

Об изменениях климата западной части российской Арктики в 1980-2021 годы

Серых Илья Викторович^{1,2}, Толстиков Алексей Владимирович³

¹ *Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва*

² *Геофизический центр РАН, Москва*

³ *Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск*

Данные и методика

По среднемесячным данным реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 в регионе западной части российской Арктики (60°–75° с.ш., 30°–85° в.д.) за 1980-2021 годы исследованы климатические изменения

- температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности,
- количества атмосферных осадков,
- скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности,
- температуры верхних 10 метров почвы,
- толщины и площади снежного покрова,
- влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр,
- влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011613323

Программный комплекс для пространственно-временного анализа глобальных вековых полей гидрометеорологических характеристик

Правообладатель(ли): *Учреждение Российской академии наук
Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН (RU)*

Автор(ы): *Серых Илья Викторович (RU)*

Заявка № 2011611397

Дата поступления 3 марта 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
28 апреля 2011 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

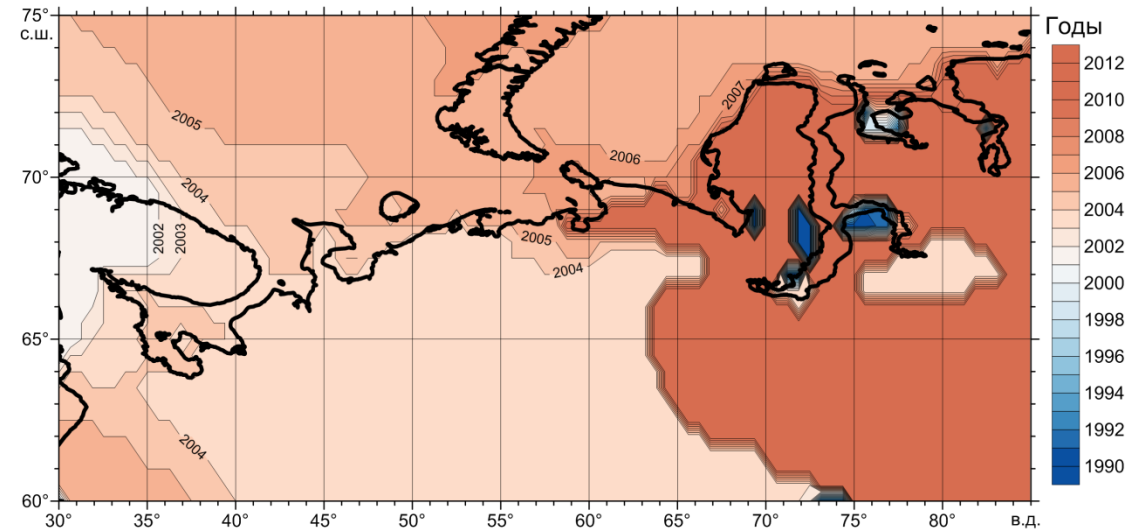
Б.П. Симонов



Данные и методика

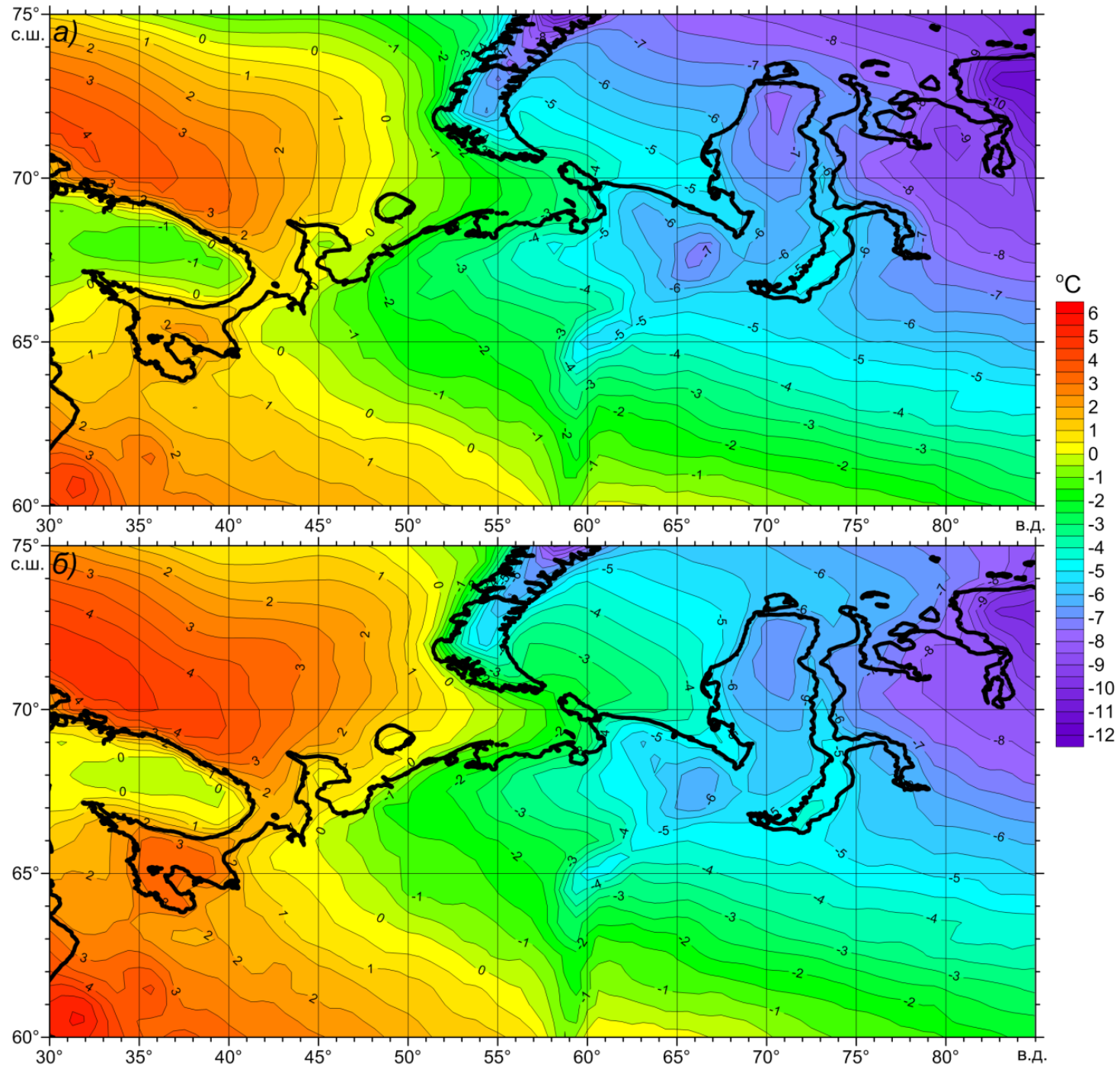
По исследуемым данным для региона западной части российской Арктики (60° – 75° с.ш., 30° – 85° в.д.) рассчитаны и построены следующие поля:

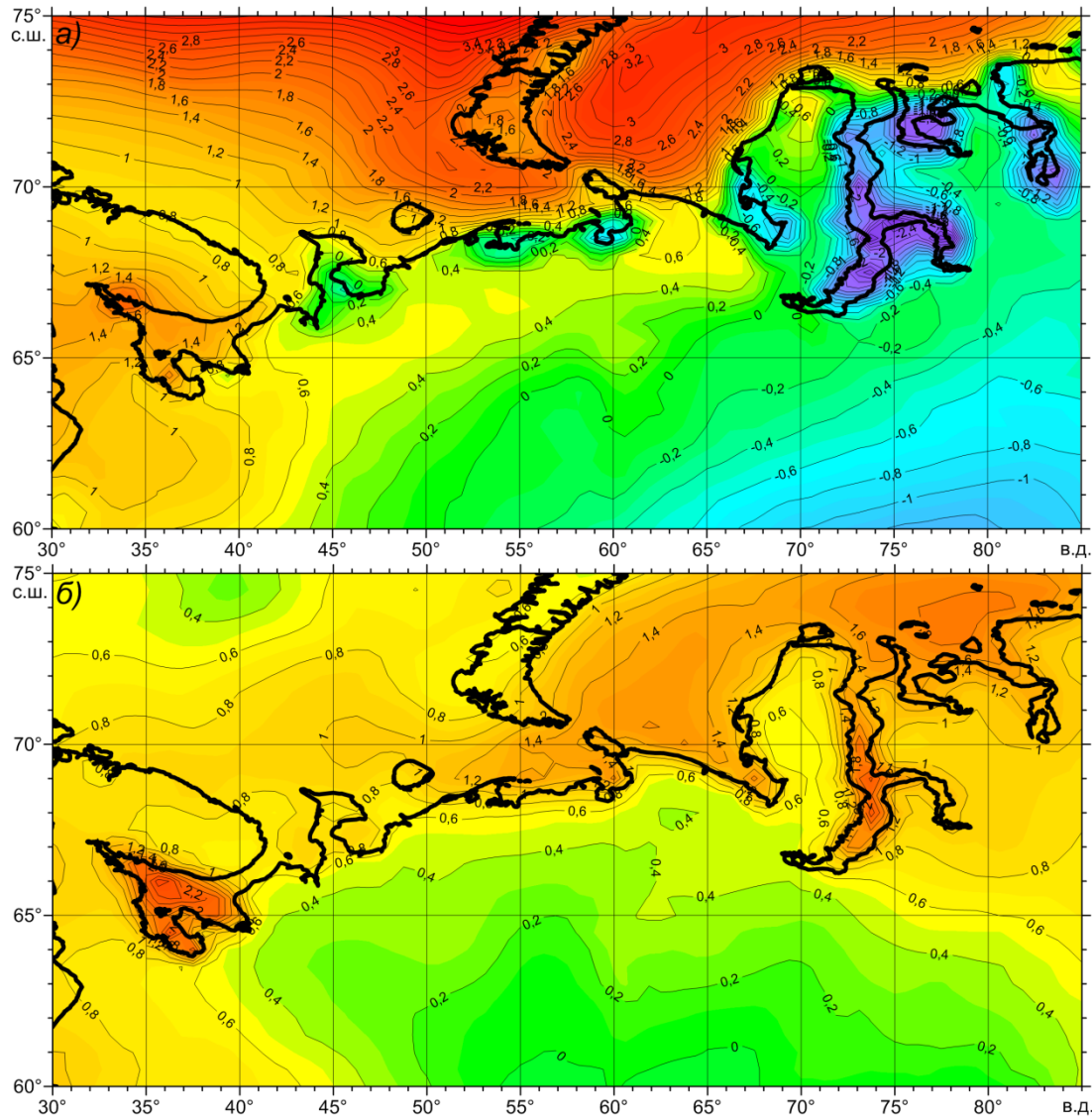
- Средние значения за периоды 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг.
- Средние изменения между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами).
- Средние значения для зимних (декабрь-февраль) и летних (июнь-август) сезонов и 12 месяцев года за периоды 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг.
- Средние изменения для зимних (декабрь-февраль) и летних (июнь-август) сезонов и 12 месяцев года между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами).
- Скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий относительно годового хода за периоды 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг., оцененная с помощью приближения полиномами 1-ой степени методом наименьших квадратов (1-ая производная).
- Ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий относительно годового хода за периоды 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг., оцененное с помощью приближения полиномами 2-ой степени методом наименьших квадратов (2-ая производная).



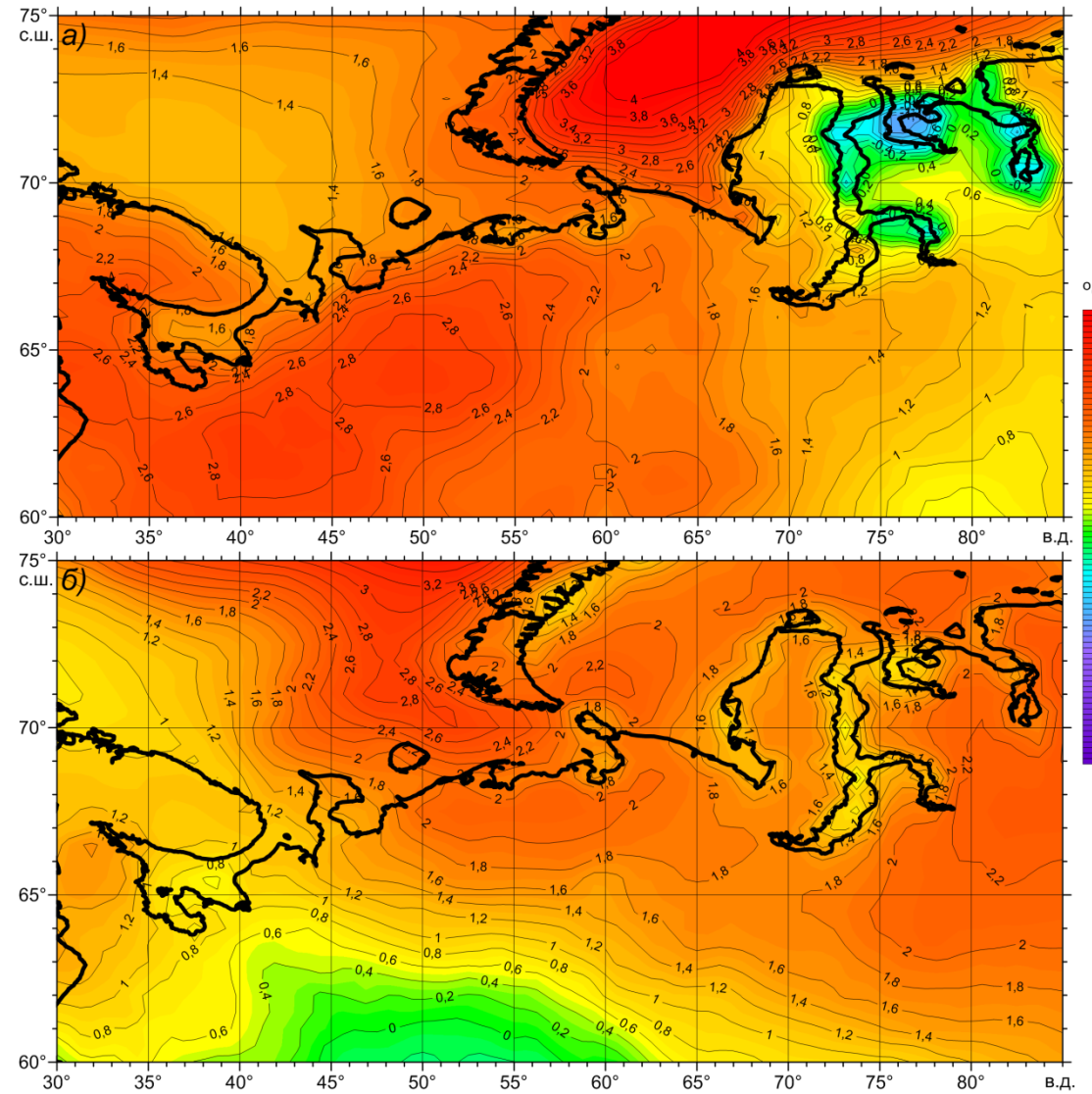
Поле лет ступенчатых переходов температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности за период 1980-2021 гг., полученное на основе применения модели ступенчатых переходов от одного квазистационарного режима к другому. При данном подходе год ступенчатого перехода от одного квазистационарного периода к другому находится итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда.

Средние значения температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б).

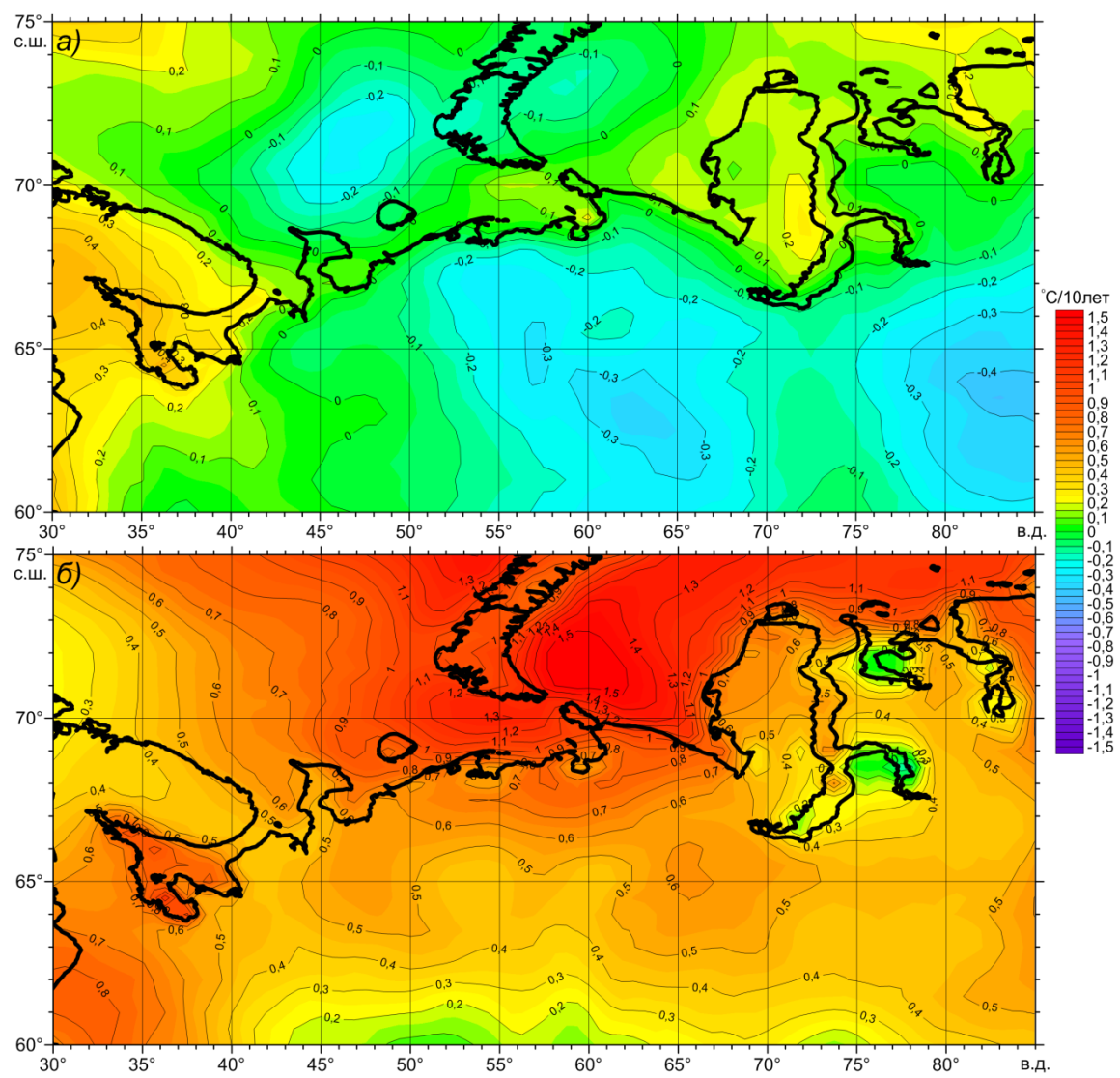




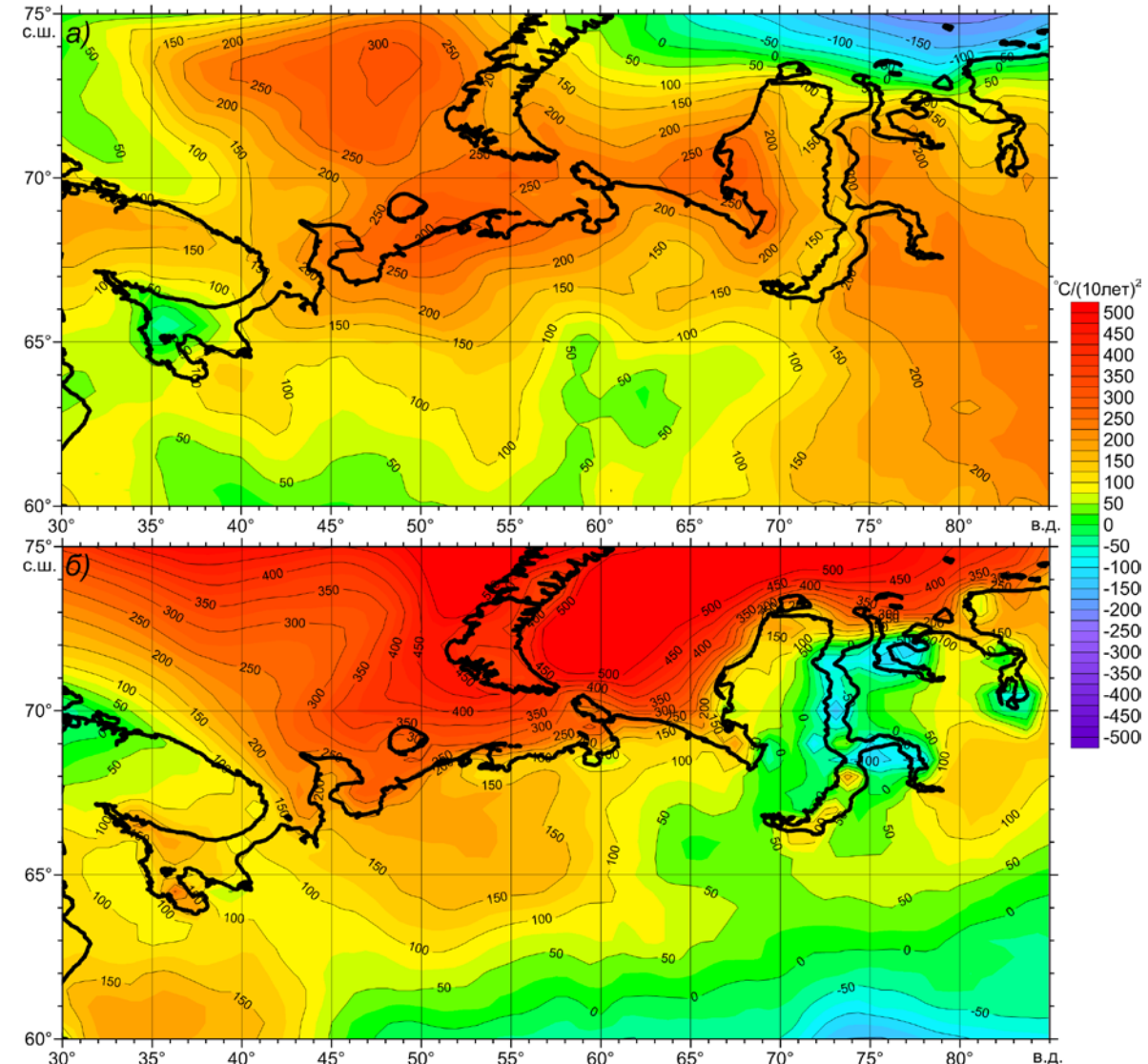
Средние изменения температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для зимнего сезона (декабрь-февраль) (а) и для летнего сезона (июнь-август) (б).



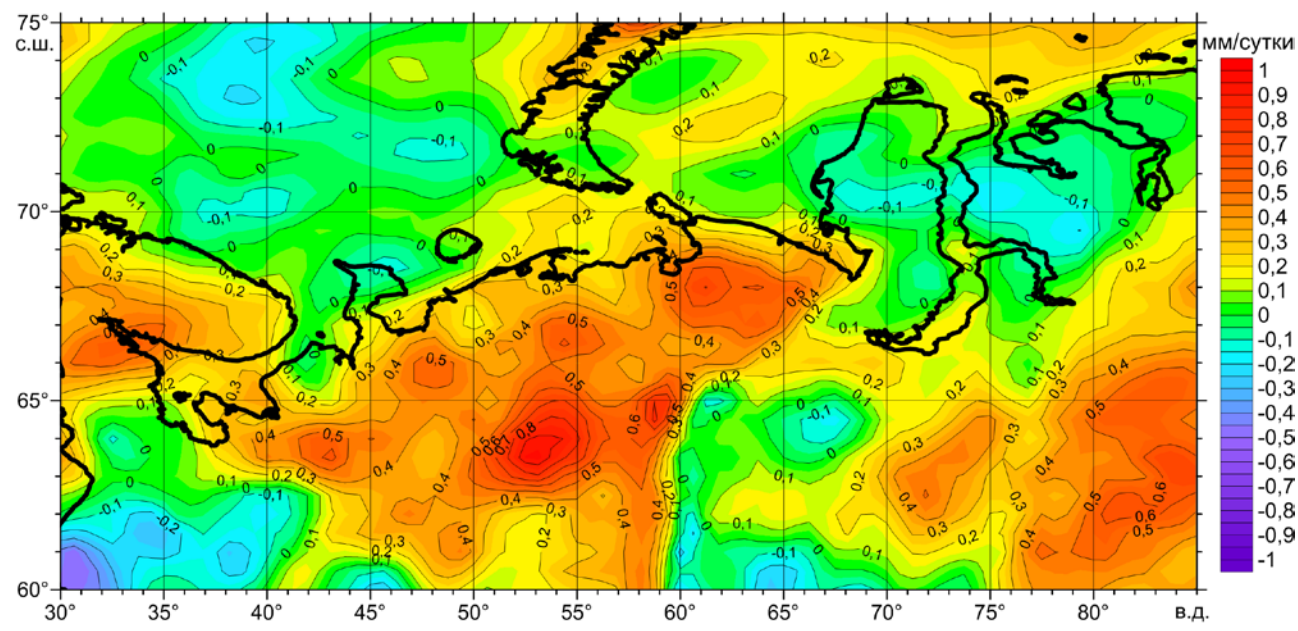
Средние изменения температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для месяцев ноябрь (а) и апрель (б).



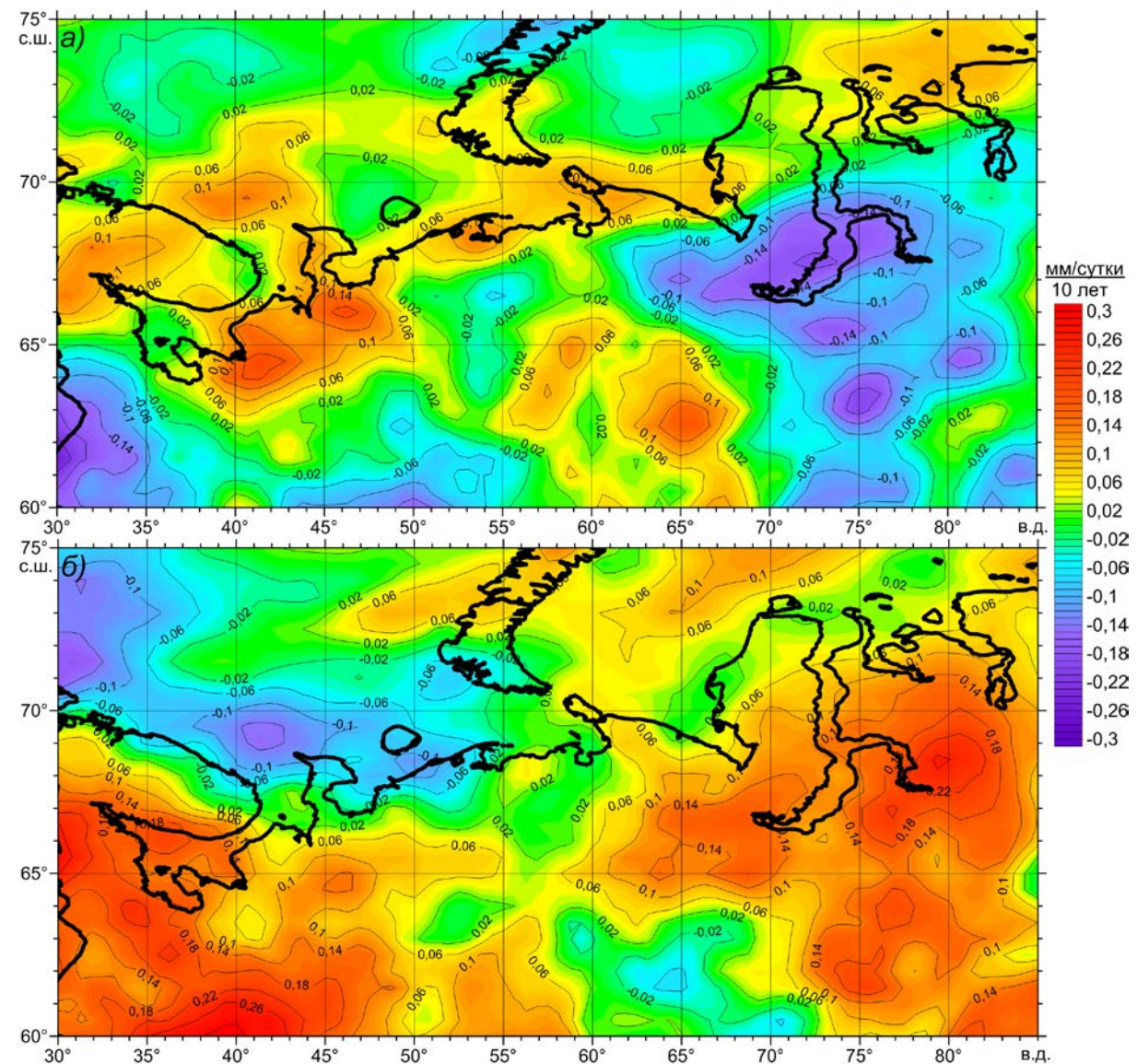
Средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-ой степени (1-ая производная), за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б).



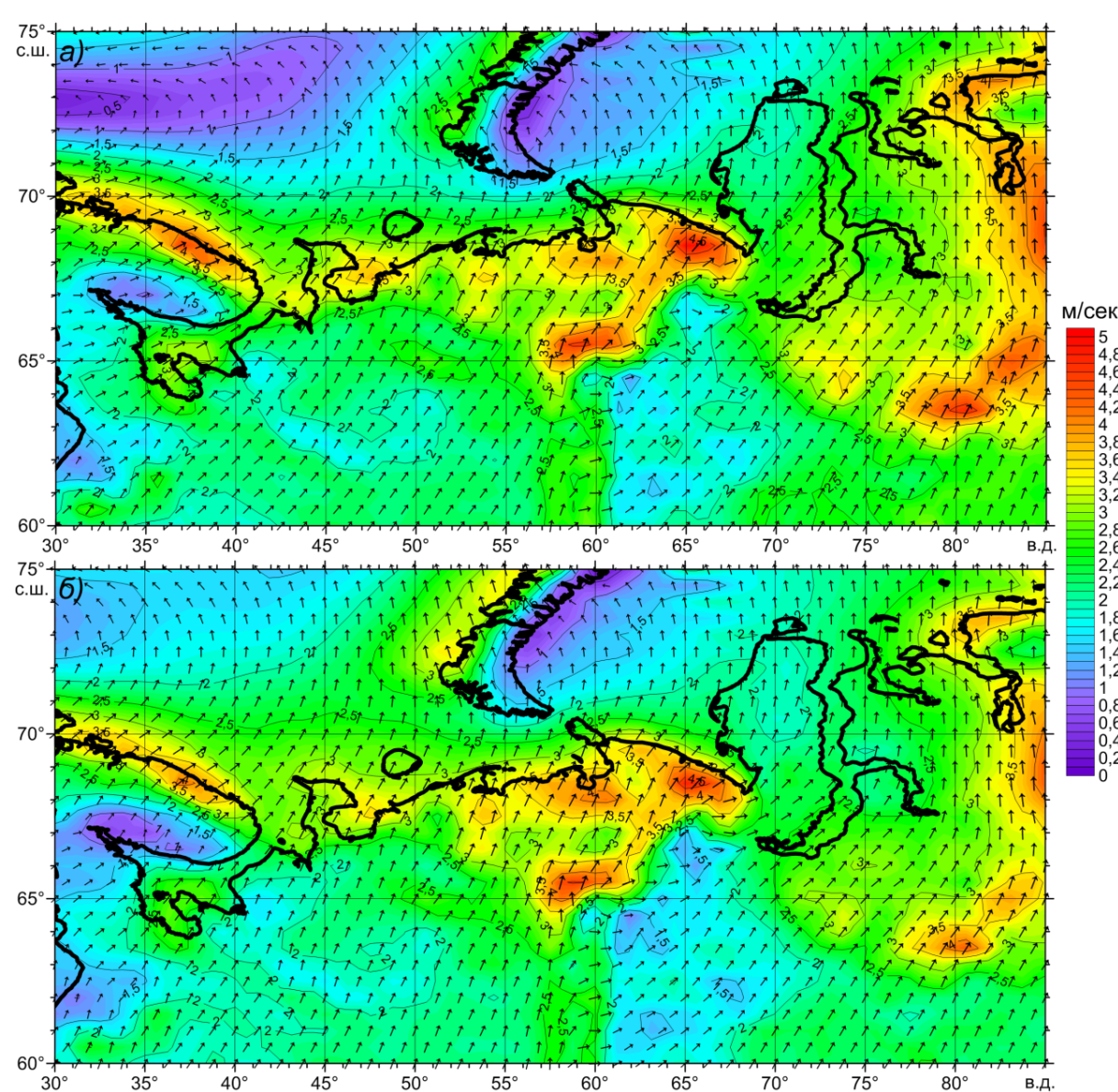
Среднее ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности ($^{\circ}\text{C}$ за $(10\text{ лет})^2$), оцененное с помощью приближения полиномами 2-ой степени (2-ая производная), за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б).



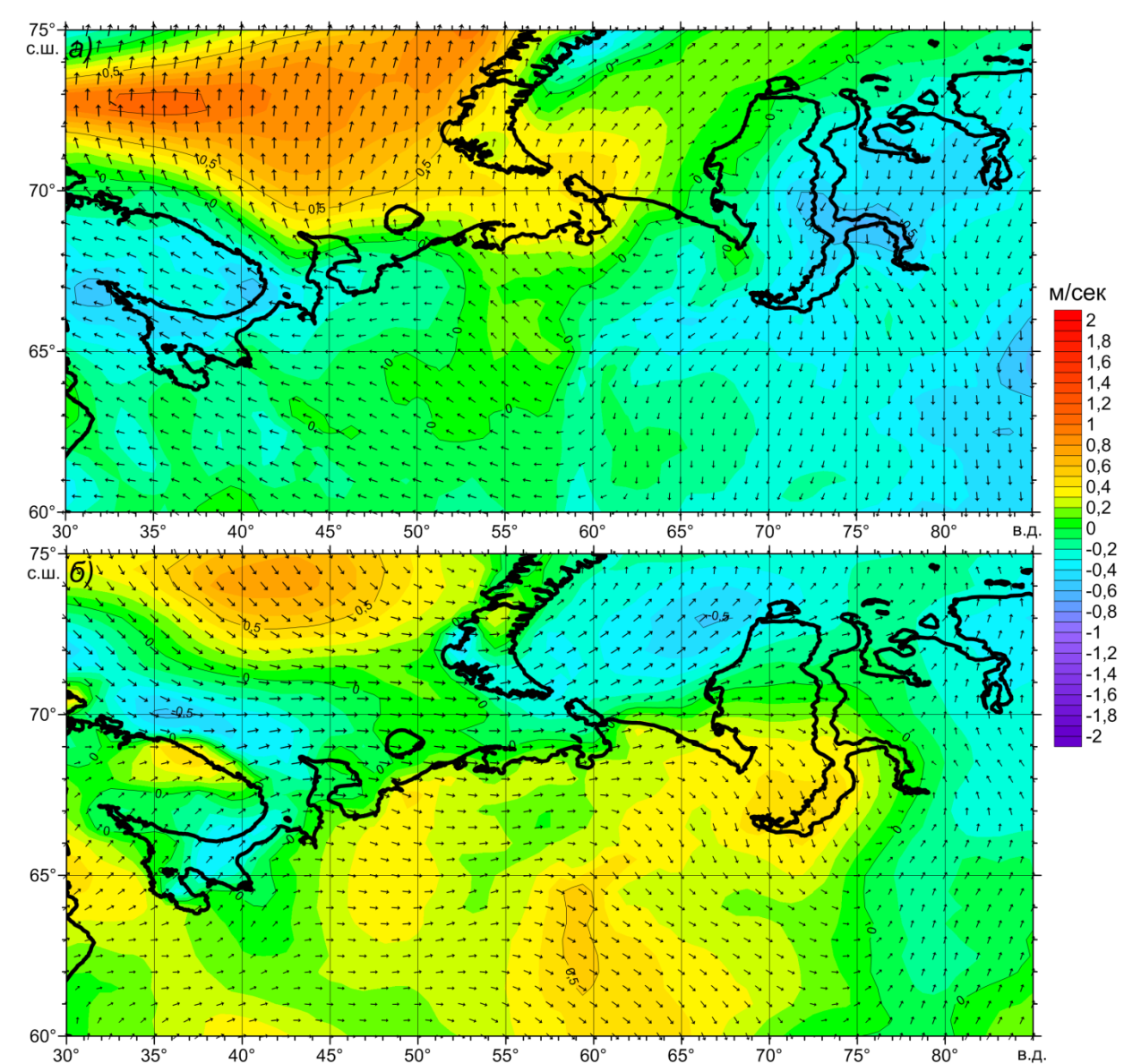
Средние изменения общего количества осадков за сутки между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для сентября месяца.



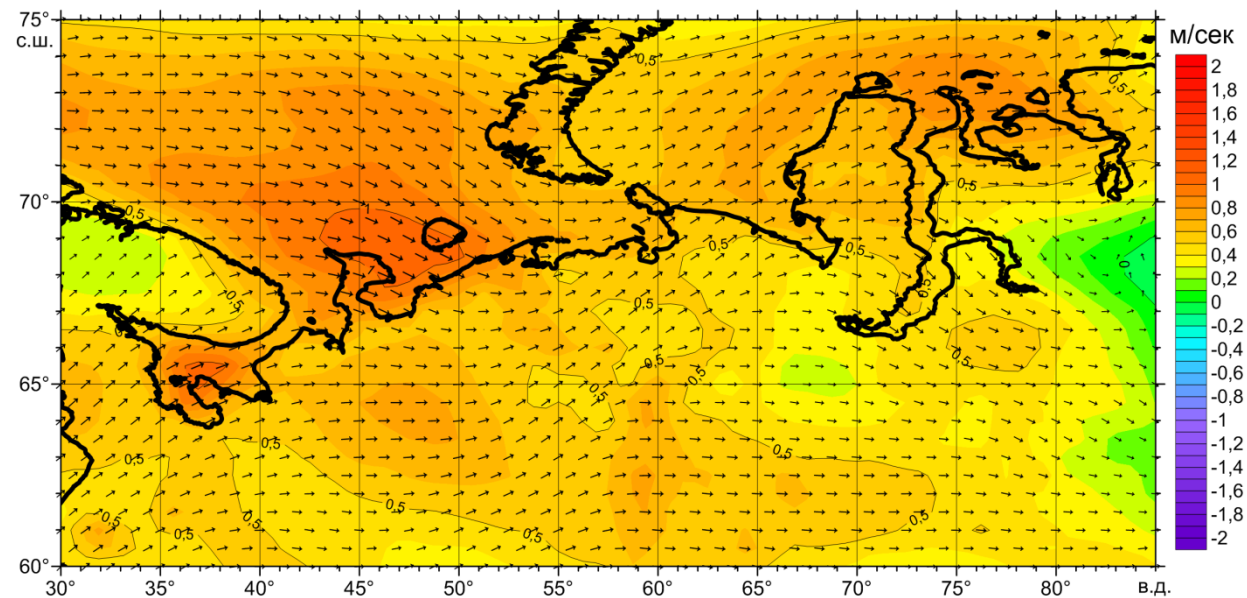
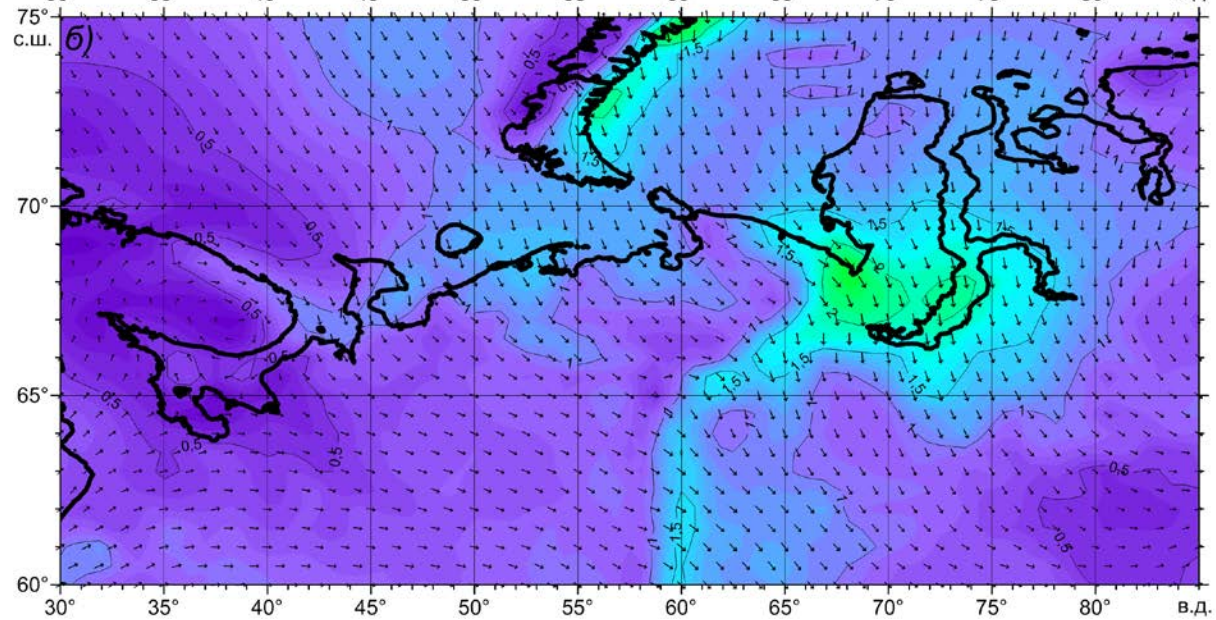
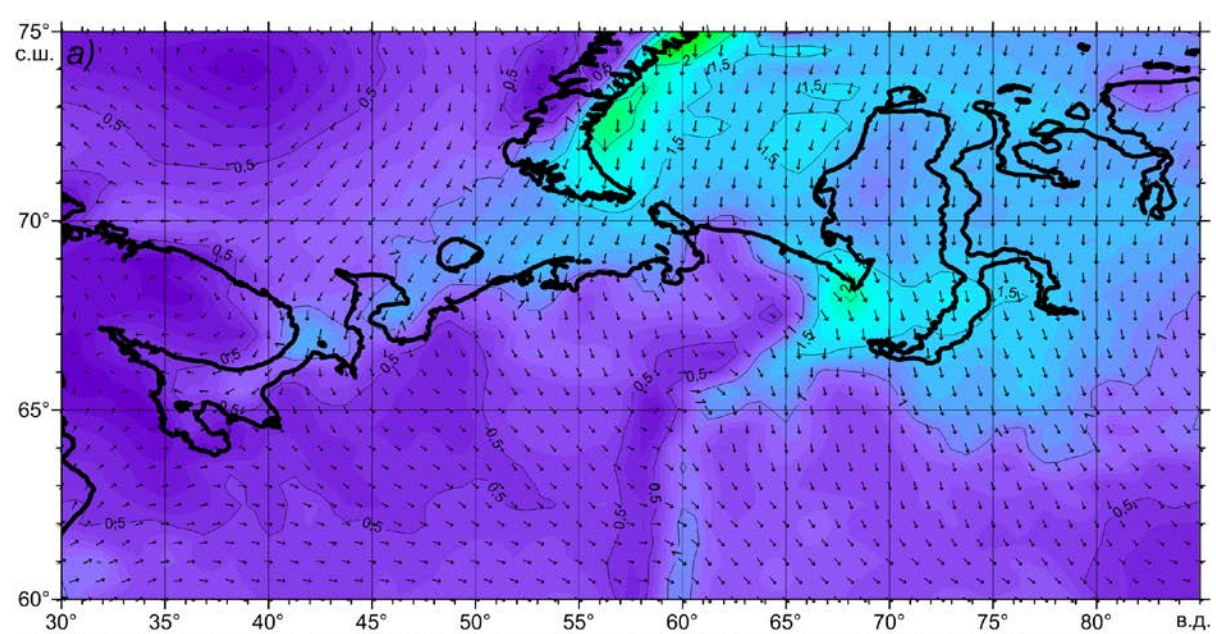
Средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) общего количества осадков за сутки (мм/сутки за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-ой степени (1-ая производная), за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б).



Средние значения модуля и направления скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности для зимнего сезона (декабрь-февраль) за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б).

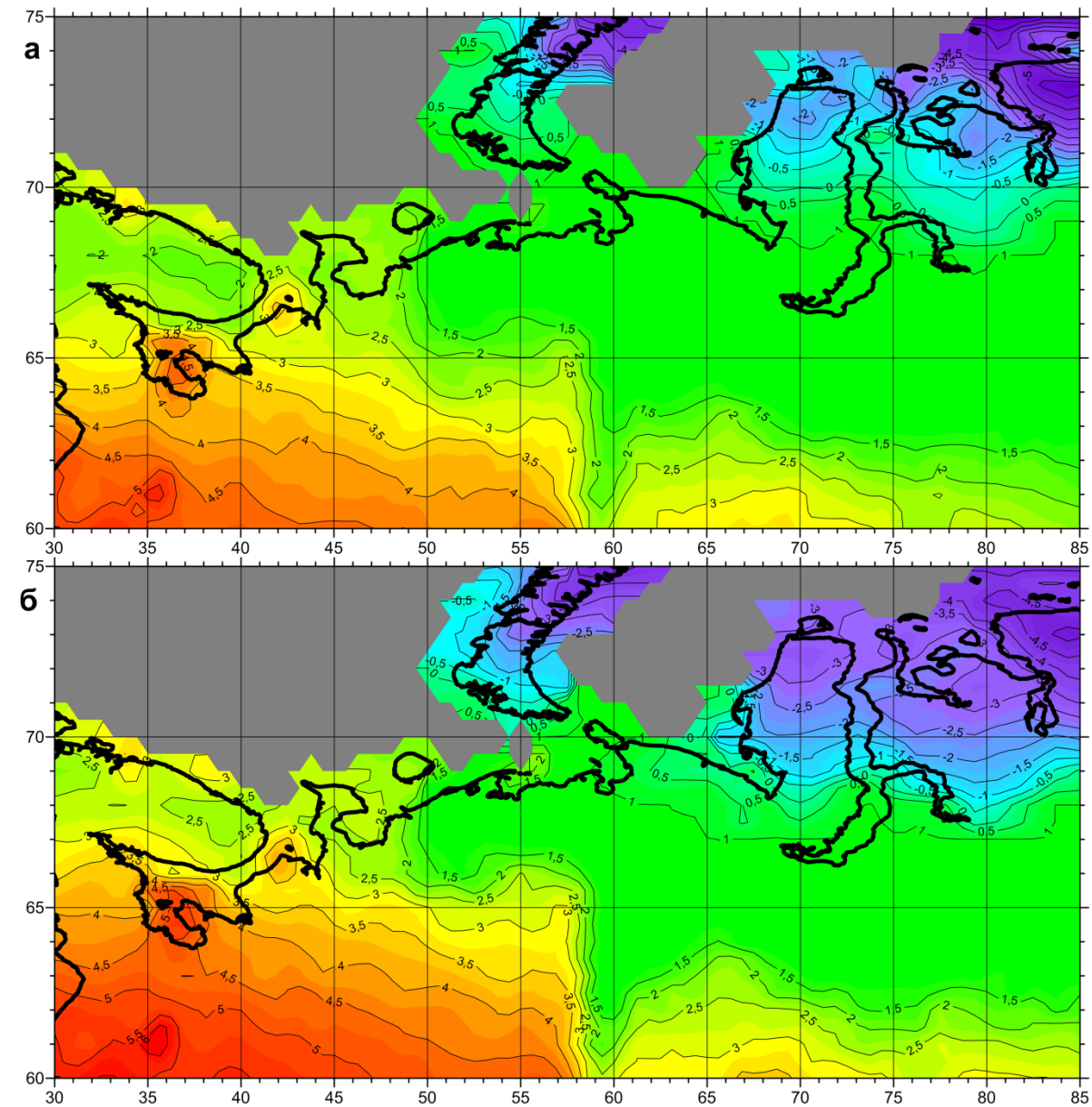


Средние изменения модуля и направления скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для зимнего сезона (декабрь-февраль) (а) и летнего сезона (июнь-август) (б).

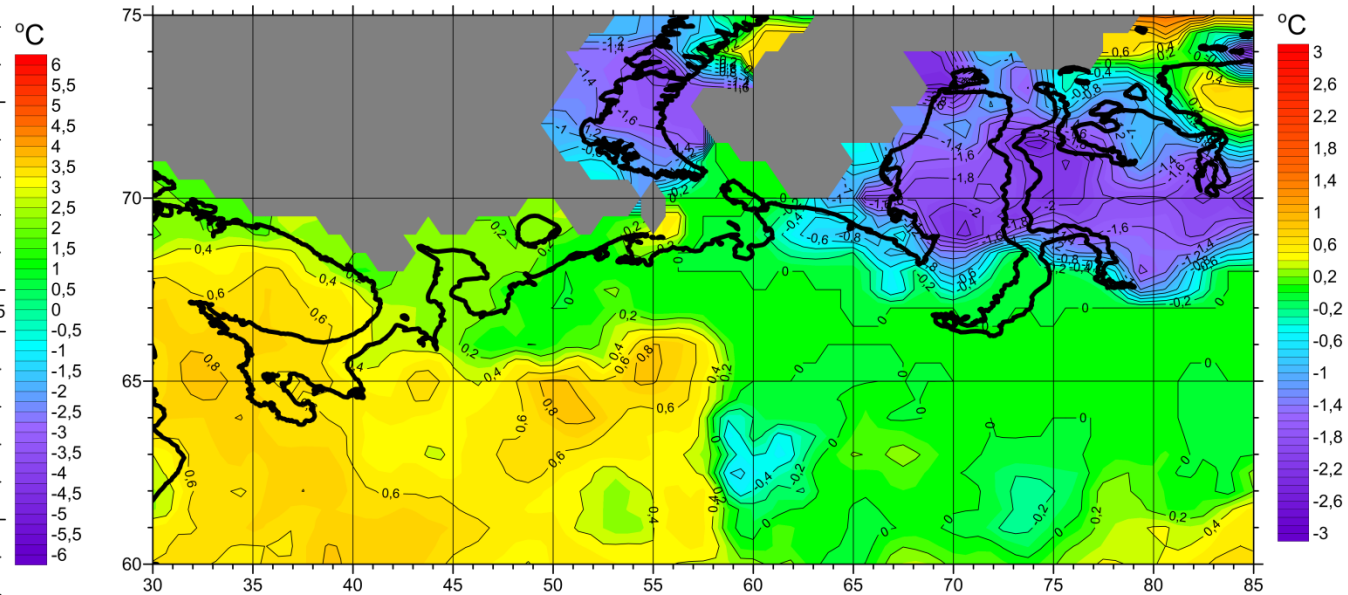


Средние изменения модуля и направления скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для месяца сентябрь.

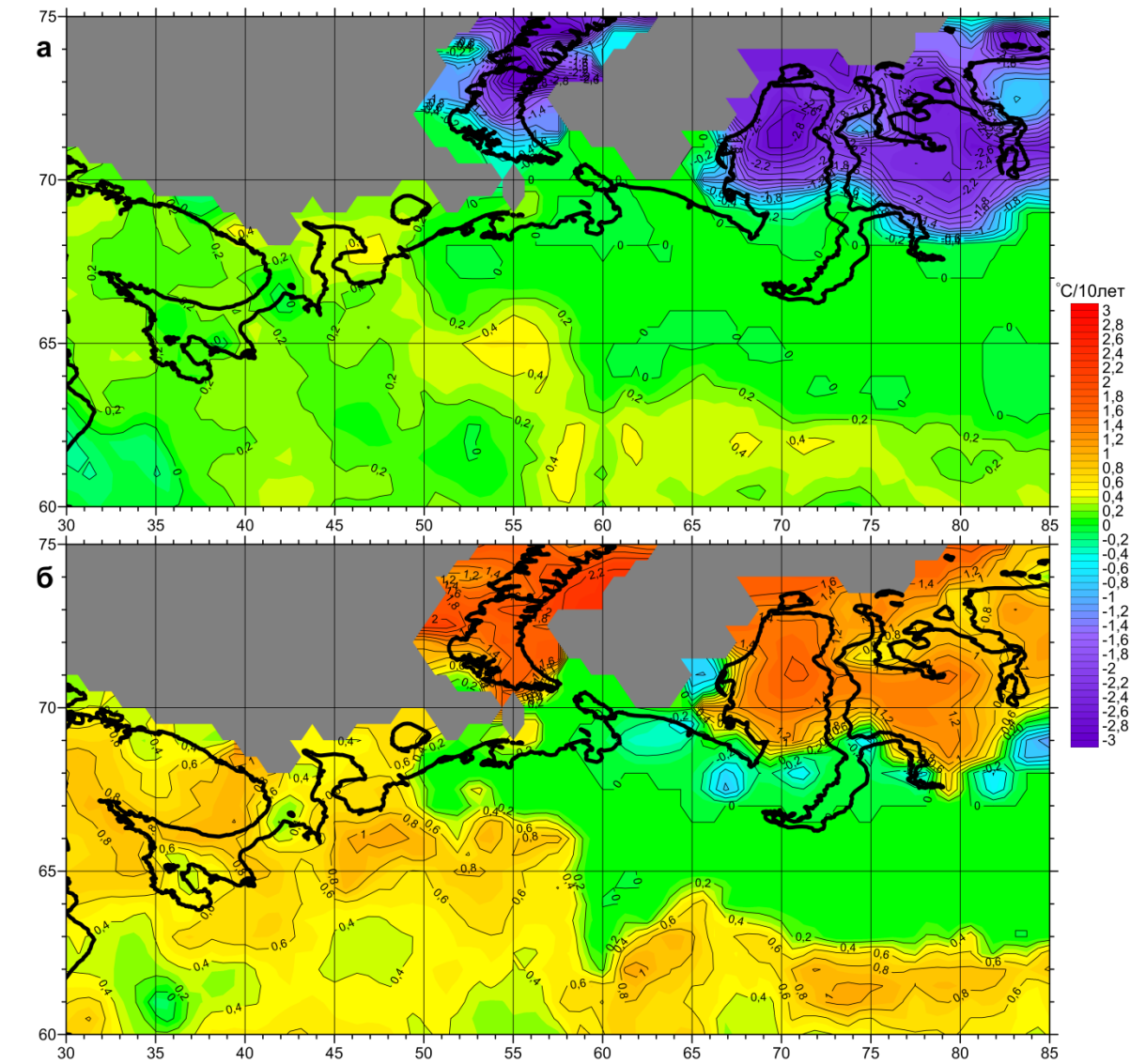
Средние значения модуля и направления скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности для летнего сезона (июнь-август) за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б).



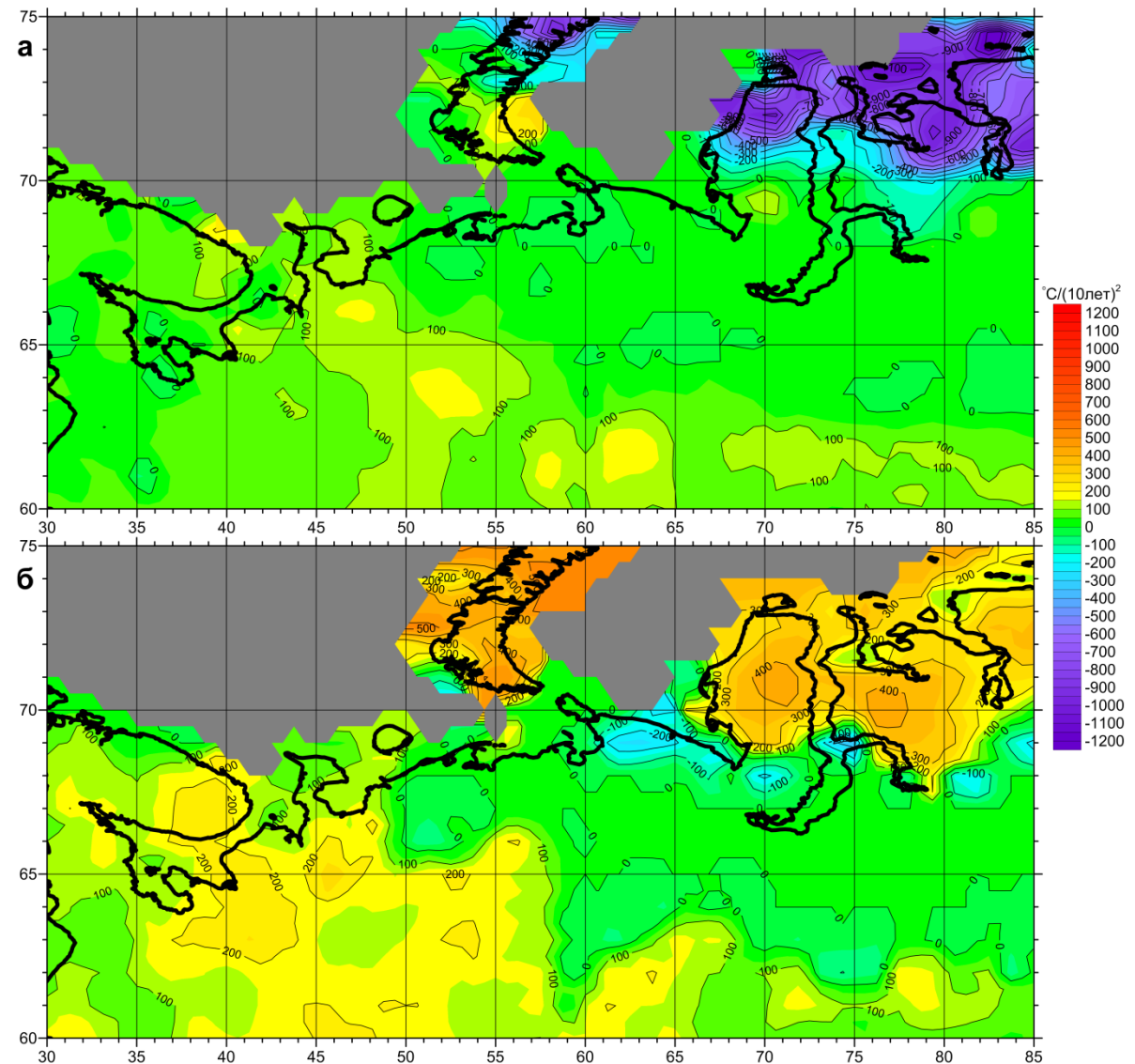
Средние значения температуры верхних 10 м почвы за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б) по данным MERRA-2.



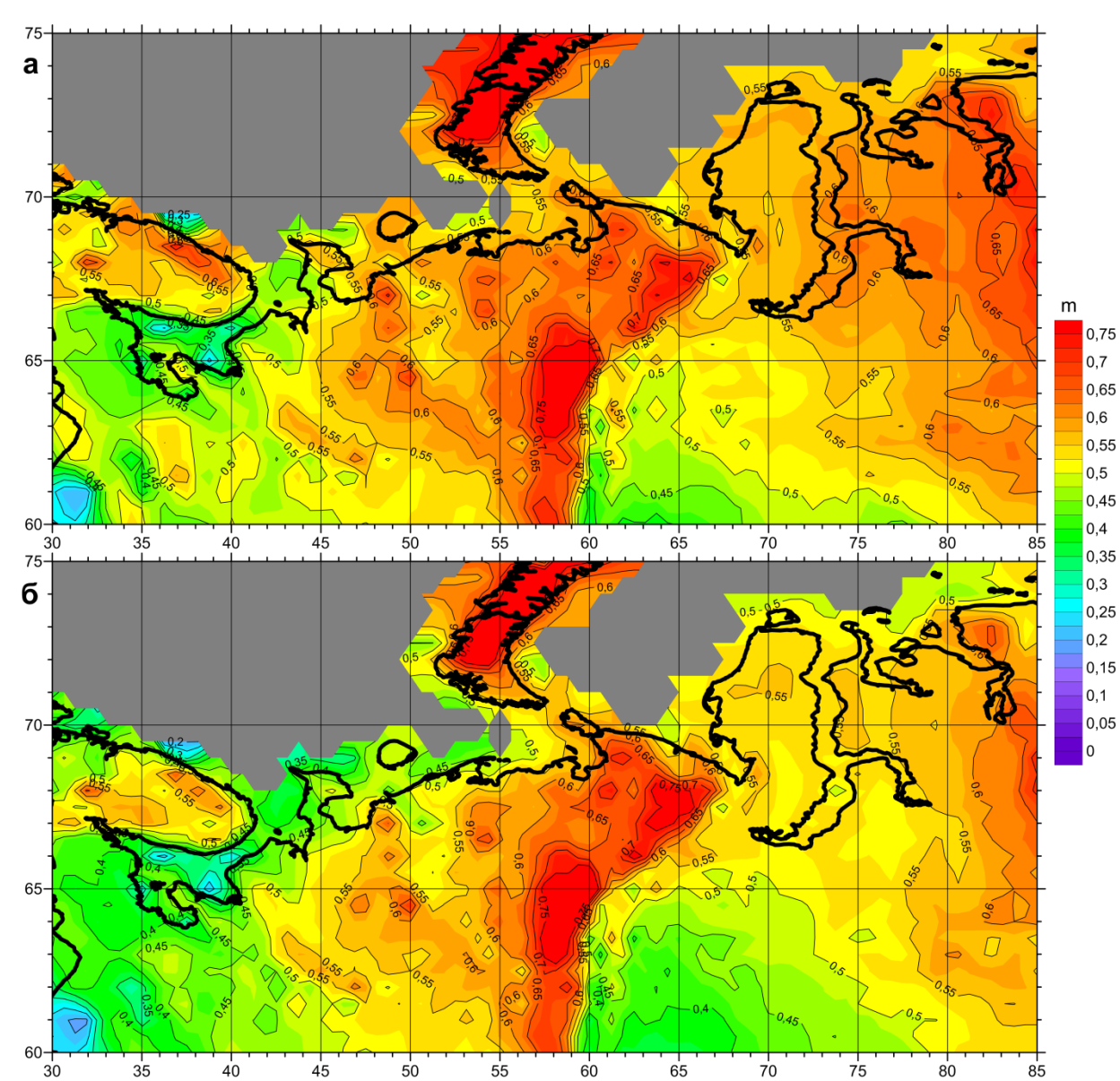
Средние изменения температуры верхних 10 метров почвы между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) по данным MERRA-2.



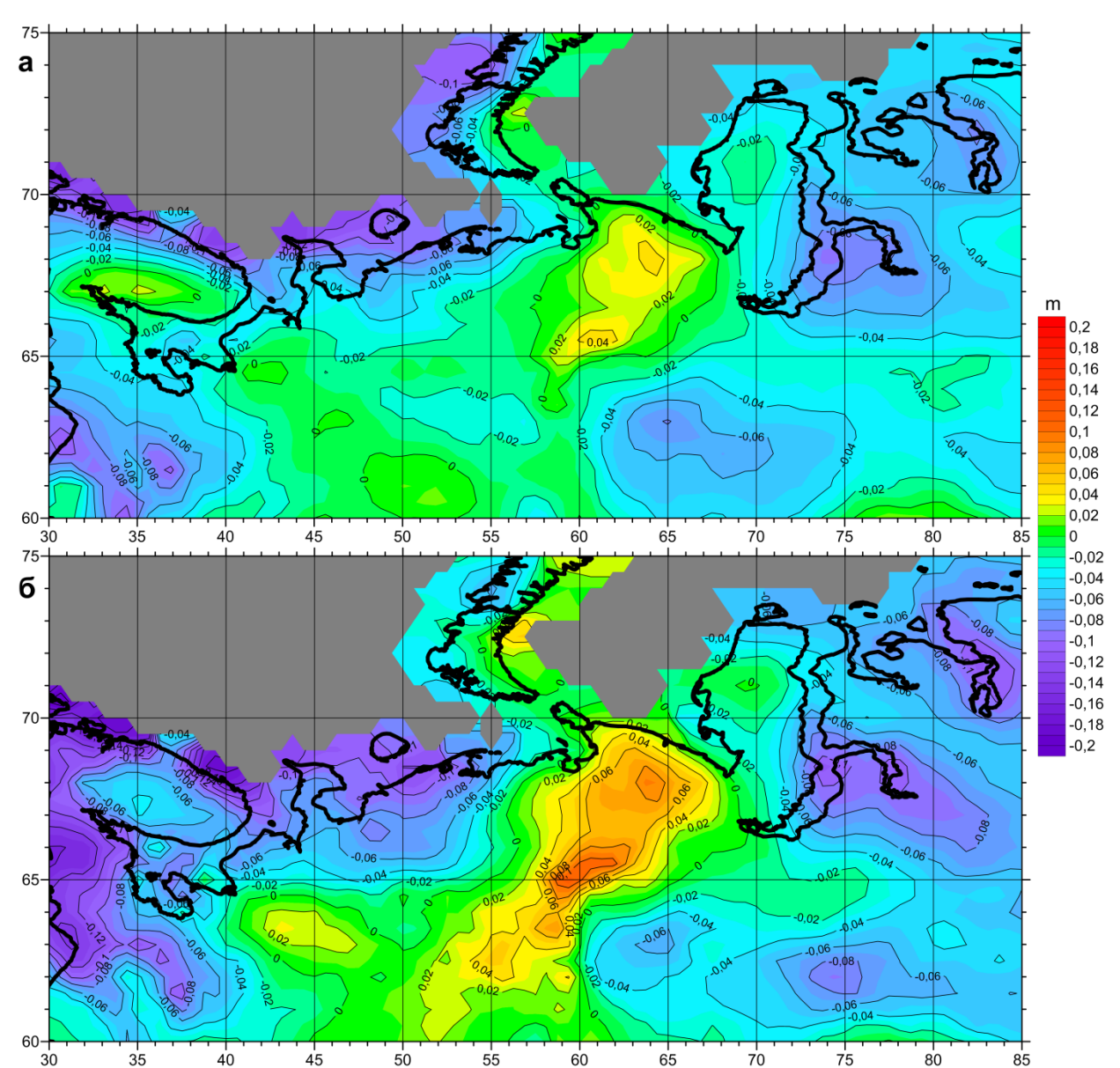
Средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) температуры верхних 10 метров почвы ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-ой степени (1-ая производная), за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б) по данным MERRA-2.



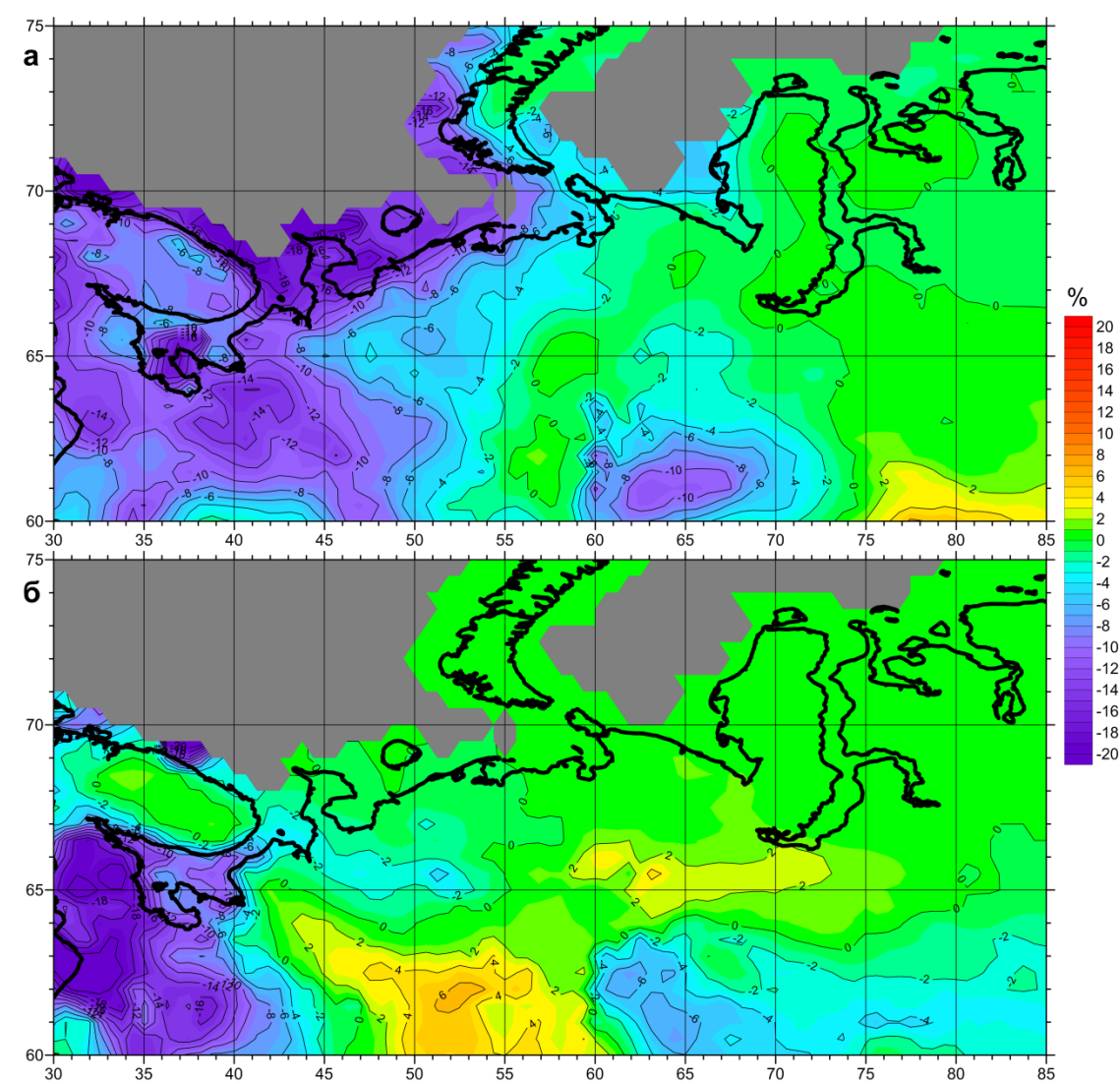
Среднее ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) температуры верхних 10 метров почвы ($^{\circ}\text{C}$ за $(10\text{ лет})^2$), оцененное с помощью приближения полиномами 2-ой степени (2-ая производная), за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б) по данным MERRA-2.



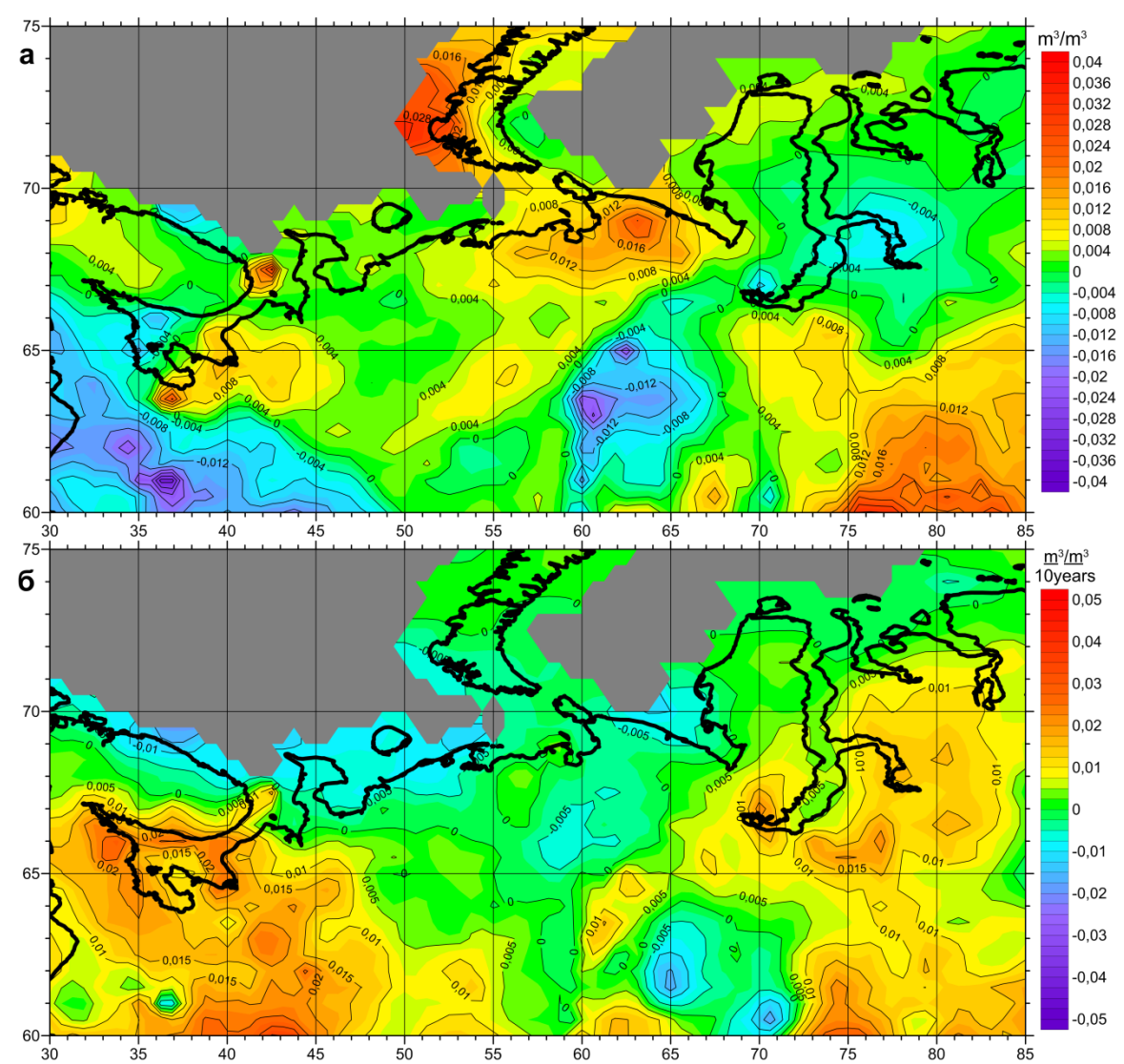
Средние значения толщины снежного покрова за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б) для зимнего сезона (декабрь-февраль) по данным MERRA-2.



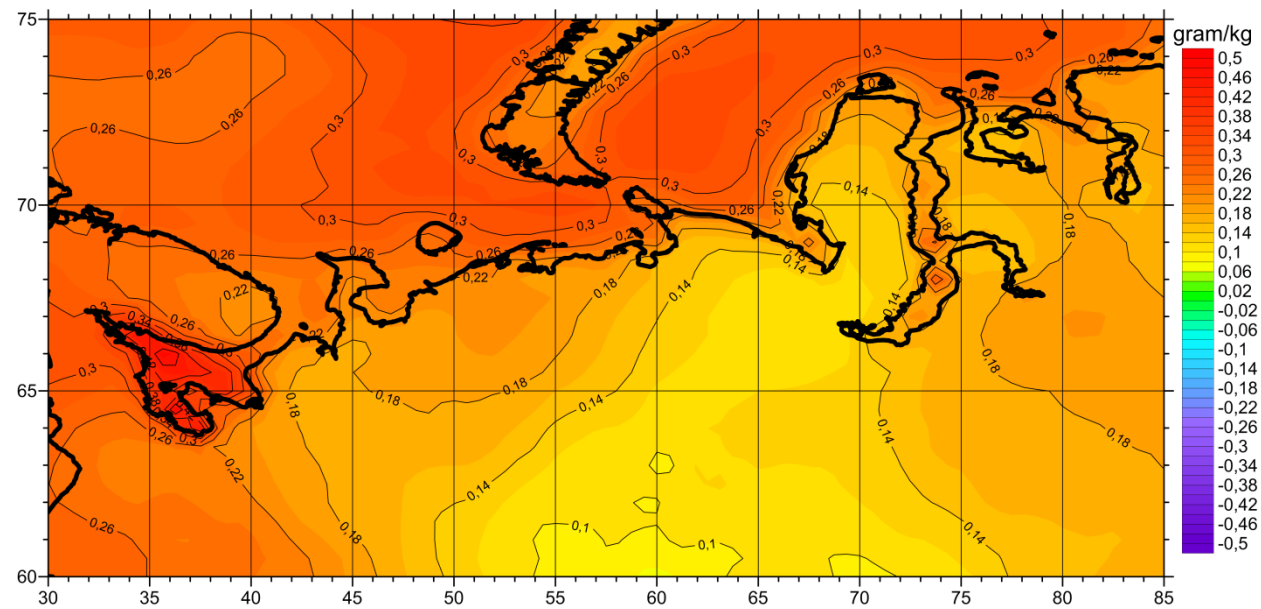
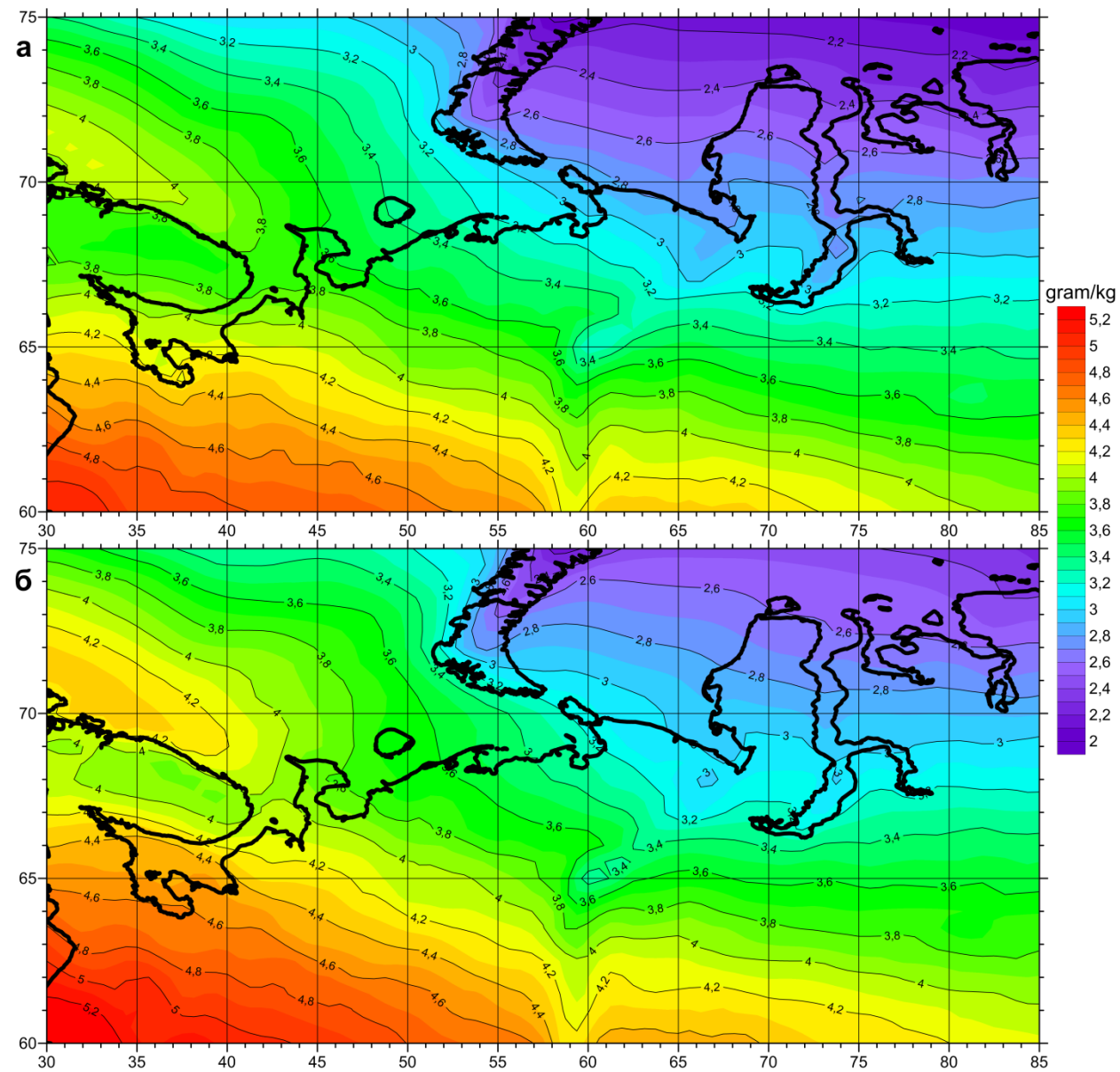
Средние изменения толщины снежного покрова между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для зимнего сезона (декабрь-февраль) (а) и апреля (б) по данным MERRA-2.



Средние изменения фракционной площади снежного покрова между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для ноября (а) и апреля (б) по данным MERRA-2.

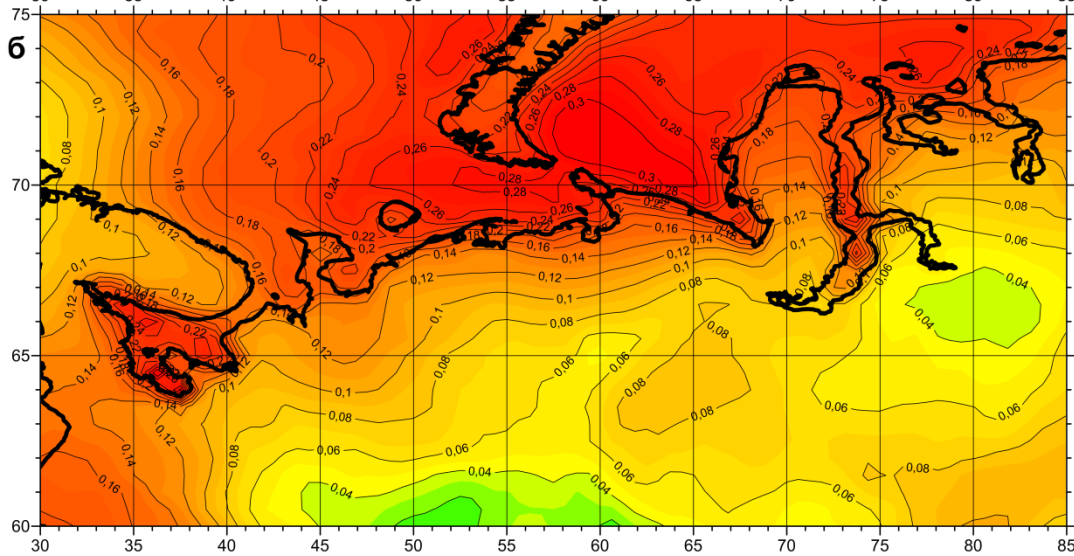
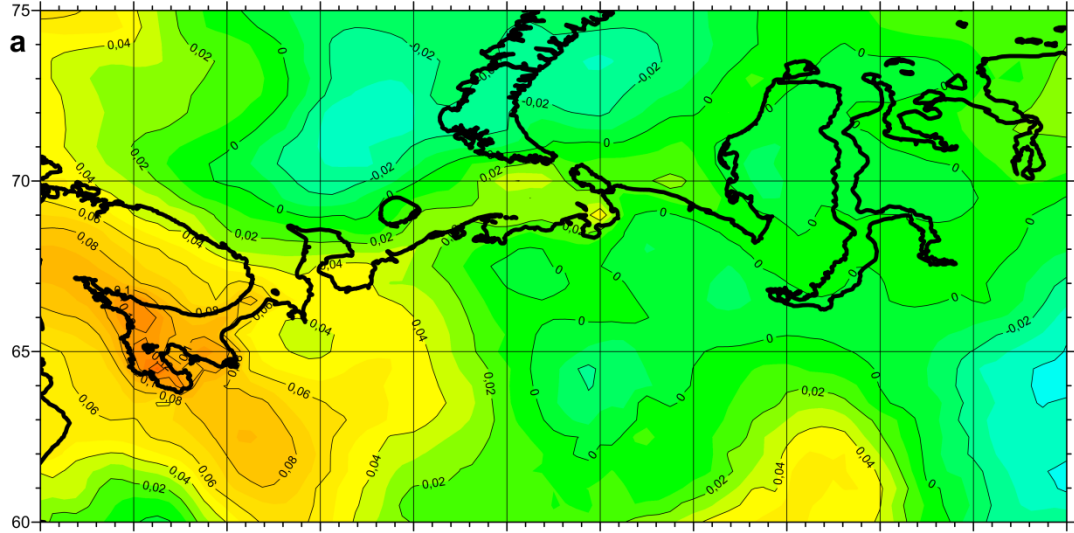


Средние изменения влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) (а), и средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр (m^3/m^3 за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-ой степени (1-ая производная), за период 2000-2021 гг. (б) по данным MERRA-2.



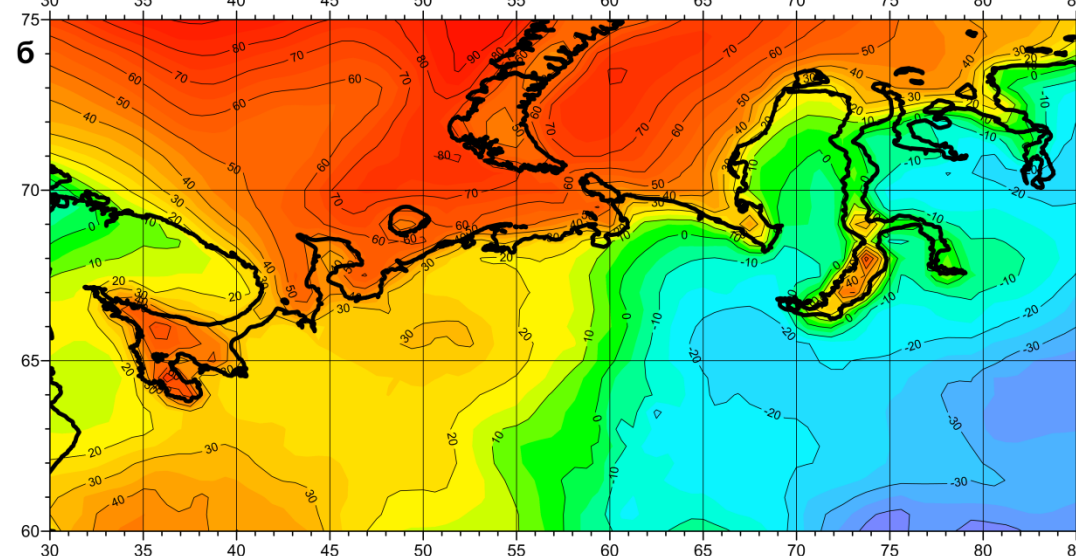
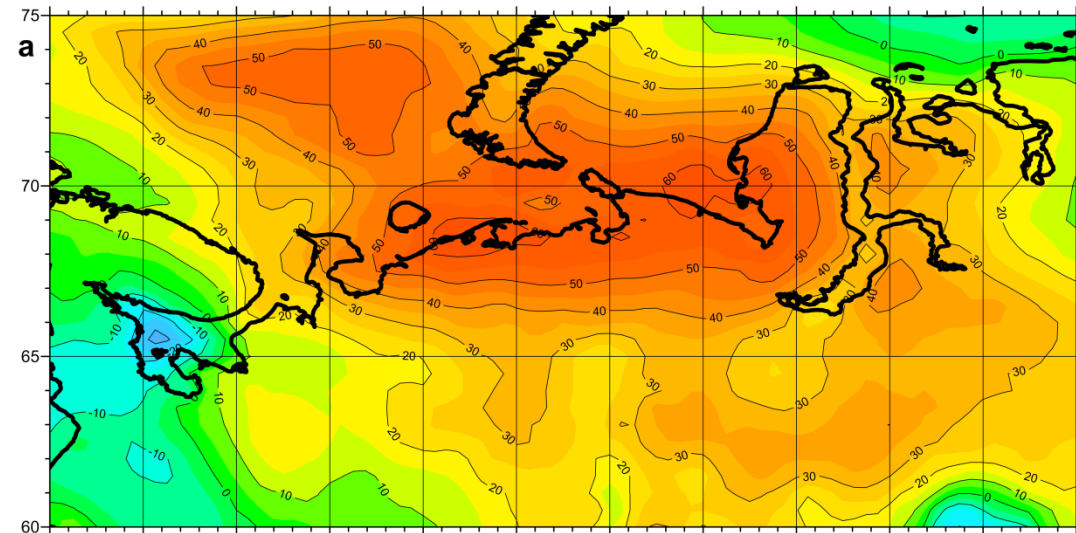
Средние значения удельной влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б) по данным MERRA-2.

Средние значения удельной влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б) по данным MERRA-2.



gram/kg
10years

0,3
0,27
0,24
0,21
0,18
0,15
0,12
0,09
0,06
0,03
0
-0,03
-0,06
-0,09
-0,12
-0,15
-0,18
-0,21
-0,24
-0,27
-0,3



gram/kg
(10years)²

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
-80
-90
-100

Средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) удельной влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности (грамм/кг за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-ой степени (1-ая производная), за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б) по данным MERRA-2.

Среднее ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) удельной влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности (грамм/кг за (10 лет)²), оцененное с помощью приближения полиномами 2-ой степени (2-ая производная), за периоды 1980-2000 гг. (а) и 2001-2021 гг. (б) по данным MERRA-2.

Заключения

- Подтверждено существенное потепление климата западной части российской Арктики в 1980-2021 гг. Причем наиболее сильное увеличение температуры отмечается для ноября и апреля месяцев, что свидетельствует о произошедшем смещении границ сезонов – более позднем начале зимы и раннем ее завершении. Обнаружено, что в период 2001-2021 гг. температура быстрее всего росла в акваториях Баренцева, Карского и Белого морей, и этот рост происходил с ускорением. Таким образом, уменьшилась разница температуры между югом и севером западной части российской Арктики. Предполагается, что одной из причин этого ускоренного роста температуры могла послужить альбедная обратная положительная связь с площадью морского льда.
- Выявлено увеличение количества осадков, особенно явно проявляющееся для летнего сезона и сентября. Вызванное этим увеличение поступления пресных вод в моря способствовало распреснению и усилению стратификации верхнего слоя воды, более раннему образованию морского льда, сокращению потоков тепла из океана в атмосферу и понижению приповерхностной температуры воздуха в зимние периоды в локальных районах впадения крупных рек в Карское и Баренцево моря.
- Обнаружено значительное изменение циркуляции атмосферы в исследуемом регионе. В зимний сезон 2001-2021 гг. в Баренцевом и Карском морях произошло усиление южного ветра по сравнению с 1980-2000 гг. Это могло привести к ветровому нагону морского льда с юга на север Баренцева и Карского морей, сокращению площади льда и усилению перемешивания верхнего слоя воды на юге этих морей. В летний сезон и сентябре месяце 2001-2021 гг. произошло усиление западного ветра по сравнению с 1980-2000 гг., что способствовало усилению западного переноса тепла и влаги из Северной Атлантики в исследуемый регион.
- Обнаружено повышение температуры верхних 10 метров почвы (ТП) приблизительно на $0,5^{\circ}\text{C}$ в 2001-2021 гг. по сравнению с 1980-2000 гг. на западе исследуемого региона. Это может привести к сокращению и даже полному исчезновению островной многолетней мерзлоты на Кольском полуострове, где средняя ТП в 2001-2021 гг. практически всюду выросла и стала превышать $+2,5^{\circ}\text{C}$. В 2001-2021 гг. начался ускоряющийся рост ТП также и на северо-востоке западной части российской Арктики. Таким образом, в настоящее время на большей части исследуемого региона наблюдается ускоряющийся рост ТП, что может привести к таянию многолетней мерзлоты.
- Показано сокращение толщины снежного покрова на западе и востоке исследуемого региона в 2001-2021 гг. по сравнению с 1980-2000 гг., за исключением Приуралья. На западе исследуемого региона также произошло существенное сокращение площади снежного покрова в ноябре и апреле. Из-за этого усилилась альбедная обратная положительная связь между температурой и свободной от снега поверхностью, что могло явиться одной из причин сокращения длительности зимнего сезона в западной части российской Арктики.
- Рост удельной влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности (ВВ) начался на западе исследуемого региона, и в особенности над акваторией Белого моря, в 1980-2000 гг. В 2001-2021 гг. увеличение ВВ распространилось на центр и восток исследуемого региона, с наибольшей скоростью роста над акваториями морей, причем рост ВВ происходил с положительным ускорением. Вероятно, увеличение ВВ над акваториями Белого, Баренцева и Карского морей связано с усилением испарения с их поверхностей вследствие роста температуры поверхности воды и сокращения площади морского льда. Дополнительно к росту ВВ в 2001-2021 гг. на западе и востоке исследуемого региона наблюдался рост влагосодержания почвы.