные тенденции.

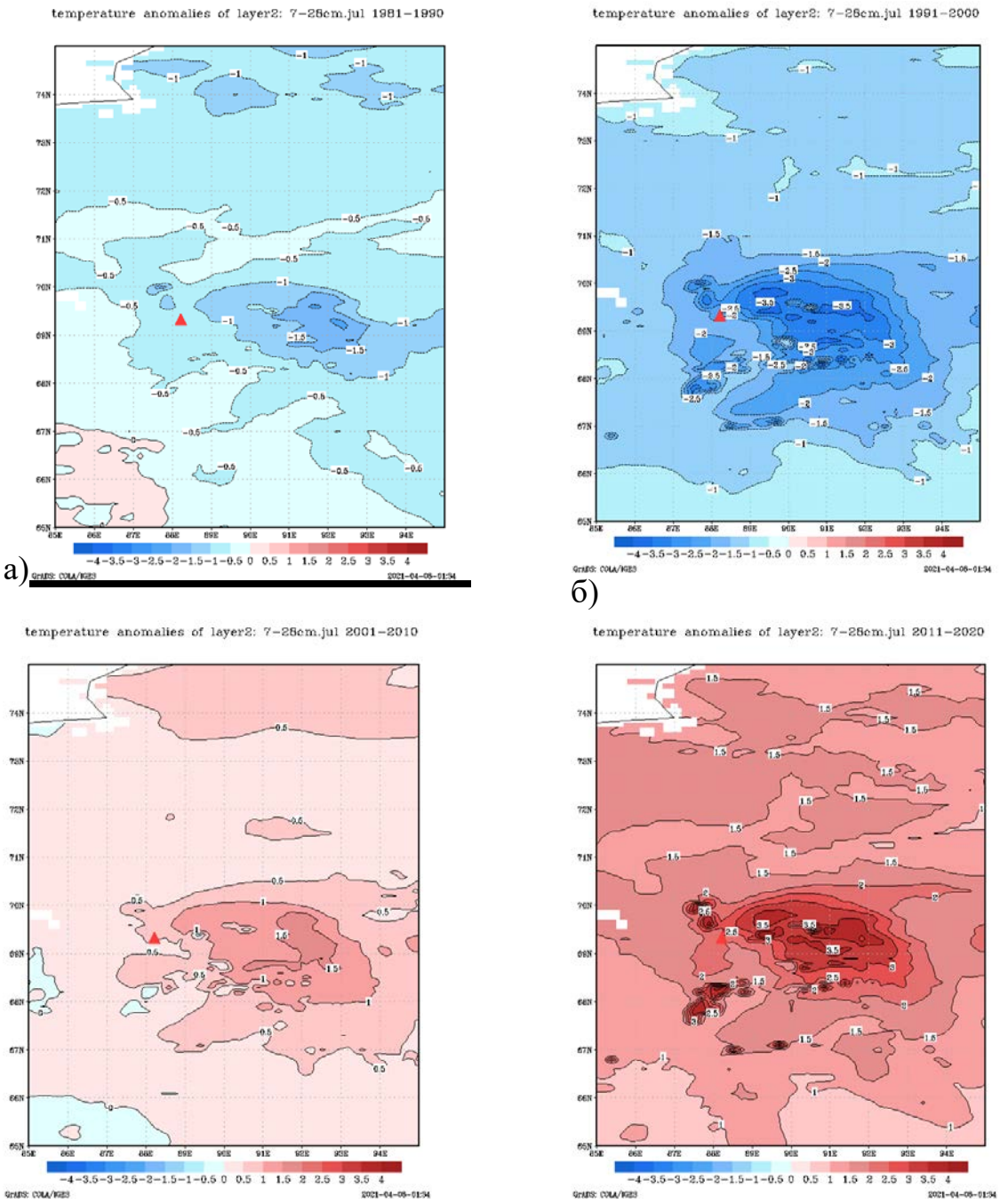


Рисунок 2.3 — Аномалии температуры почвы на глубине 7-28 см в июле за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

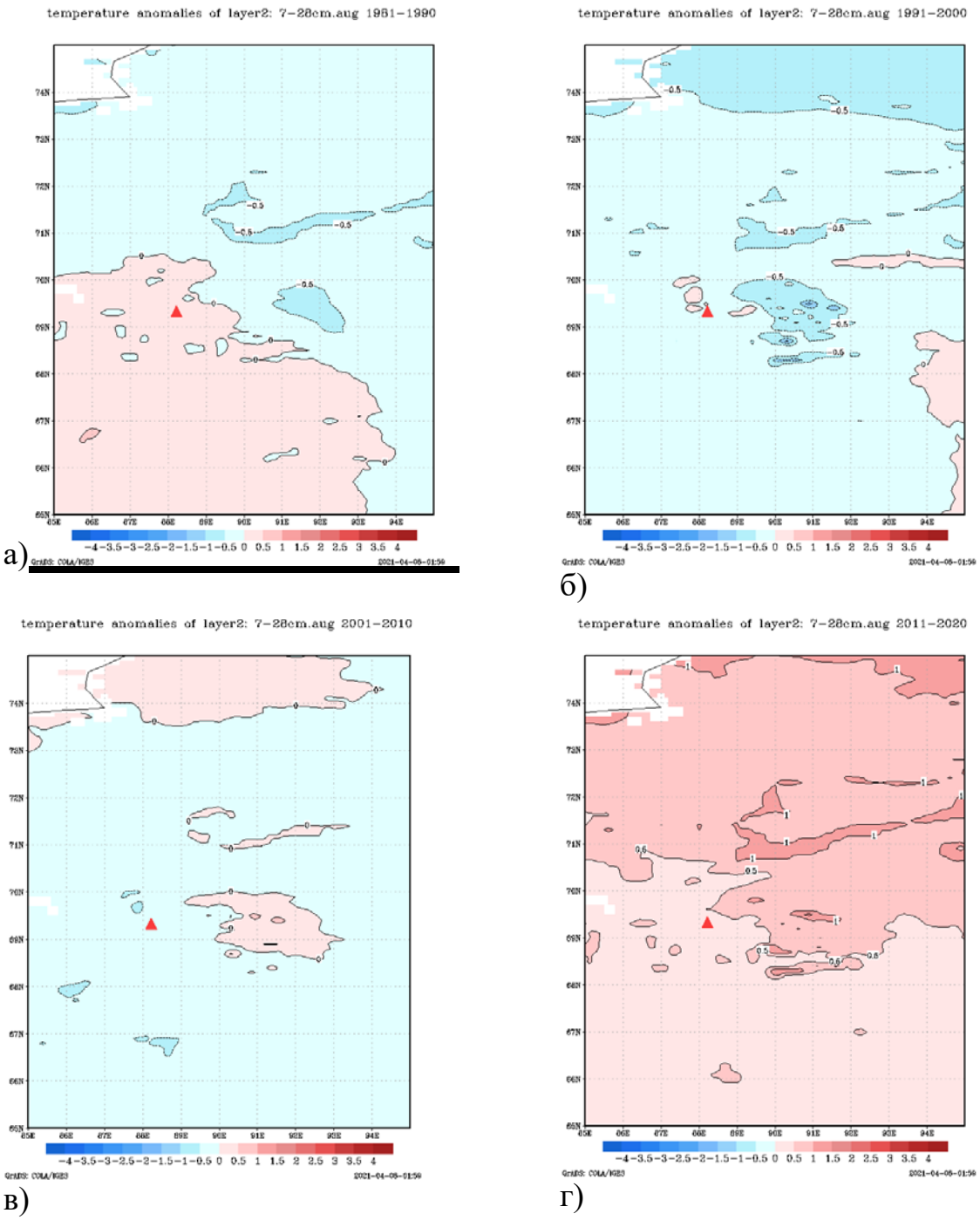


Рисунок 2.4 — Аномалии температуры почвы на глубине 7-28 см в августе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

Как показано выше район Норильска и территория восточнее его на этой глубине теплеет, особенно в июле. Кроме того, положительные аномалии также в последнее десятилетие отмечаются ближе к полюсу.

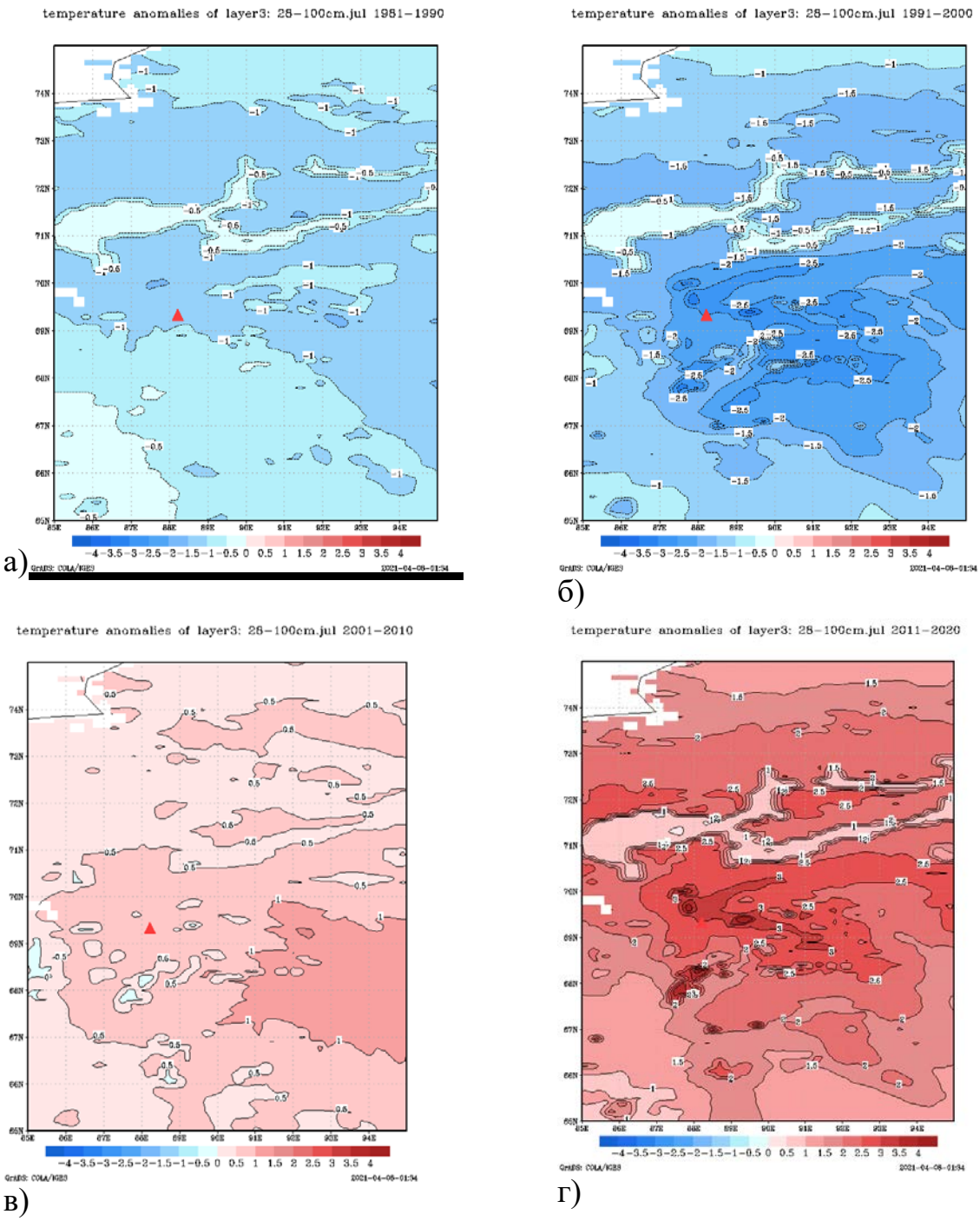


Рисунок 2.5 — Аномалии температуры почвы на глубине 28-100 см в июле за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

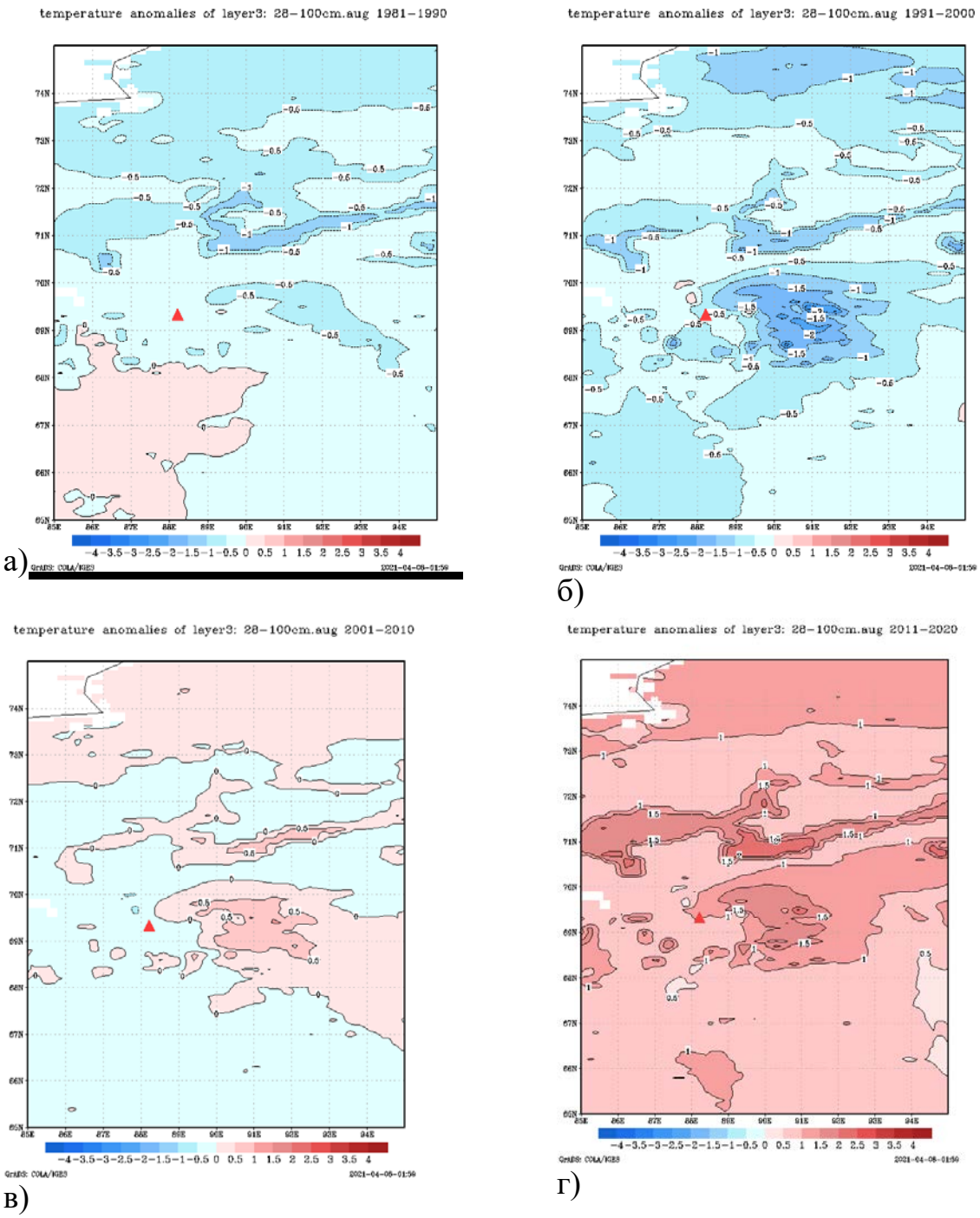


Рисунок 2.6 — Аномалии температуры почвы на глубине 28-100 см в августе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

На рисунках 2.5 и 2.6 также показано, насколько холодными были первые два десятилетия относительно всего периода и как возросли аномалии температуры к концу. Так, как и на более малых значениях глубин, здесь в

последнее десятилетие теплеет в районе Норильска, восточнее него, а также в приполярных районах.

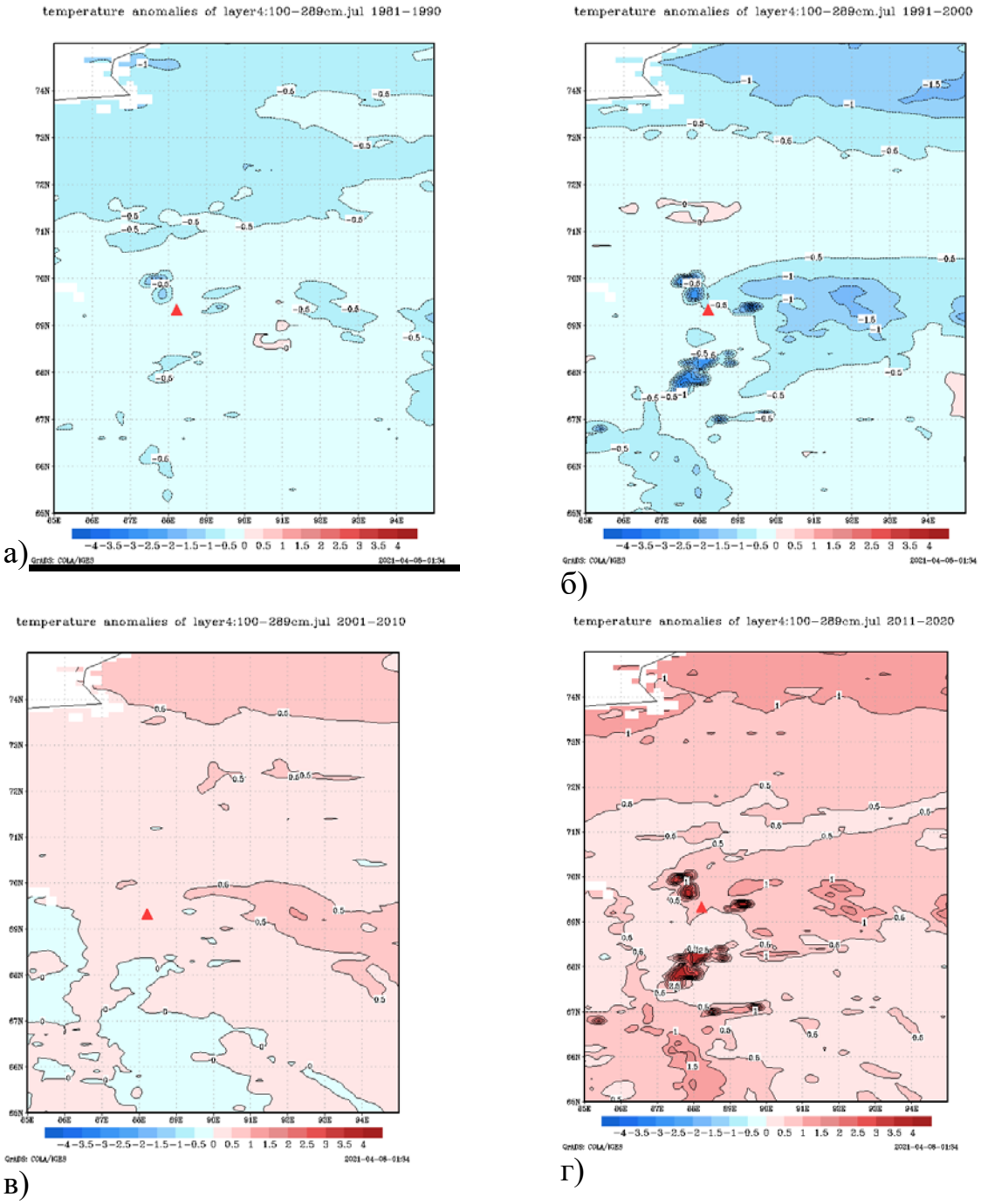


Рисунок 2.7 — Аномалии температуры почвы на глубине 100-289 см в июле за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

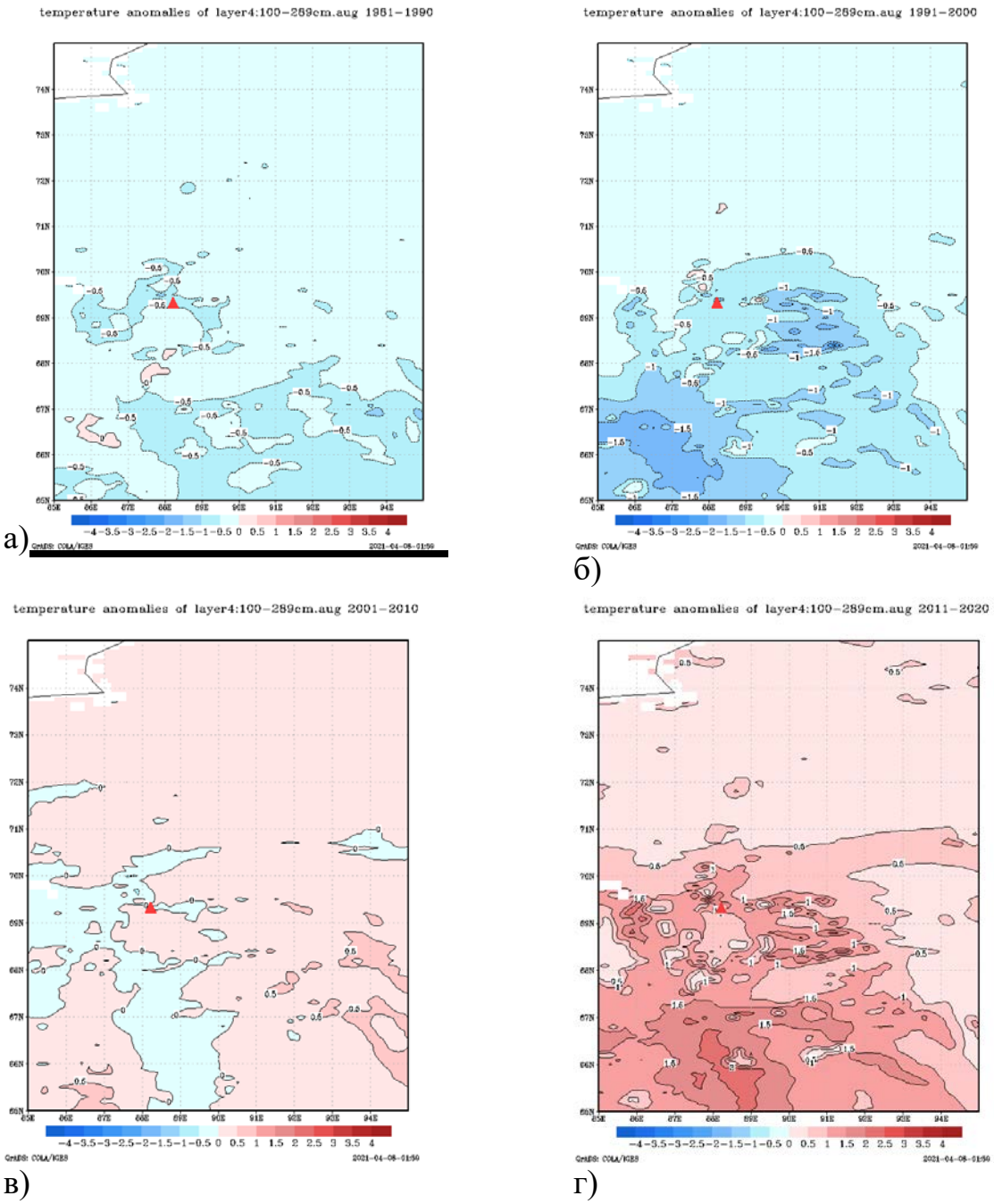


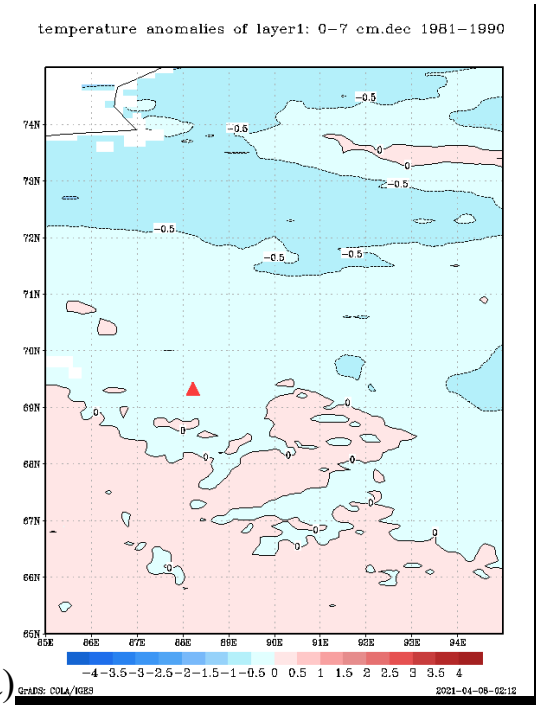
Рисунок 2.8 — Аномалии температуры почвы на глубине 100-289 см в августе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

Согласно результатам, представленным на рисунках 2.7 и 2.8 в последние десятилетия также участились положительные аномалии, однако по модулю они меньше аномалий на третьем уровне.

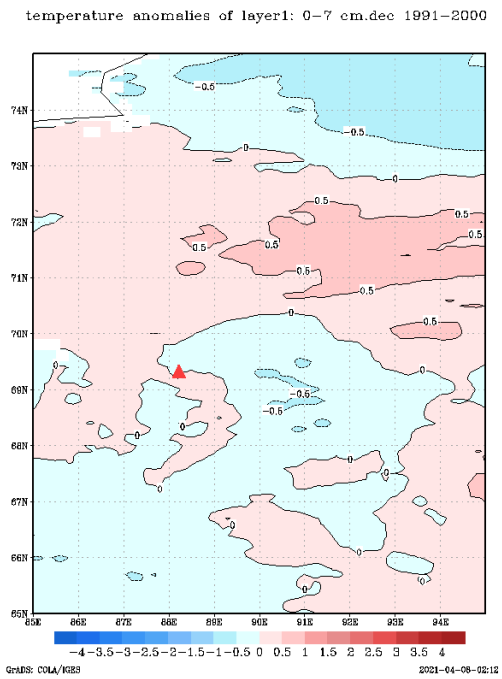
Аномалии температуры почвы на глубинах летом наиболее ярко показывают увеличение температуры. Рост температуры, как и в случае с холодными месяцами, наблюдается со стороны полюса. Исключение составляет лишь самый глубокий слой 100-289 см. Здесь наиболее интенсивный рост аномалий на юго-западе региона. Это можно объяснить тем, что на такой глубине температура более консервативна. Однако хорошо заметно, что аномалии температуры двух последних десятилетий здесь также увеличились. В целом можно отметить, что наиболее интенсивно увеличиваются аномалии в слоях на глубине 7-28 см и 28-100 см.

Если рассматривать самый холодный период, то там отмечаются аналогичные тенденции, однако аномалии не такие большие.

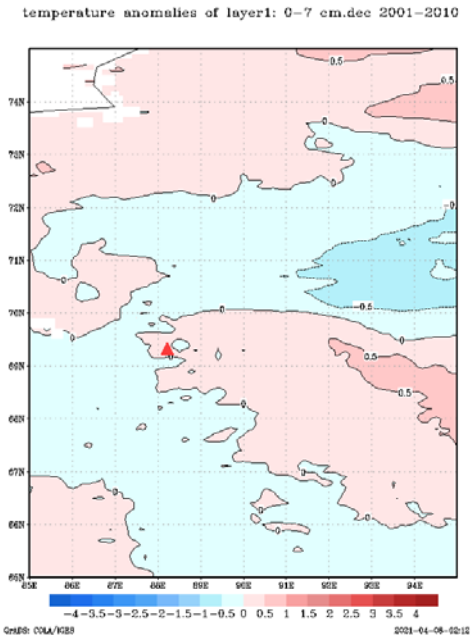
Рассмотрим первый уровень, расположенный на глубине 0-7 см.



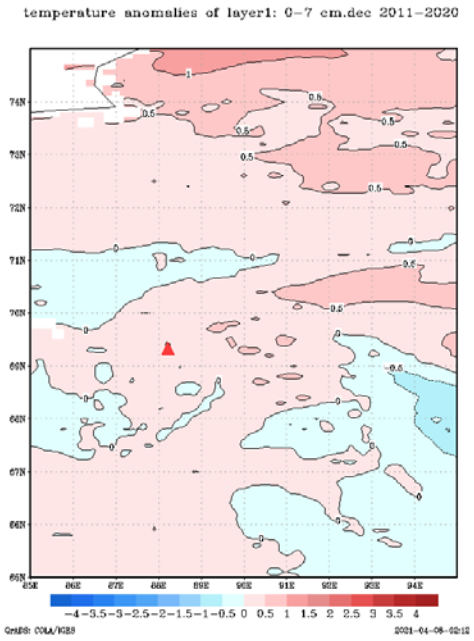
а)



б)

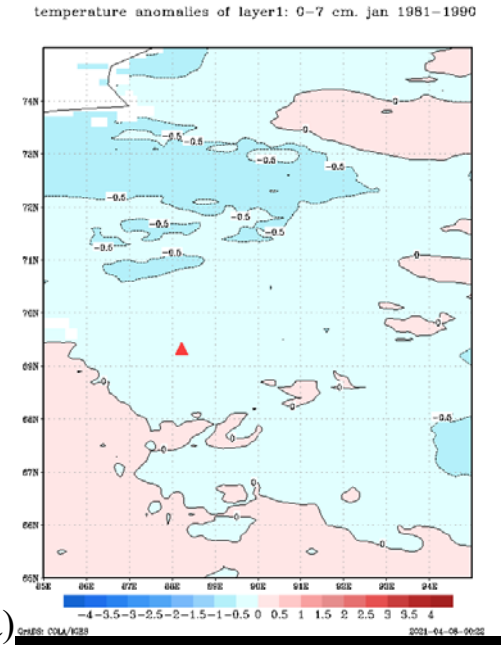


в)

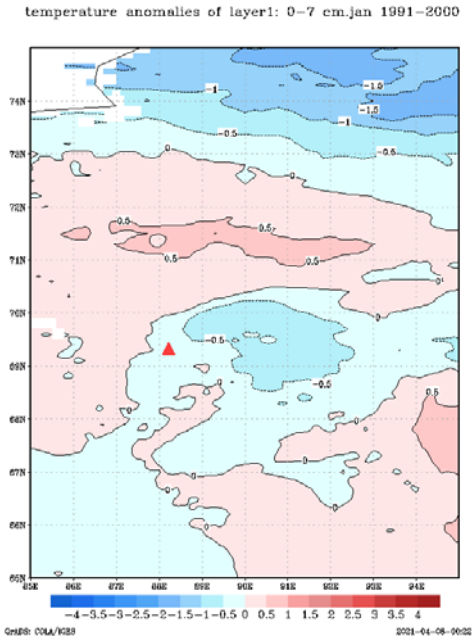


г)

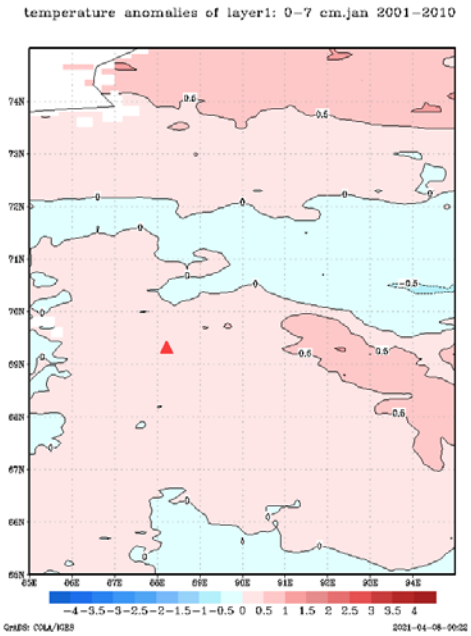
Рисунок 2.9 — Аномалии температуры почвы на глубине 0-7 см в декабре за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)



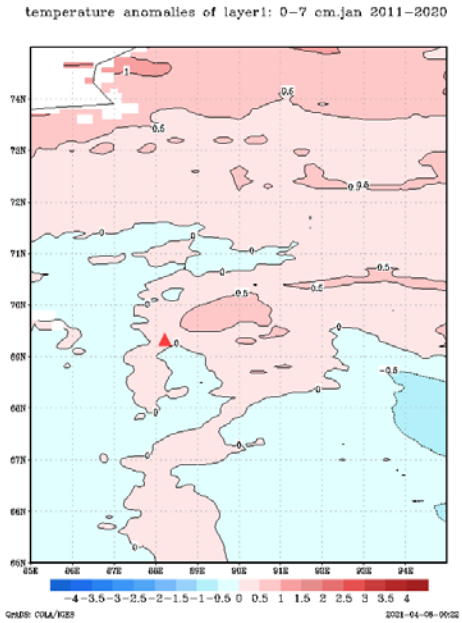
а)



б)

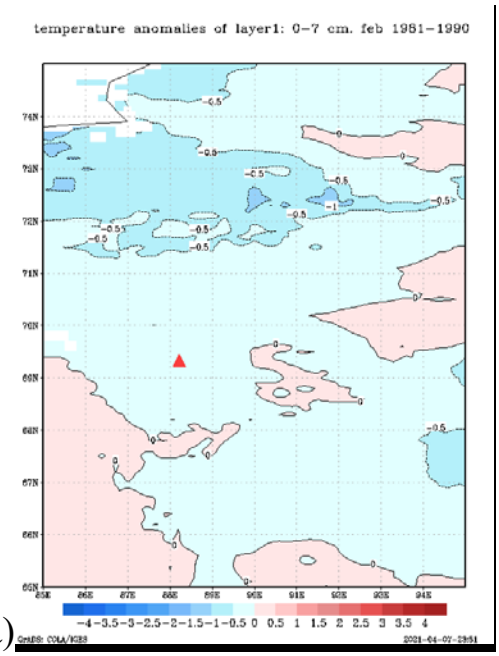


в)

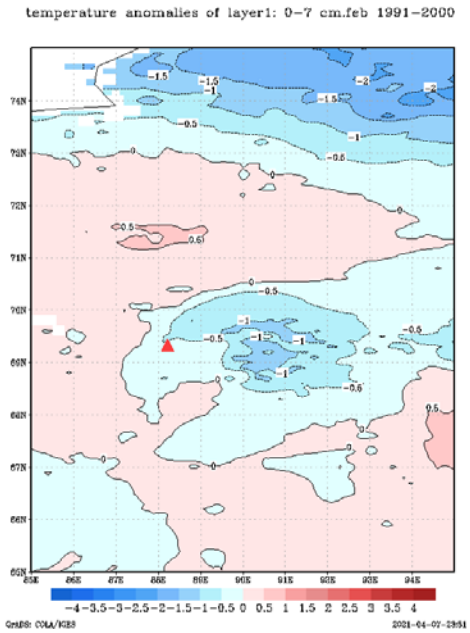


г)

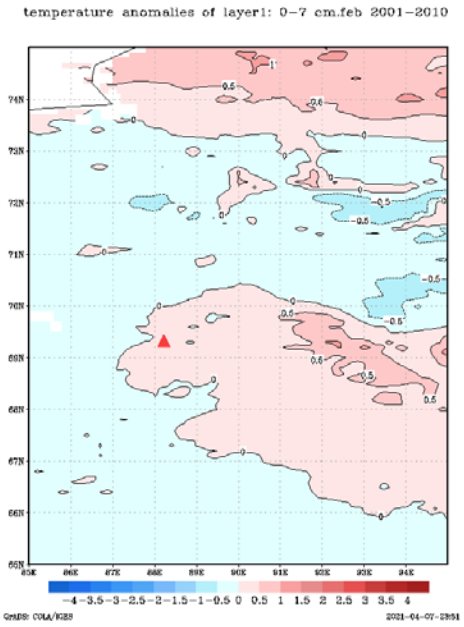
Рисунок 2.10 — Аномалии температуры почвы на глубине 0-7 см в январе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)



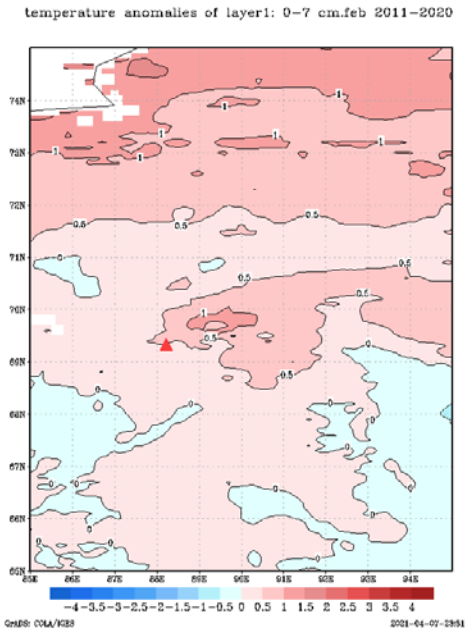
а)



б)



в)

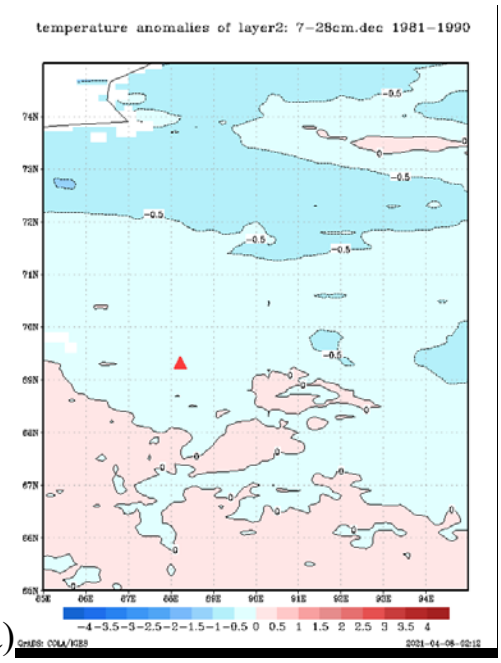


г)

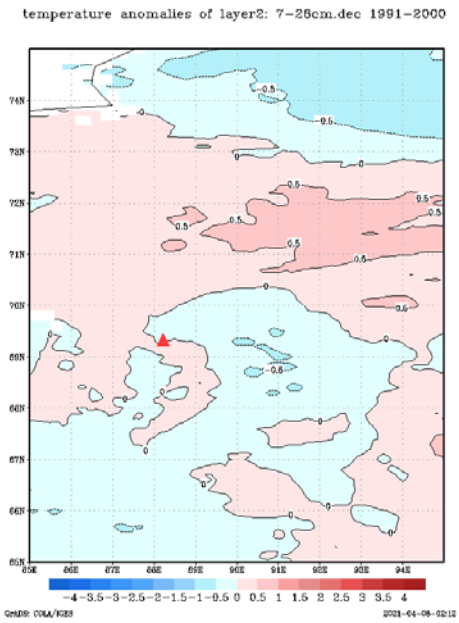
Рисунок 2.11 — Аномалии температуры почвы на глубине 0-7 см в феврале за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

Интересно, что здесь в сравнении с распределением температуры положительные аномалии сдвинуты к арктическим территориям. В районе Норильска в самый холодный период аномалии на глубине 0-7 см сохраняются около нормы.

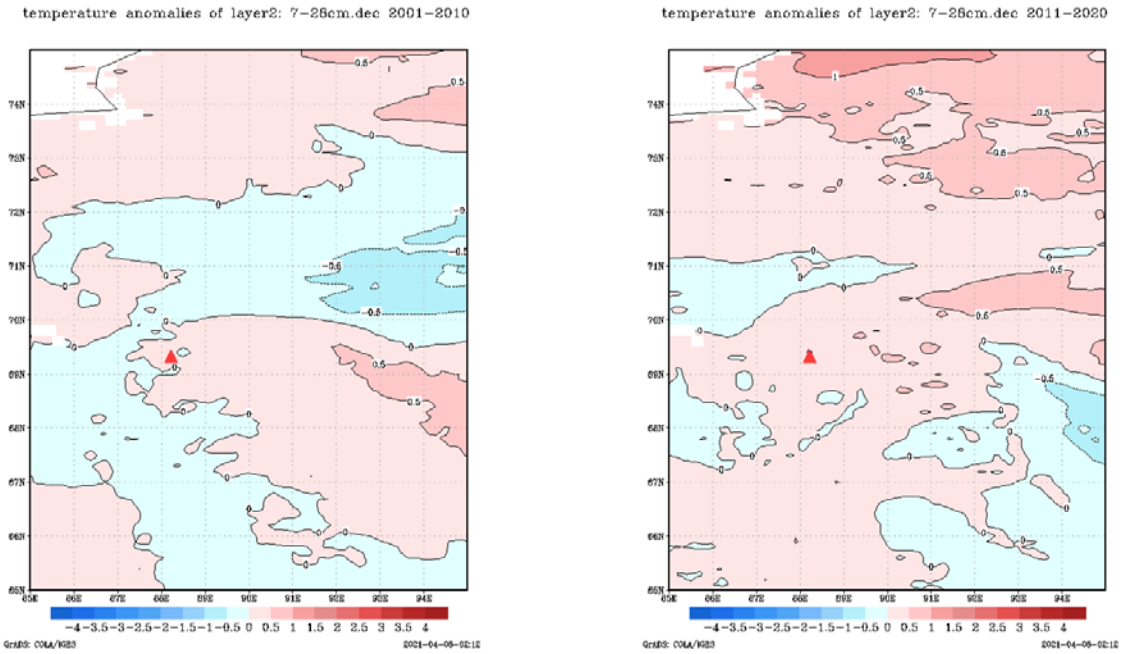
Рассмотрим глубину 7-28 см.



а)

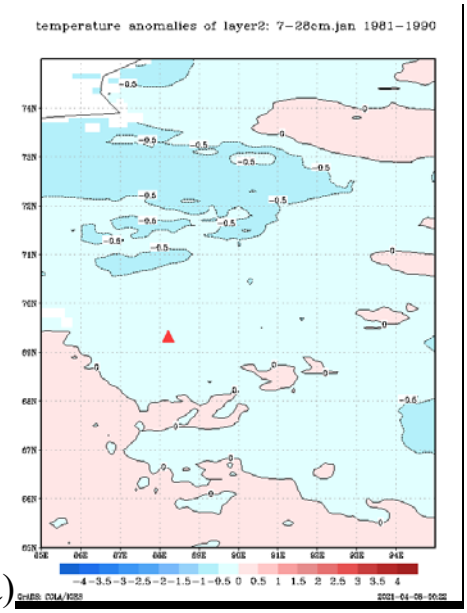


б)

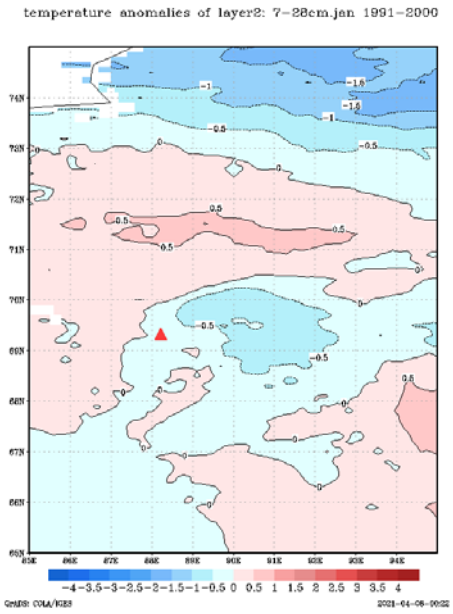


в) г)

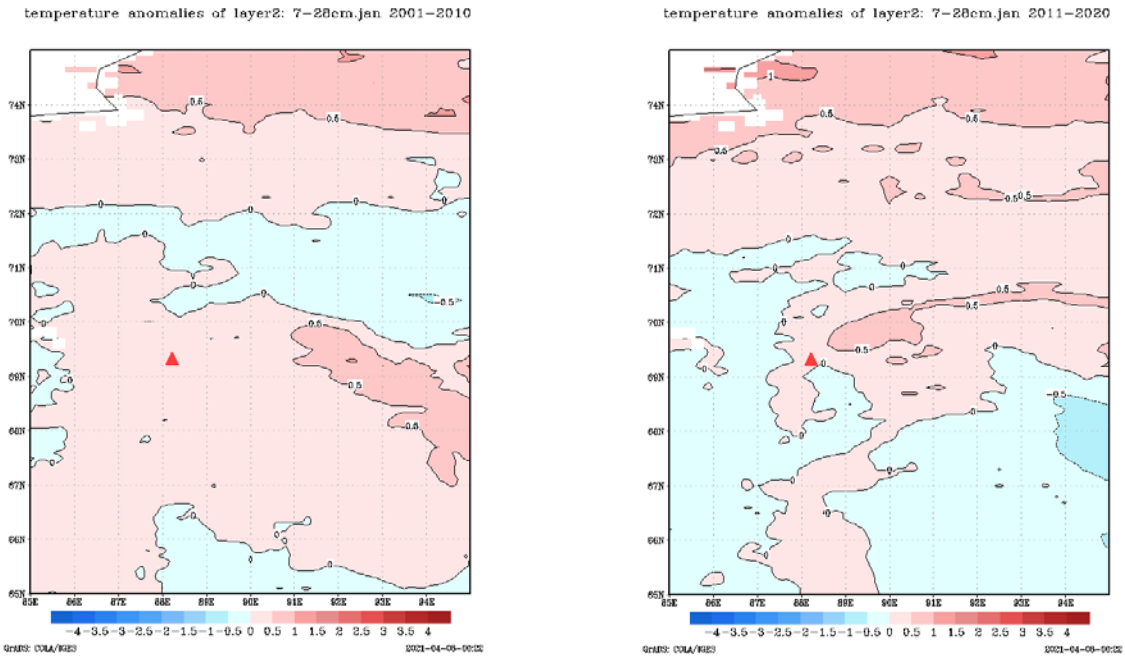
Рисунок 2.12 — Аномалии температуры почвы на глубине 7-28 см в декабре за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)



а)

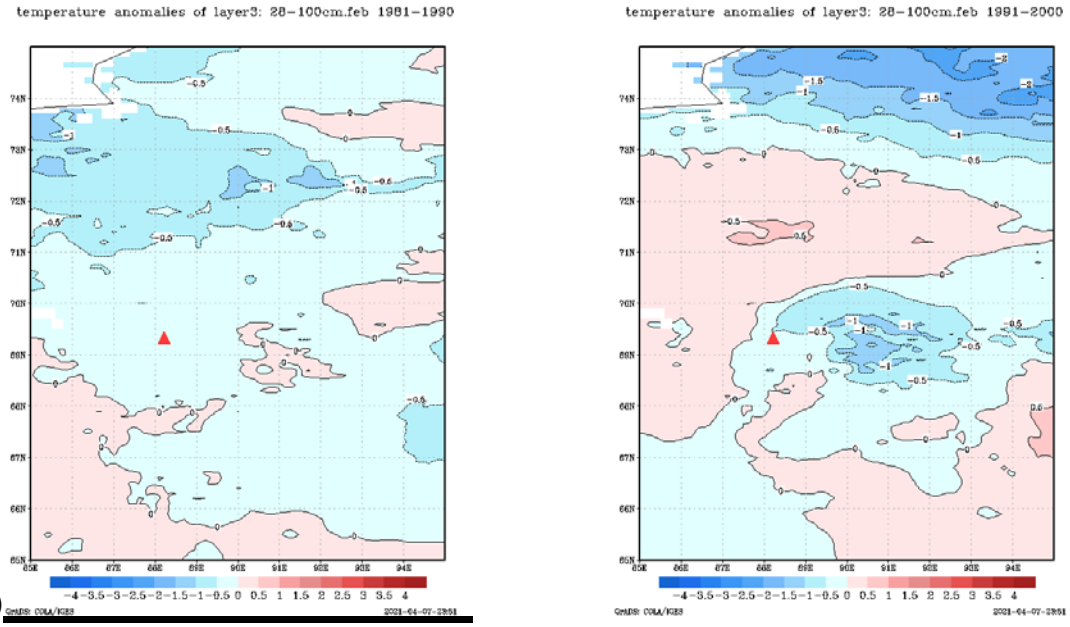


б)

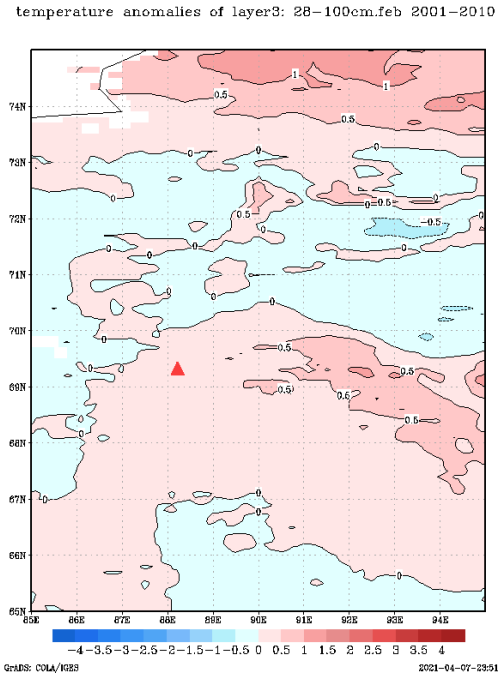


в) г)

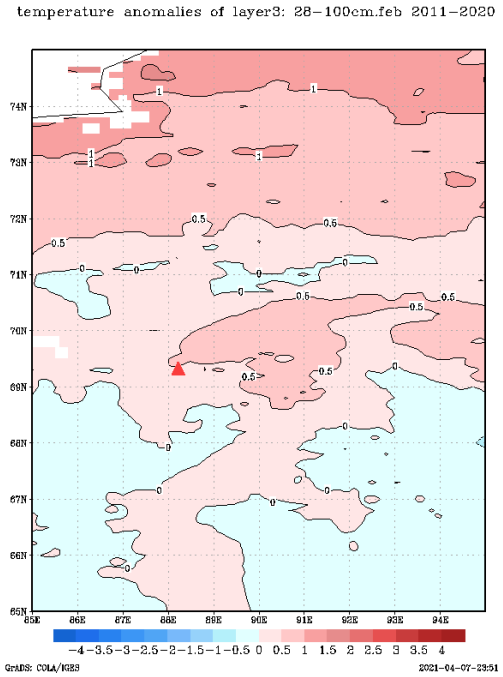
Рисунок 2.13 — Аномалии температуры почвы на глубине 7-28 см в январе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)



а) б)



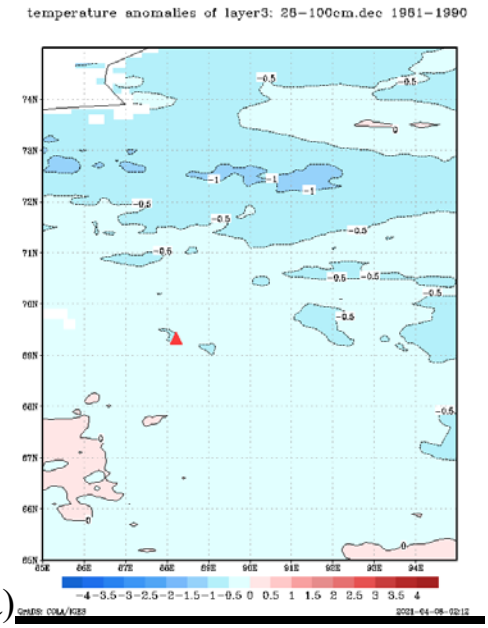
в)



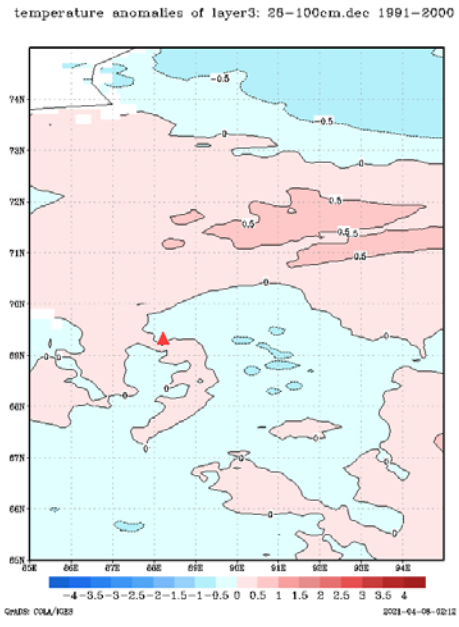
г)

Рисунок 2.14 — Аномалии температуры почвы на глубине 7-28 см в феврале за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

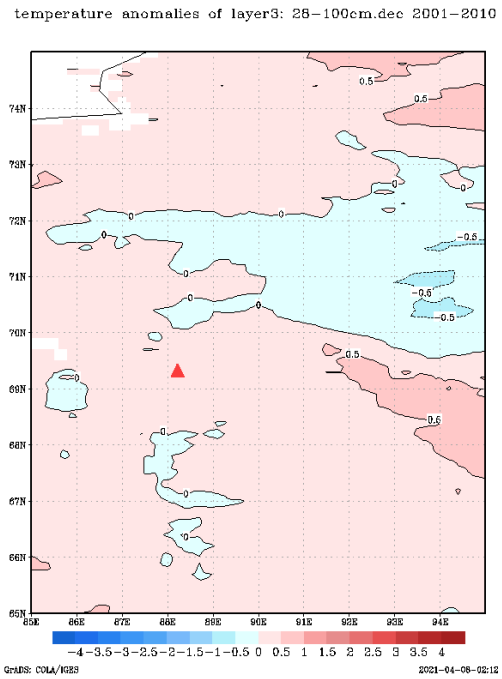
На глубине 7-28 см температура в районе Норильска отмечаются незначительные положительные аномалии, наиболее высокие значения положительных аномалий во все месяца смещены к полюсу.



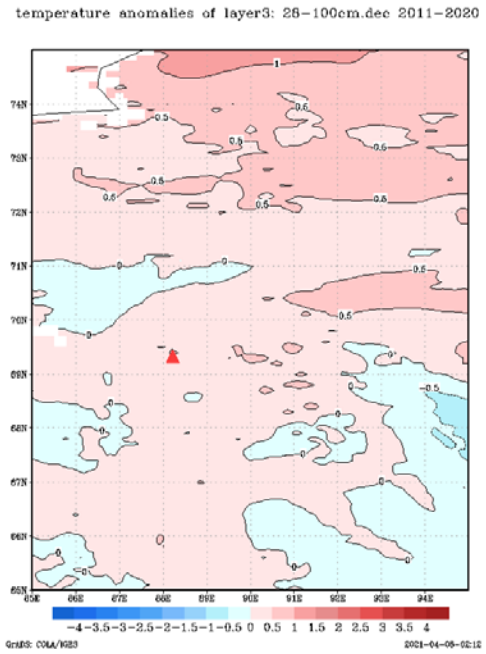
а)



б)



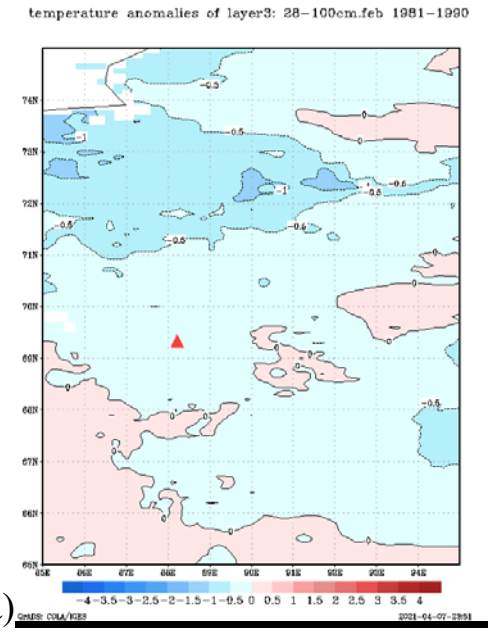
в)



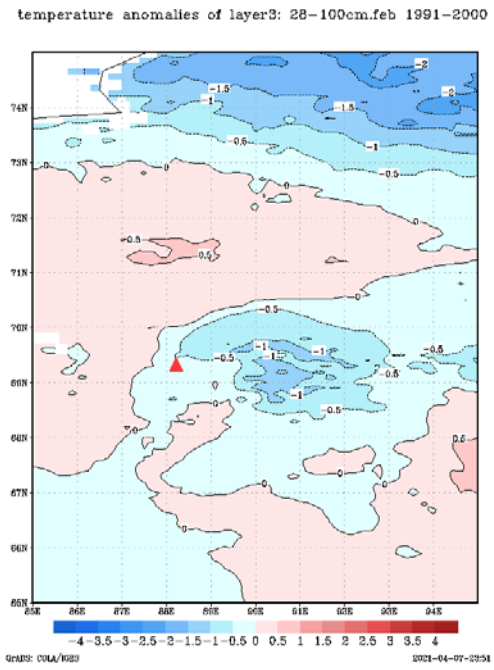
г)

Рисунок 2.15 — Аномалии температуры почвы на глубине 28-100 см в декабре за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

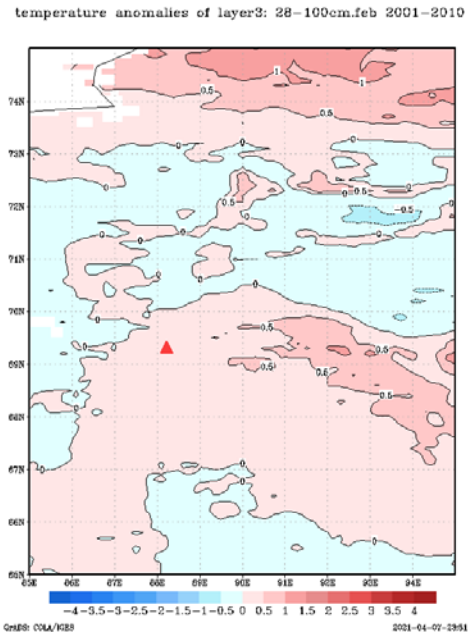
На глубине 7-28 см в последнее десятилетие также прослеживаются положительные аномалии, но они незначительны.



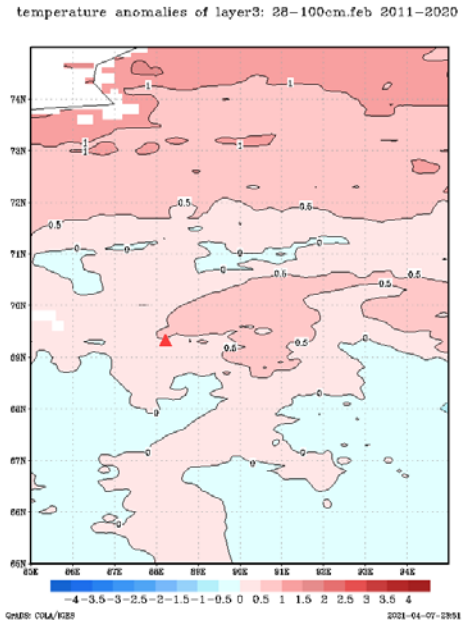
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.16 — Аномалии температуры почвы на глубине 28-100 см в феврале за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

Таким образом, как показано на рисунках 2.13-2.16 изменение аномалий в зимние месяцы в районе Норильска на глубине 28-100 см незначительны, наиболее существенные изменения аномалий смещены к полюсу. Рассмотрим результаты для следующей глубины, 100-289 см. Они представлены на рисунках 2.17-2.19.

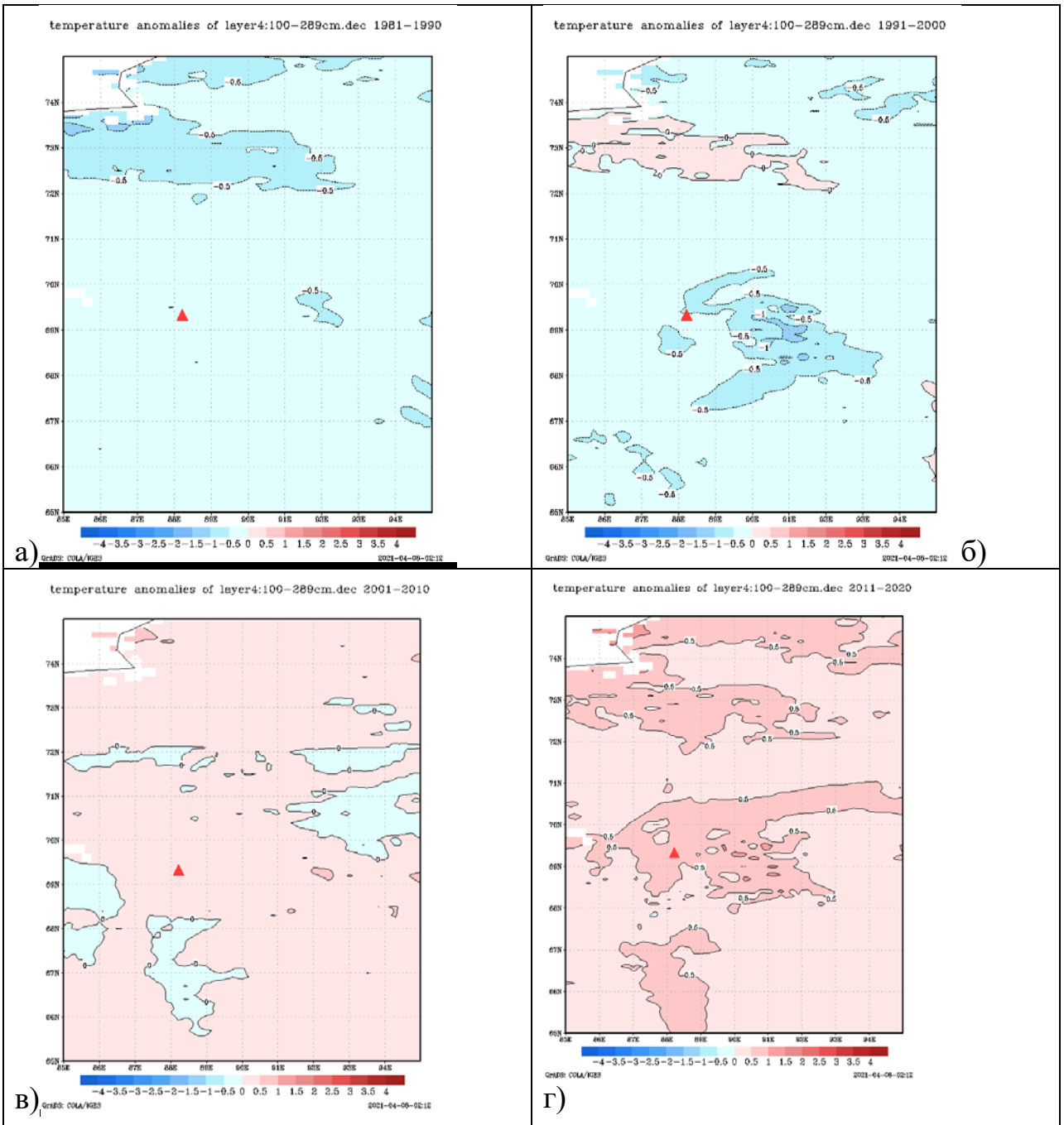


Рисунок 2.17 — Аномалии температуры почвы на глубине 100-289 см в декабре за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

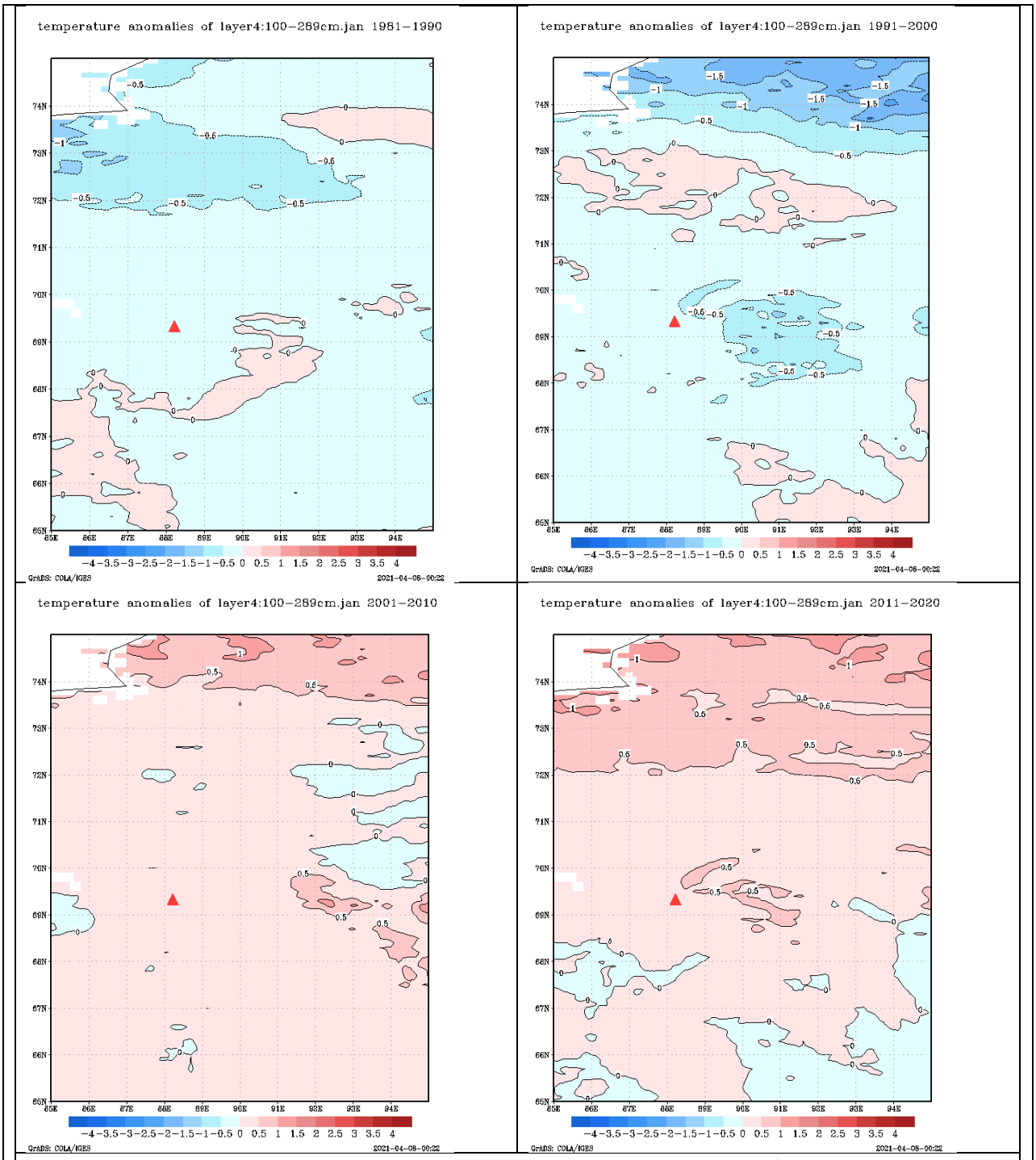


Рисунок 2.18 — Аномалии температуры почвы на глубине 100-289 см в январе за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

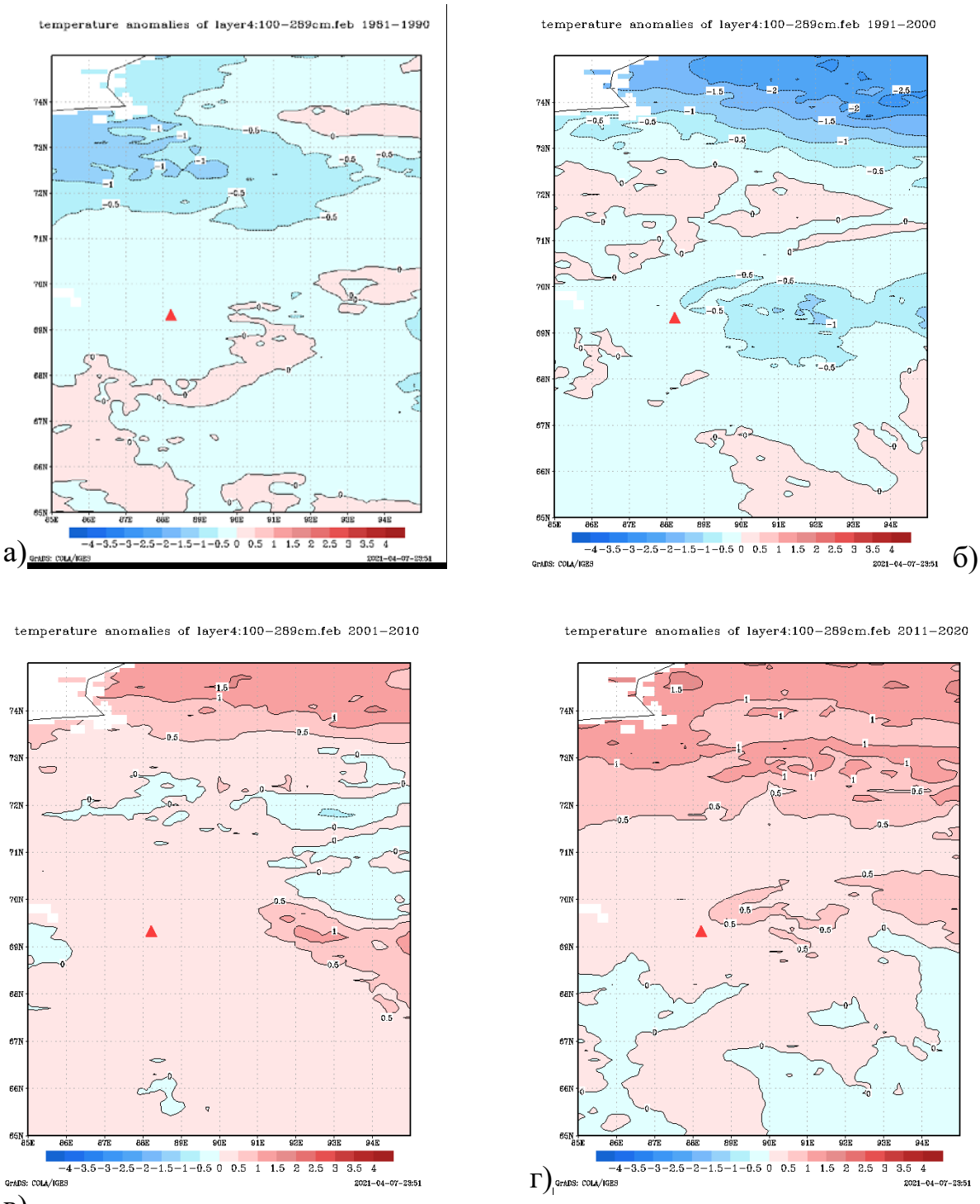


Рисунок 2.20 — Аномалии температуры почвы на глубине 100-289 см в феврале за период с 1981 по 1990 гг. (а), с 1991 по 2000 гг. (б), с 2001 по 2010 гг. (в), с 2011 по 2020 гг. (г)

Таким образом, в холодный период в районе Норильска нет значительных изменений в температуре почвы на всех глубинах. В этот период наиболее значительные аномалии смещены в сторону полюса. Летом же, которое в

этих широтах в июле и августе, увеличение температуры от десятилетия к десятилетию прослеживается наиболее четко. Рост температуры также преимущественно наблюдается со стороны полюса и восточнее Норильска. Исключение составляет лишь самый глубокий слой 100-289 см. Здесь наиболее интенсивный рост аномалий на юго-западе региона. Это можно объяснить тем, что на такой глубине температура более консервативна. Однако хорошо заметно, что аномалии температуры двух последних десятилетий здесь также увеличились. В целом можно отметить, что наиболее интенсивно увеличиваются аномалии в слоях на глубине 7-28 см и 28-100 см.

2.4. Корреляция температуры воздуха и почвы.

Температуры воздуха и почвы тесно взаимосвязаны между собой, так как от прогревания почвы зависит температура на высоте двух метров. Из анализа, приведенного выше, ясно, что наиболее значительные изменения температуры почвы происходят летом, зимой же аномалии малы. Кроме того, если говорить об изменении температуры воздуха, то там наиболее значительны изменения на юго-западе региона. В ходе работы была рассчитана корреляция температуры верхнего слоя почвы и температуры воздуха. Так, в январе, рисунок 2.21, коэффициент корреляции колеблется от 0.4 до 0.8. Оценивая F-статистикой Фишера на пятипроцентном уровне значимости коэффициенты по модулю большие 0,3 значимые.

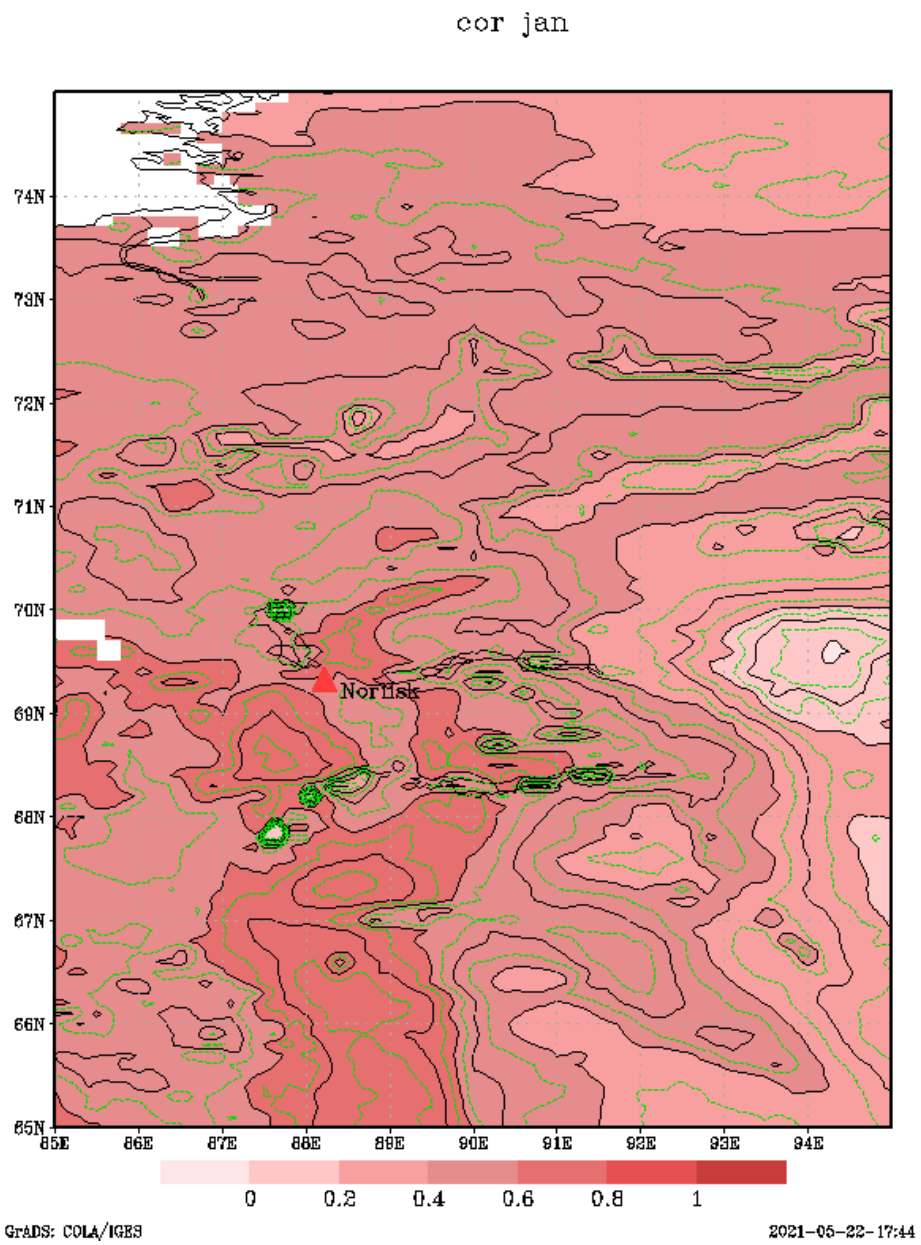


Рисунок 2.21 — Корреляция температур воздуха и почвы в январе за период с 1981 по 2020 года

Зимой почва покрыта снегом, а значит более неоднородна в своей отражательной способности, имеет разное альбедо. Потому коэффициенты корреляции для холодного периода столь неоднородны. Летом же коэффициенты корреляции между температурой воздуха и температурой верхнего слоя почвы выше. Это можно объяснить более однородной поверхностью, отсутствием снежного покрова, и более прогретой почвой и как следствие меньшими различиями в альбедо подстилающей поверхности.

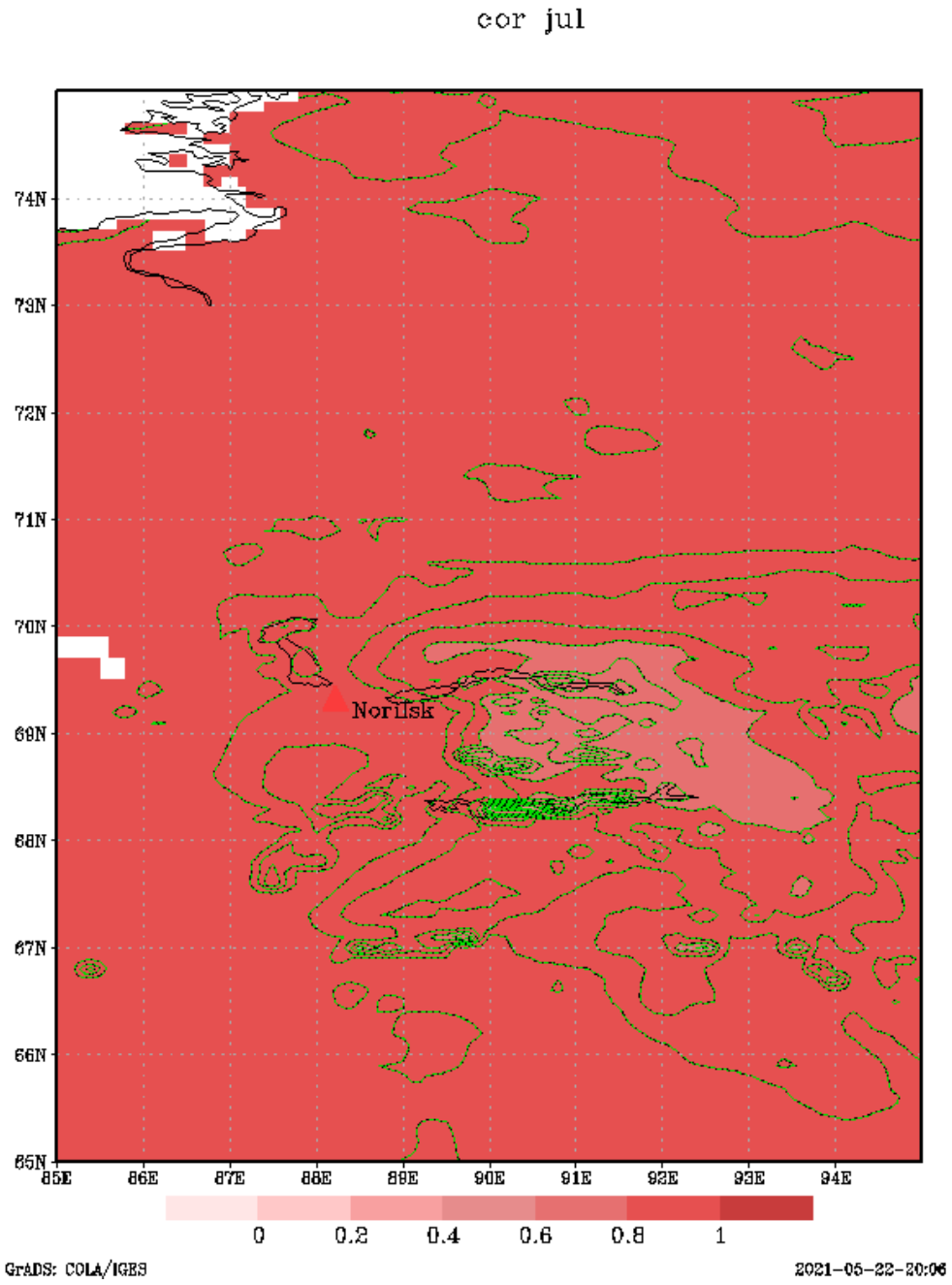


Рисунок 2.21 — Корреляция температур воздуха и почвы в июле за период с 1981 по 2020 года

Температурные изменения в почве корреляционно связаны с изменением температуры воздуха. Причем летом коэффициент корреляции выше. Это можно объяснить более однородной поверхностью и как следствие меньшими различиями в альбедо подстилающей поверхности.

Заключение.

По полученным результатам следует вывод, что в летнее время, июль и август, действительно наблюдается рост положительных аномалий. Причем особенно он виден на глубинах 7-100 см. Аномалии здесь достигают 3-4 градусов. Наиболее тесная связь между изменениями температуры воздуха и почвы отмечается также в летние месяцы, когда поверхность более однородна. В холодное время года значимая корреляционная связь также присутствует, однако не такая сильная. Наиболее сильные изменения температуры наблюдаются восточнее Норильска и в областях близких к полюсу.

В холодное время года изменения менее значительны, однако присутствует также положительная аномалия на севере региона.

Такой результат можно объяснить полярным или Арктическим усилением в контексте глобального потепления. Безусловно, причину таких изменений еще нужно исследовать.

В контексте данной работы можно сказать, что изменение климата в последнее десятилетие действительно происходит, а потому безусловно нужно применять такие технологии строительства нефтегазовых сооружений, которые будут иметь устойчивую конструкцию при «проседании» грунта.

Список использованных источников:

1. «Вечная мерзлота и строительство на ней» Быков Н.И., Каптеров П.Н. 1940.
2. «Мерзлая зона литосферы Западной Сибири и тенденции ее развития» Шполянская Н.А. 1978.
3. «Норильский регион: от природной специфики к практике освоения» Севастьянов Д.В., Исаченко Т.Е., Гук Е.Н. 2014.
4. «Теплофизика почв» Чудновский А. Ф., М., 1976
5. «Физика почвы» Нерпин С. В.. Чудновский А. Ф.., М.. 1967;
6. «Физика атмосферы», Хргиан А.Х, Гидрометеоиздат, Ленинград, 1969.
7. Опасное «умирание» вечной мерзлоты [Электронный ресурс] - https://gazetazp.ru/news/gorod/2296900000-opasnoe-umiranie-vechnoy-merzlotyi.html/
8. Поисковый комплекс о характеристиках Земли [Электронный ресурс].- 2021. - Режим доступа: https://cds.climate.copernicus.eu
9. Погода и климат [Электронный ресурс] - http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078.htm
10. Руководящие указания ВМО по расчёту климатических норм. — 2017.