

II. Изучение и освоение природных ресурсов

УДК.551.52

Климат Гренландии: современные изменения

*И.А. Корнева, И.О. Попов,**С.М. Семенов, доктор физико-математических наук
(ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН»)*

Современные изменения климата в Арктике – существенный фактор, влияющий на экологическое состояние и экономические перспективы региона. Гренландия является одним из ключевых уязвимых элементов климатической системы Земли, чувствительных к глобальному потеплению. Современные (с 1980х годов по настоящее время) изменения климата региона Гренландии оценены в работе на базе данных моделирования и реанализа, а также по данным инструментальных измерений. Статистический анализ этих данных обнаружил доминирующую тенденцию к потеплению земной поверхности в регионе. Установлено также увеличение потока длинноволновой радиации, поглощаемой земной поверхностью, и его связь с краткосрочными и долгосрочными изменениями температуры земной поверхности.

Гренландский ледяной щит – один из крупнейших современных резервуаров замороженной пресной воды. Объем льда в нем – примерно 2,85 млн км³, и его полное таяние, согласно оценкам, может вызвать подъем уровня Мирового океана примерно на 7 м (Schneider et al., 2007, раздел 19.3.5.2).

Палеоклиматические исследования показывают, что в историческом прошлом значения температуры в регионе Гренландии в некоторые периоды существенно отличались от современных. Так, в 1989-1992 гг. в рамках совместного проекта «European Greenland Ice Core Project (GRIP)» в центральной части Гренландии (72° 35' с.ш., 37° 38' з.д.) была пробурена скважина глубиной 3029 м (http://nsidc.org/data/gisp_grip/document/finalrpt/).

По полученным данным выполнена рекон-

струкция значений температуры с помощью изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ (Кислов, 2001). Эти результаты подтвердили наличие в прошлом достаточно больших и быстрых колебаний температуры в Гренландии на протяжении прошедших 110 тыс. лет. Анализ керна льда показал, что в этот период колебания температуры величиной 5°C происходили за сравнительно небольшое время – несколько десятилетий. Однако в последние 10 тыс. лет колебаний температуры таких масштабов не наблюдались.

Более современные палеоклиматические исследования (Overpeck et al., 2006; Otto-Bliesner et al., 2006; Schneider et al., 2007) указывают на то, что частичное таяние Гренландского и, возможно, Западно-Антарктического ледяных щитов в последнем межледниковье (135–117 тыс. лет до н.в.),

когда полярные температуры были на 3–5°C выше современных, привело к подъему уровня Мирового океана на 4–6 м.

Данные инструментальных наблюдений за приповерхностной температурой воздуха (Vinther et al., 2006) показывают (рис. 1), что за последние два века ее значение на Юго-Западе Гренландии увеличилось примерно на 1°C. Этот рост – сигнал глобального потепления. Можно отметить, что на суше есть области, где сигнал глобального потепления проявляется в большей степени см. (Семенов и др., 2008), при этом одновременно наблюдаются, достаточно краткосрочные (за десятки лет), циклические колебания температуры.

Такая картина изменения температуры – сравнительно медленное увеличение в целом в вековом масштабе времени, на которое наложены ненаправленные циклические колебания с характерным временем несколько десятков лет – типична для высоких широт Северного полушария. Можно предположить, что первое есть региональная составляющая глобального потепления, а второе – результат действия

естественных региональных факторов в северной Атлантике. Эти две составляющие можно видеть на графике изменения температуры за все время инструментальных наблюдений (рис. 1). С начала 1990-х г. наблюдается быстрый рост температуры воздуха на Юго-Западе Гренландии, но его было бы неправильно ассоциировать с вековой тенденцией потепления. Вследствие этих особенностей, из-за малости векового тренда и значительности амплитуды циклических колебаний в отдельные периоды в регионе может наблюдаться похолодание. Существуют определенные гипотезы относительно причин этих циклических колебаний (Фролов и др., 2008).

Описанные тенденции потепления, особенно с учетом исторического прошлого этого региона, о чем говорилось выше, порождают беспокойство и признание того, что климат этого региона и тенденции его изменения должны быть тщательно исследованы.

В связи с этим, в данной работе рассматриваются несколько вопросов, касающихся этой проблематики:

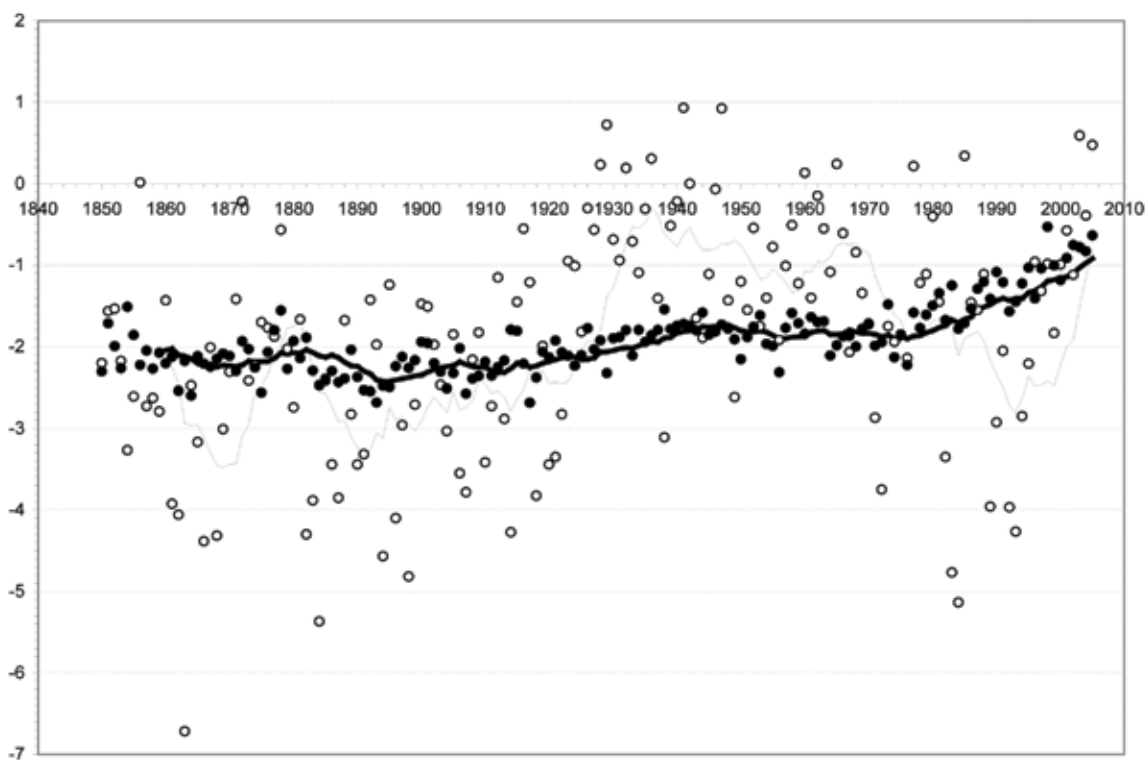


Рис. 1

Данные о среднегодовой температуре воздуха на Юго-Западе Гренландии (полые кружки) и их наилучшее приближение линейной функцией среднегодовой среднеглобальной температуры (заполненные кружки); средние значения и за 11 летний период, включая данный год, – соответственно обычная и жирная сплошные линии. Значения среднегодовой температуры на Юго-Западе Гренландии получены осреднением по данным станций Qaqqortoq, Ilulissat и Nuuk (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/greenland/>; Vinther et al., 2006). Значения среднегодовой среднеглобальной температуры – см. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/crutem3gl.txt>

- каковы современные тенденции изменения температуры и радиационных потоков в регионе Гренландии;
- насколько сравнимы и достоверны их оценки, получаемые разными методами;
- каковы возможные причины наблюдаемого изменения температуры земной поверхности в регионе.

В ходе работы были использованы как данные наземных станций, так и данные моделирования и реанализа.

Регулярные метеорологические измерения на территории Гренландии были начаты в 1872 г. (Vinther et al., 2006). Измерения температуры воздуха регулярно проводятся только на прибрежных станциях, входящих в мировую сеть метеорологических наблюдений. Наиболее длинные временные ряды имеются для температуры воздуха (около 150 лет) для нескольких станций, расположенных в населенных пунктах Юго-Западного побережья (Illulissat, Qaqortoq, Nuuk, Gothaab и др.). Более ранние данные инструментальных измерений относятся к отдельным экспериментам, иногда продолжавшимся несколько лет. Эти данные содержатся в архиве Отдела климатических исследований, Университет Восточной Англии, Великобритания (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/greenland/>).

В данной работе использовалась температура воздуха в приземном слое на стандартной высоте наблюдений 2 м. Источниками этих данных были архивы станционных данных: архив сети GHCN (Global Historical Climatology Network) NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) США и архив экспериментальной программы PARCA (Program for Arctic Regional Climate Assessment) NASA (National Aeronautics and Space Administration) США по исследованию баланса ледникового щита Гренландии. Архив данных GHCN (<http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/>) – это архив среднемесячных значений температуры воздуха. Представлены данные по всему Земному шару; всего 7 280 станций. Из 15 станций сети GHCN, расположенных в Гренландии, для данного исследования были выбраны 4 станции с наиболее однородным рядом наблюдений с 1991 г. по 2007 г.

Данные о температуре приземного воздуха в пределах Гренландского ледника были получены с помощью автоматических метеостанций, установленных в рамках эксперимента программы PARCA NASA, осуществление которой началось в 1993 г. (<http://nsidc.org/data/parca/>). Температура измерялась каждый час с точностью до 0.1°C. В данной работе

использовалась информация о температуре воздуха в приземном слое за 1997-2007 гг. с шести автоматических станций.

Источником радиационных данных послужили два архива: архив реанализа MERRA (Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications) и архив модельных данных SRB (Surface Radiation Budget).

Реанализ – процесс синтеза рядов модельных данных и данных наблюдений. Современный реанализ MERRA CH – the Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications Chemistry Data Collections (http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MERRA_MONTH_CHM) – был разработан в NASA на основе использования современных спутниковых данных программы EOS (Earth Observation System). При этом использовалась система моделей GEOS-5 (Goddard Earth Observing System Model Data Assimilation System), разработанная в GMAO (Global Modeling and Assimilation Office, NASA). В эту систему входит, в частности, модель общей циркуляции атмосферы (МОЦ) GEOS-5 и блок усвоения данных DAS (Data Assimilaion System).

Горизонтальное разрешение данных составляет 1.25 градуса по долготе и 1 градус по широте, вертикальное – 42 слоя, выделенных равномерно по шкале давления до уровня давления 0.1 ГПа. Для расчётов использовались данные о радиационных потоках и температуре земной поверхности в приземном слое за 1984–2007 г.

Полезным источником данных моделирования климатической системы Земли вообще и региона Гренландии в частности является архив SRB (Surface Radiation Budget). Он создан в 1997 г. в рамках эксперимента NASA GEWEX -Global Energy and Water Cycle Experiment (http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/srb/table_srb.html). Цель создания этого архива данных – оценить в глобальном масштабе и документировать потоки коротковолновой радиации (КР) и длинноволновой радиации (ДР) у земной поверхности, на внешней границе атмосферы (ВГА) и в атмосфере.

Потоки коротковолновой и длинноволновой радиации были получены для широтно-долготной сетки 1°x 1° с помощью математического моделирования за период с 1983 по 2007 гг. Для вычислений был применен алгоритм LPSA – Langley Parameterized Shortwave Algorithm (Gupta et al., 2001). В данной работе используются данные о потоках радиации и облачности за период с 1984 по 2007 г.

Современные климатические тенденции перечисленных выше параметров оценивались ста-

статистически в рамках представления о линейности трендов этих величин.

Оценки и параметров a и b линейной зависимости $x(t) = a + b \cdot \bar{\zeta}(t)$ где t - время, а $\zeta(t)$ - независимые реализации центрированной случайной величины ζ , находились методом наименьших квадратов (МНК). Для определения достоверности отличия коэффициента регрессии b от 0 и его знака использовалась статистика Стьюдента с $N-2$ степенями свободы. При этом анализировалось отношение

$$\frac{\hat{b}}{\hat{s}}, \text{ где } \hat{s} = \sqrt{\frac{1}{(N-2)} \frac{\sum_{n=1}^N (\hat{\xi}(t_n))^2}{\sum_{n=1}^N (t_n - \bar{t})^2}}.$$

Где t_1, t_2, \dots, t_N - годы, за которые значения наблюдаемой величины $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)$

известны; \bar{t} - среднее значение моментов времени; $\hat{\xi}(t_n)$ - остатки, т.е. разности между наблюдаемыми значениями и соответствующими значениями линейной функции времени.

Далее анализировалась достоверность линейных трендов, полученных для рядов данных длиной $N=18$ и $N=24$. Соответствующие значения квантилей для $N-2$ степеней свободы для вероятности 0,90 составляют 1,337 и 1,321, а для вероятности 0,99 равны 2,583 и 2,508 (Мюллер и др., 1982, с. 131).

Для исследования взаимосвязи между двумя величинами был рассчитан:

- коэффициент корреляции величин x и y между собой в предположении $b = 0$ и $d = 0$ (т.е. временной тренд отсутствует), а также
- коэффициент корреляции их отклонений ξ и η от линейных трендов.



Рис. 2

Среднее значение среднегодовой температуры воздуха по станционным данным в °C (а) и ее линейный тренд в °C год⁻¹ - коэффициент линейной регрессии температуры на время (б): ромбы – оценки по данным прибрежных метеорологических станций сети GHCN за 1990-2007 гг.; квадраты – оценки по данным автоматических станций эксперимента NASA PARCA за 1997 – 2007 гг.

Первый характеризует сходство изменений этих переменных, а второй – сходство их отклонений от линейных трендов. Во втором случае число степеней свободы на 2 меньше, чем длина ряда наблюдений.

Теперь перейдём непосредственно к анализу полученных результатов. На *рис. 2* представлены средние среднегодовые значения температуры воздуха и результаты оценок их линейного тренда за 1990–2007 гг. (период измерений с наиболее однородным и полным рядом данных) по данным некоторых метеорологических станций сети GHCN, а также за 1997–2007 гг. по экспериментальным данным программы PARCA NASA. Наименьшие среднегодовые температуры, конечно, наблюдаются в центральной и северной частях ледника (до -30°C), а в прибрежных районах, из-за тепляющего влияния океана, температуры выше. Максимальные значения достигаются на Юго-Западном и юго-восточном побережьях (около 0°C).

Почти на всех прибрежных наземных станциях за этот период наблюдается положительный линейный тренд температуры с достоверностью не менее 0.90 (*рис. 2 б*). Наибольшего значения он достигает на Юго-Западных станциях. Напротив, почти во всех точках, расположенных в пределах ледника, за последние годы наблюдается слабый менее значимый отрицательный тренд. Это означает, что в последние два десятилетия среднегодовая температура приземного воздуха в Гренландии повышается на высоком уровне значимости только в прибрежных районах.

Проведено также сравнение среднемесячных данных о температуре, полученных на наземных станциях, со среднемесячными данными, полученными дистанционными методами и с помощью моделирования. Для этого для каждой станции были взяты те ячейки пространственной сетки, в которых данная станция находится, и станционные данные были сравнены с соответствующими данными архивов MERRA и SRB.

Дистанционные данные по абсолютным значениям сильно отличаются от измеренных как на прибрежных станциях, так и на внутриматериковых – различия могут составлять до 5°C . Однако характер изменения температуры по

годам в целом сходен – экстремумы в целом совпадают по времени, колебания также относительно синхронны. Это означает, что модельные, дистанционные и станционные данные в большинстве случаев показывают сходные по направлению изменения. Практически на всех станциях получились высокие коэффициенты корреляции для отклонений среднемесячных значений от линии тренда. Следовательно, кратковременные колебания всех трех среднемесячных показателей температуры управляются общими процессами.

Средняя среднегодовая температура земной поверхности за 1990–2007 гг., оцененная по данным SRB, представлена на *рис. 3*. Конечно, наиболее низкие температуры земной поверхности наблюдаются в центре ледника (до -30°C). Температура поверхности океана на востоке выше, чем на западе. Эта закономерность хорошо согласуется со средним распределением температуры воздуха, представленным на *рис. 2 а*.

Линейный тренд среднегодовой температуры земной поверхности, оцененный по данным модели-

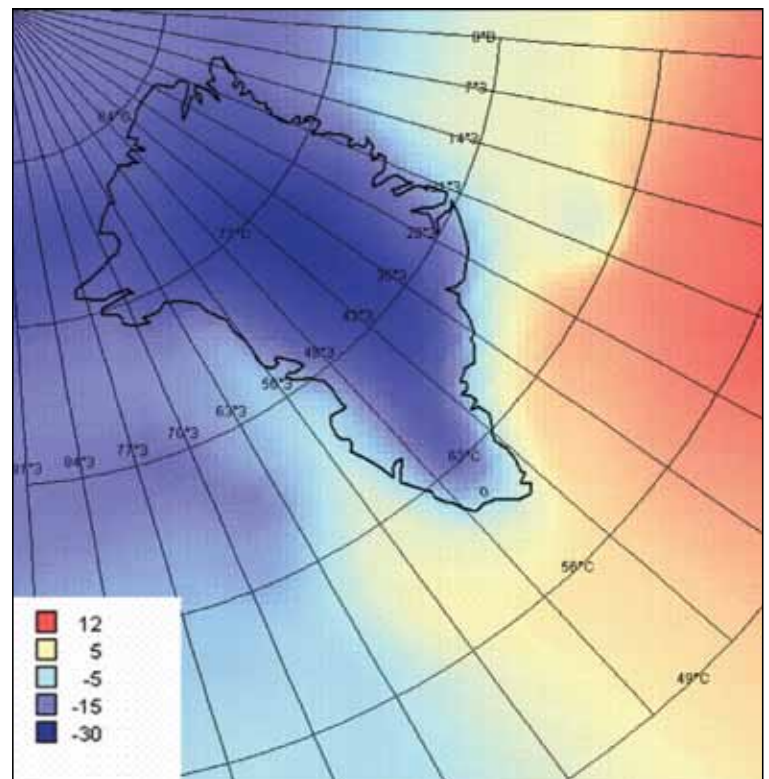


Рис. 3

Средняя среднегодовая температура ($^{\circ}\text{C}$) земной поверхности за 1990–2007 гг., оцененная по данным моделирования (SRB). Здесь и далее на рисунках в легенде указаны цветами границы интервалов, промежуточные значения соответствуют переходным цветам.

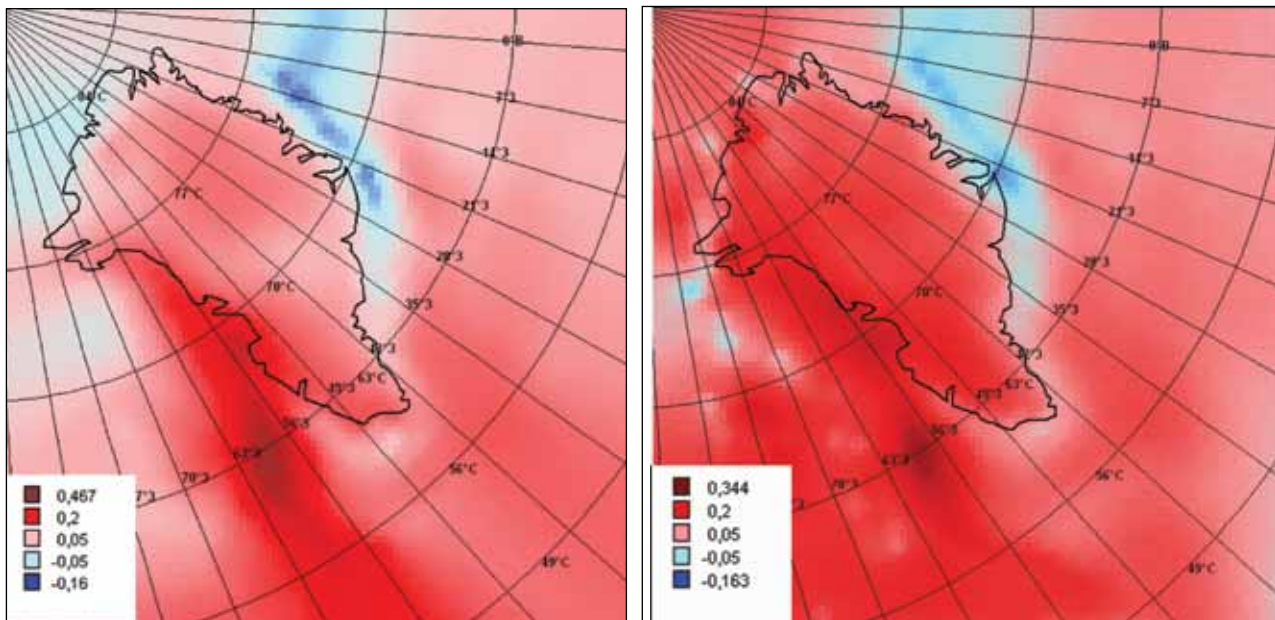


Рис. 4

Линейный тренд среднегодовой температуры ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{год}^{-1}$) земной поверхности за период 1990-2007 гг., оцененный по данным моделирования (SRB) (а) и по данным реанализа MERRA (б).

рования (SRB) и дистанционным данным (MERRA) за период с 1990 по 2007 гг., приведен на рис. 4. На обеих картах-схемах на большей части рассматриваемой территории наблюдается повышение температуры земной поверхности с достоверностью не менее 0.90, максимальное – в море Баффина, вблизи западного и Юго-Западного побережья Гренландии. Вблизи восточного побережья Гренландии, в Датском проливе, с достоверностью не менее 0.90 наблюдается похолодание.

Однако по сравнению с данными моделирования (SRB), данные реанализа (MERRA) показывают на всей рассматриваемой территории большее значение модуля тренда – коэффициента регрессии среднегодовой температуры на время.

Для анализа роли поглощённого земной поверхностью потока радиации для рассматриваемого региона по данным моделирования SRB была рассчитана радиационно-равновесная температура. Под текущей радиационно-равновесной приземной температурой в данной работе подразумевается равновесная (equilibrium) температура T_{eq} , соответствующая текущему значению суммарного потока поглощенного земной поверхностью излучения I_{abs} в состоянии радиационного равновесия данной части земной поверхности с атмосферой и теплового равновесия со слоями, лежащими под данной частью земной поверхности. Ее физический смысл:

температура, измеряемая в данной точке идеализированным термометром, который а) поглощает такой же поток излучения, что и земная поверхность (Вт м^{-2}) и б) находится в состоянии радиационного равновесия с окружающим пространством, причем в) поток излучения которого не изменяет свойств окружающего пространства.

При таком определении, в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$I_{abs} = \sigma_1 T_{eq}^4 \quad (1)$$

или же

$$T_{eq} = (I_{abs} / \sigma_1)^{1/4}. \quad (2)$$

Здесь σ_1 – константа, несколько меньшая постоянной Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт м}^{-2} \text{ K}^{-4}$ вследствие того, что свойства земной поверхности несколько отличаются от свойств абсолютно черного тела (Матвеев, 2000, с. 127). Отношение $\delta = \sigma_1 / \sigma$ – поглощательная способность данной части земной поверхности.

Исходя из данных о фактических температуре земной поверхности и значении восходящего потока инфракрасного излучения, для данной точки земной поверхности константу σ_1 можно оценить следующим образом. Вследствие закона Стефана-Больцмана:

$$Lu = \sigma_1 T^4 \quad (3)$$

или же

$$\ln \sigma_1 = \ln(L_u) - 4 \ln(T). \quad (4)$$

По формуле (4) для каждого месяца календарного года можно получить несколько оценок значения $\ln \sigma_1$ (за несколько лет - от года t_1 до года t_2). Эти оценки потом можно усреднить, и с помощью потенцирования получить оценку σ_1 для рассматриваемого месяца календарного года.

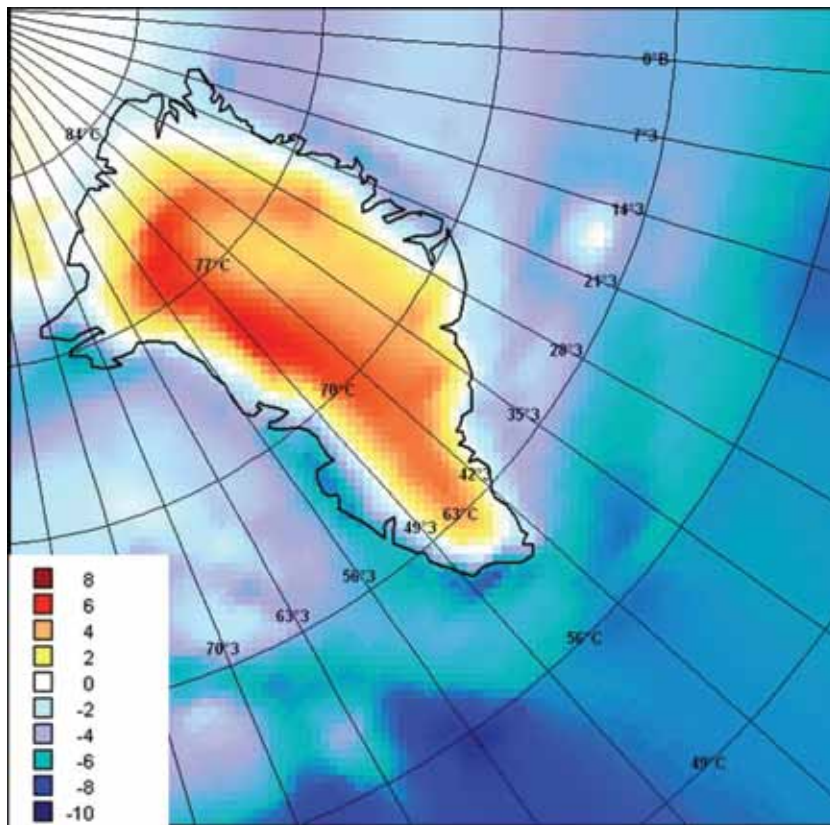


Рис. 5

Разность средних за 1984 – 2007 гг. значений обычной и радиационно-равновесной температуры земной поверхности, °С.

Затем, пользуясь законом Кирхгофа, для текущего месяца можно найти значение I_{abs} по формуле:

$$I_{abs} = S_{abs} + \delta L_d, \quad (5)$$

где $\delta = \hat{\sigma}_1 / \sigma$, а затем и T_{eq} , пользуясь формулой (2).

Среднемесячные значения радиационно-

равновесной температуры земной поверхности для региона Гренландии были вычислены за период времени с 1984 по 2007 гг. Далее были получены их среднегодовые значения, которые сопоставлялись со среднегодовыми значениями обычной температуры земной поверхности, вычисленными также по данным моделирования (SRB).

На рис. 5 представлена разность средних за 1984 – 2007 гг. значений обычной и радиационно-равновесной температуры земной поверхности (°С). Для поверхности океана и прибрежных зон суши обычная температура ниже радиационно-равновесной, а для внутренней части материка – выше. Это

может объясняться следующим образом. В среднем в масштабах года имеется нетто-расход тепла на поверхности океана и в прибрежных зонах, связанный с процессами фазового перехода воды, а на внутренней части материка имеется нетто-приход. Таким образом, здесь замешаны фазовые переходы воды - таяние/испарение воды и конденсация/замерзание соответственно.

Исследование достоверности линейных трендов среднегодовых значений обычной и радиационно-равновесной температуры земной поверхности в 1984 – 2007 гг. показывает, что практически на всем материке и рассматриваемой части океана обнаруживаются положительные тренды при уровне достоверности 0.9 и выше, причем на большей части рассматриваемого региона это наблюдается одновременно. Это позволяет говорить о заметной роли радиационных факторов, и конкретно, поглощаемого поверхностью потока излучения в потеплении земной поверхности в рассматриваемом регионе.

На большей части изучаемого пространства значения коэффициента корреляции отклонений от линии тренда обычной и радиационно-равновесной температуры > 0.7 . Это означает, что 50% варьирования одного показателя можно объяснить изменчивостью другого показателя.

В то же время, в океане есть обширная область в прямоугольнике 56–67 с.ш. и 14–28 з.д.,

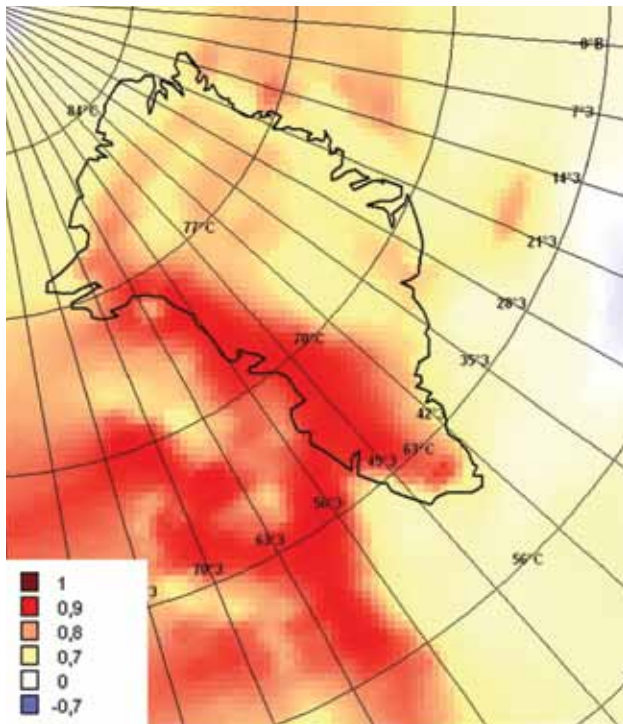


Рис. 6
Оценка коэффициента корреляции отклонений от линии тренда среднегодовых значений обычной и радиационно-равновесной температуры земной поверхности в 1984-2007 гг.

отклонений от линии тренда для них находится в пределах ± 0.3 . Это означает, что не более 10% краткосрочного варьирования температуры земной поверхности можно объяснить колебаниями потока КР на ВГА.

Что касается потока коротковолновой радиации, приходящей к земной поверхности, то наиболее значимый положительный тренд потока КР наблюдается в океанической части рассматриваемого региона, около восточного побережья материка и в Девисовом проливе (рис.7). Тенденция к уменьшению приходящего коротковолнового потока на уровне достоверности выше 0.90 наблюдается вблизи южной оконечности Гренландии (минимальное значение $-0.75 \text{ Вт м}^{-2} \text{ год}$) и в северо-восточных и северо-западных частях материка. Центральная ледниковая часть Гренландии характеризуется изменениями по модулю менее 0.2 Вт м^{-2} , которые проявляются на более низком уровне достоверности.

На качественном уровне эти изменения практически не согласуются с изменениями температуры земной поверхности (рис. 4). При количественном анализе отклонений от линии тренда более и менее значимая связь наблюдается лишь в некоторых небольших областях: прямая зависимость в Девисовом проливе и обратная (отрицательный коэффициент корреляции) в северной части мате-

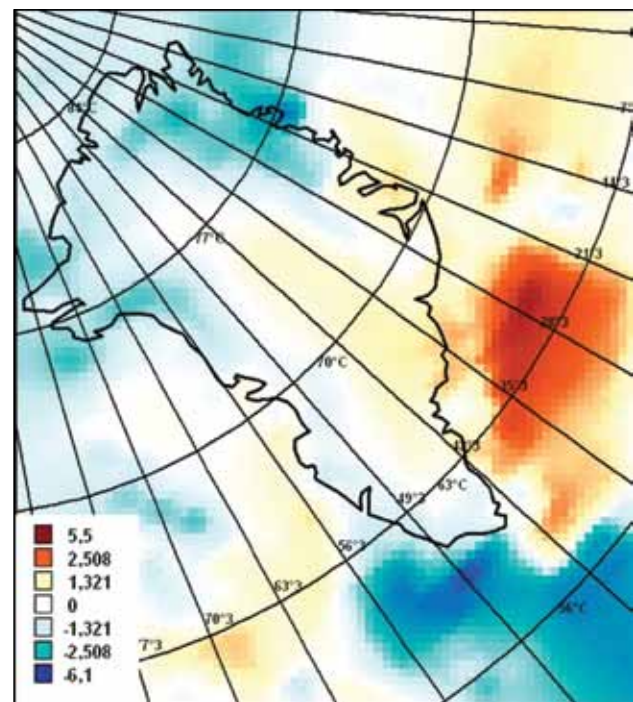
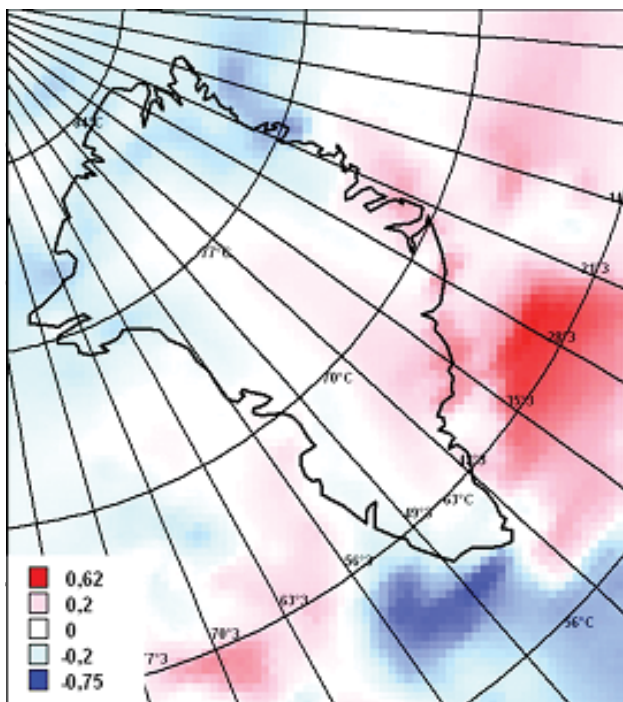


Рис. 7
Линейный тренд среднегодовых значений потока приходящей к земной поверхности коротковолновой радиации, Вт м^{-2} (а) и оценка его достоверности (Ω) по данным моделирования SRB за период 1984-2007 гг. (б)

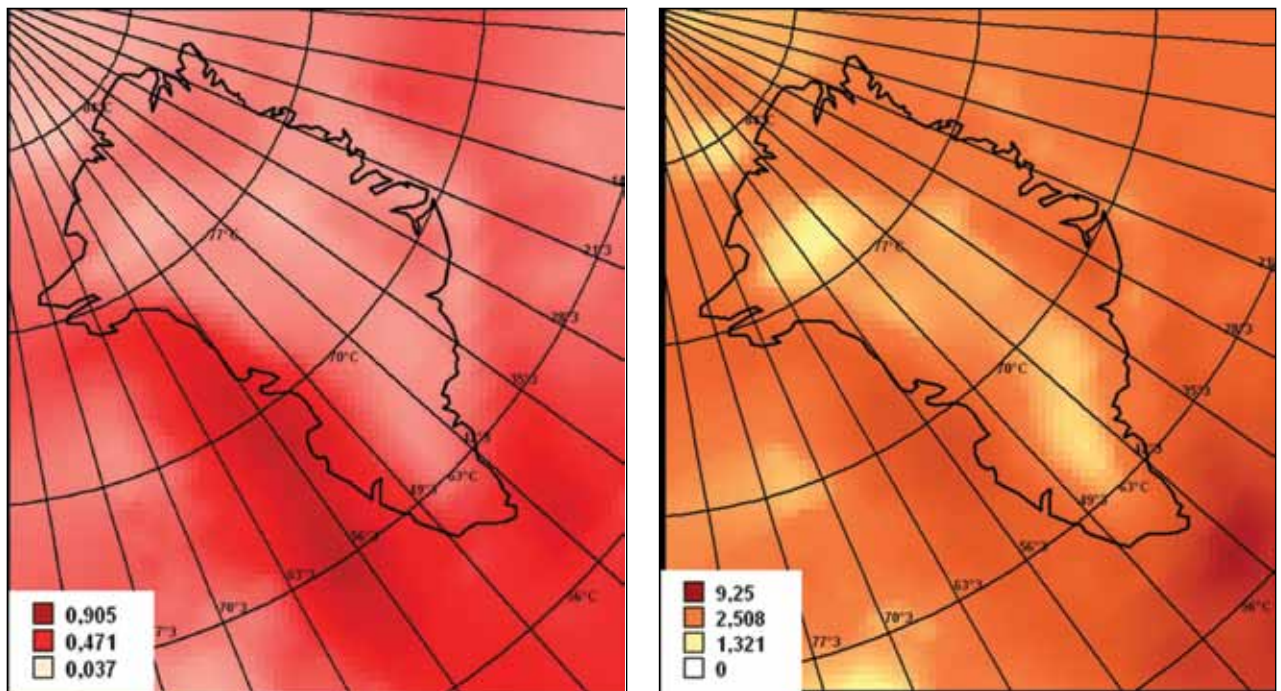


Рис. 8

Линейный тренд потока длинноволновой радиации, приходящей к земной поверхности, Вт м^{-2} , (а) и оценка его достоверности (б); использованы данные моделирования SRB о потоках ДР за период 1984-2007 гг.

рика. В остальной части рассматриваемого пространства коэффициент корреляции невысокий, и, следовательно, краткосрочные отклонения температуры от линии тренда не могут быть вызваны отклонениями потока приходящей к земной поверхности коротковолновой радиации.

На всей рассматриваемой территории наблюдается увеличение потока длинноволновой радиации (ДР), причём практически везде с достоверностью более 0.90 (менее достоверная тенденция наблюдается в некоторых центральных частях материка и в Юго-Западной океанической области, вблизи побережья Канады). Максимальное увеличение приходящего потока ДР характерно для западного побережья Гренландии и прилегающего к нему океана (0.9 Вт м^{-2}). Именно в этом районе наблюдается и максимальное увеличение температуры поверхности (рис. 4).

В этом же районе значения коэффициента корреляции отклонений от линии тренда этих двух параметров наиболее высокие, до 0,97 (рис. 9). В целом практически на всей рассматриваемой территории значение коэффициента корреляции более 0.7, что говорит о том, что краткосрочные изменения температуры поверхности в данной области пространства тесно связаны с изменениями потока приходящей к земной поверхности ДР.

На температуру подстилающей поверхности и температуру воздуха существенное влияние оказывает облачность. Данные о среднегодовой облачности получены по среднемесячным данным из архива SRB. Это данные программы ISCCP версии C1 («Gridded Cloud Product») о частоте появления облаков в данном квадрате измерений (%).

По данным спутниковых измерений для каждого пикселя $5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$ с помощью определённой процедуры (см. <http://isccp.giss.nasa.gov/pub/documents/dn-031.pdf>) определялось наличие или отсутствие облачности для данного пикселя. Затем число облачных пикселей делилось на число всех пикселей в ячейке площадью 280 км^2 .

Измерения проводились каждые 3 часа, и затем данные усреднялись за месяц, в результате чего и получался используемый нами параметр («Total Cloud Amount»). Среднегодовые значения количества облачности и их изменения представлены на рис. 10.

Видно, что наибольшее количество облачности наблюдается над океаническими более тёплыми поверхностями, где наиболее интенсивно развивается процесс испарения. Над материком и над морем Баффина количество облачности гораздо ниже.

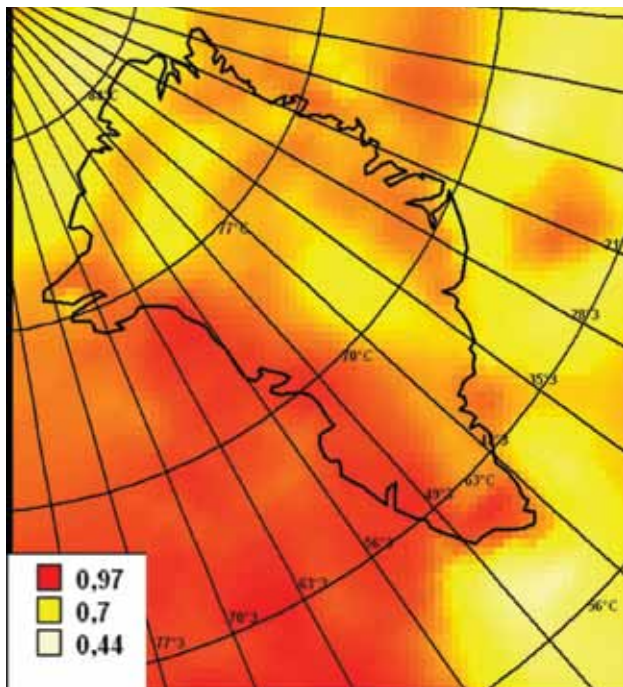


Рис. 9
Оценка коэффициента корреляции отклонений от линии тренда среднегодовых значений потока приходящей к земной поверхности длинноволновой радиации и температуры земной поверхности. Использованы данные моделирования SRB за период с 1984 по 2007 г.

Наиболее значимая (на уровне достоверности выше 0.90) тенденция к увеличению количества облачности наблюдается над океаническими районами вблизи западного и южного побережий Гренландии. Уменьшение облачности характерно для внутренних районов материка на уровне достоверности около 0.90.

Сопоставление картины пространственного распределения трендов среднегодовой температуры земной поверхности (рис. 4) и количества облачности (рис. 10 б) не указывает на определенную взаимосвязь долговременных изменений этих параметров.

Значения коэффициентов корреляции отклонений от линии тренда в основном невелики. Есть лишь две области довольно высоких значений – около 0.7 по абсолютной величине. Одна находится в районе моря Лабрадор и Девисова пролива, а другая – в северной части материка.

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Долговременная тенденция изменения температуры воздуха на Юго-Западе Гренландии имеет вековую глобальную составляющую – медленное изменение, приводящее в целом к потеплению, а также региональную составляющую - циклические колебания с характерным временем в несколько

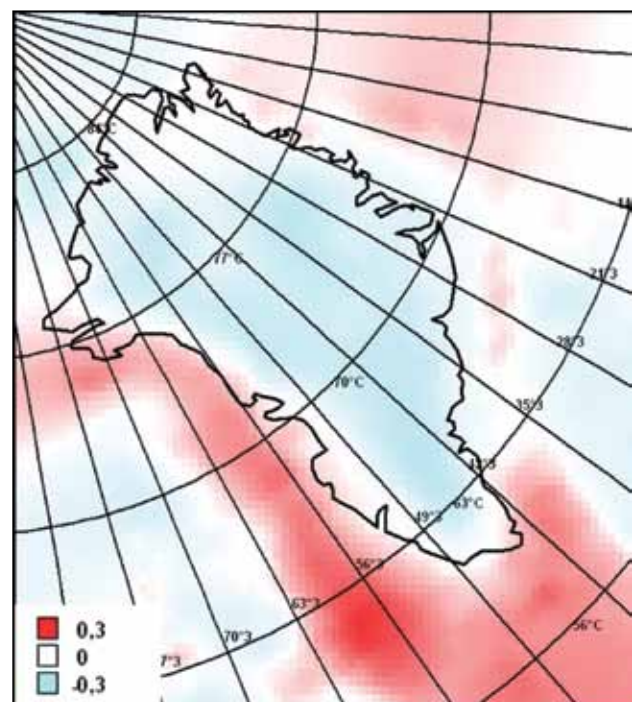
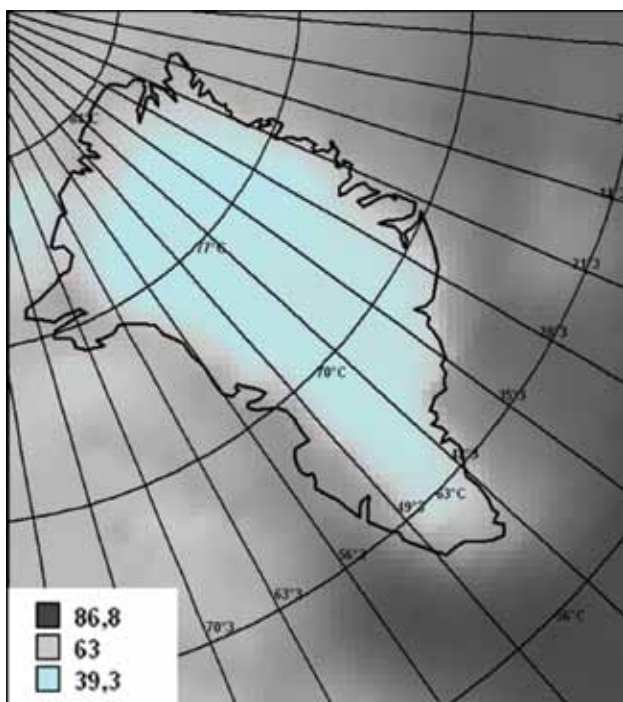


Рис. 10
Среднегодовое количество облаков (%), а) и его линейный тренд (% год⁻¹), б); использованы данные SRB за 1984-2007 гг.

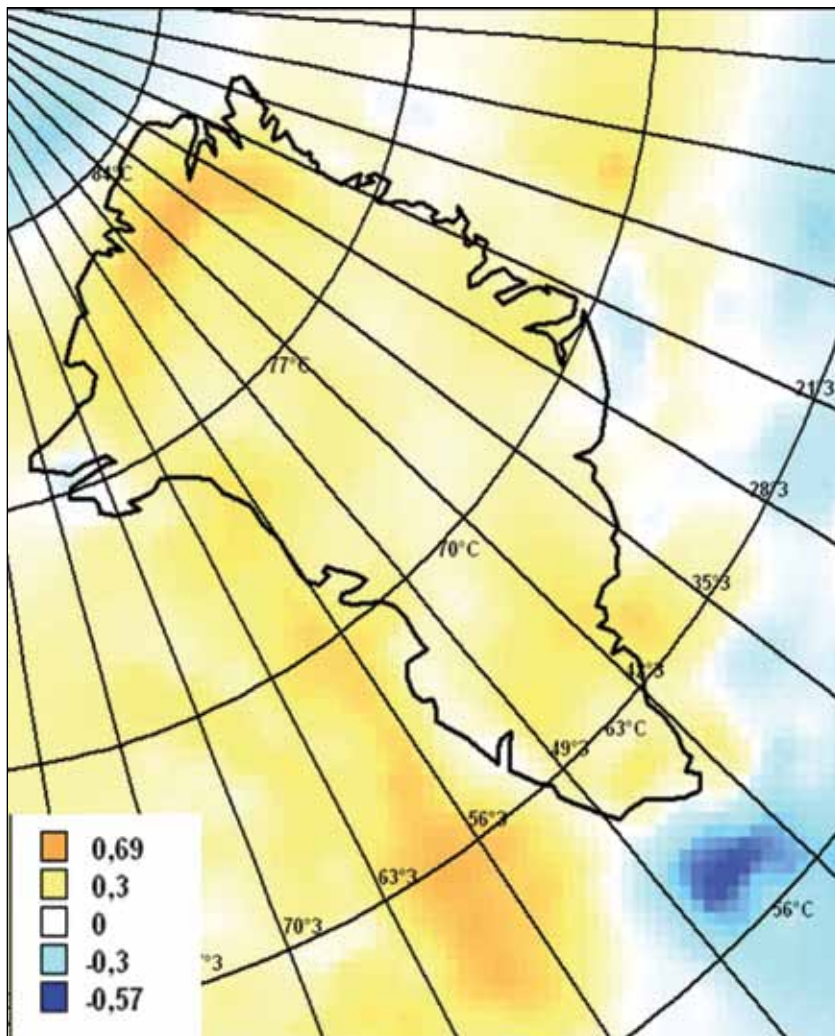


Рис. 11

Оценка коэффициента корреляции отклонений от линии тренда среднегодовых значений количества облачности и температуры земной поверхности; использованы данные моделирования SRB за 1984 - 2007 гг.

десятилетий. При этом циклические колебания при общей тенденции к потеплению могут приводить к похолоданию.

2. По результатам анализа данных стационарных измерений температуры воздуха сети GHCN и автоматических метеостанций эксперимента NASA PARCA за 1997 – 2007 гг. среднегодовая температура приземного воздуха в Гренландии в прибрежных районах повышается с достоверностью не менее 0.90.

3. Стационарные и дистанционные/модельные данные иногда сильно отличаются по абсолютным значениям (до 5°C), но на качественном уровне показывают сходные по направлению изменения.

коэффициента корреляции отклонений среднегодовой температуры земной поверхности и радиационно-равновесной температуры от линии тренда > 0.7, что означает, что 50% краткосрочной изменчивости температуры земной поверхности связаны с радиационными факторами.

7. Определенной связи между изменениями в потоках коротковолновой радиации, количестве облачности и изменением температуры земной поверхности, не выявлено. Наиболее вероятно, что долговременные изменения среднегодовой температуры земной поверхности связаны с увеличением потока приходящего к земной поверхности длинноволнового излучения.

Эти тенденции подтверждаются и при анализе значений коэффициентов корреляции. Кратковременные колебания всех трех среднемесячных показателей температуры в значительной степени управляются общими процессами.

4. За период с 1990 г. по 2007 г. и по данным моделирования (SRB) и по данным реанализа (MERRA) на большей части рассматриваемой территории наблюдается повышение температуры земной поверхности с достоверностью не менее 0,90, максимальное – в море Баффина, вблизи западного и Юго-Западного побережья Гренландии. Вблизи восточного побережья Гренландии, наблюдается понижение температуры поверхности океана.

5. Анализ пространственного распределения долговременных линейных трендов (примерно за 2 десятилетия) среднегодовой температуры земной поверхности в рассматриваемом регионе и суммарного потока радиации, поглощаемого земной поверхностью, обнаружил их существенное сходство (сравнивались тренды обычной и радиационно-равновесной температуры).

6. На большей части изучаемого пространства значения

Литература

1. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. Москва, МАИК «Наука»/ИНТЕРПЕРИОДИКА, 2001, 351 с.
2. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб, Гидрометеиздат, 2000, 778 с.
3. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Наука, 2005.
4. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. Москва, Финансы и статистика, 1982, 272 с.
5. Семенов С.М., Израэль Ю.А., Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Изменения глобальной температуры и региональные риски при некоторых стабилизационных сценариях антропогенной эмиссии диоксида углерода и метана. В кн.: Изменения окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Том VI. Изменения климата: влияние земных и внеземных факторов. Москва, ИФА РАН, 2008.
6. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Шестидесятилетняя цикличность в изменениях климата полярных регионов. //Материалы гляциологических исследований. М., 2008: Т. 105. С.158-165.
7. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001, 881pp.
8. Darnell, W. L., S. K. Gupta, and W. F. Staylor: Downward longwave surface radiation from Sun-synchronous satellite data: Validation of methodology. J. Clim. Appl. Meteorol., 1986, 25, 1012-1021.
9. Darnell, W. L., W. F. Staylor, et. al. Estimation of Surface Insolation Using Sun-synchronous Satellite Data. Journal of Climate, August 1988, Vol. 1, No. 8, pp. 820 - 835.
10. Darnell, W. L., W. F. Staylor, et. Al. Global Surface Radiation Budget Estimations by Satellite Techniques- Test Results. Proceedings of the International Radiation Symposium, August 1988.
11. Darnell W.L., Staylor W.F., Gupta S.R., Ritchey N.A., Wilber A.C. Seasonal variation of surface radiation budget derived from International Satellite Cloud Climatology Project C1 data - J. Geophys. Res., 1992, V.97. P.15741-15760.
12. Gupta, S. K. A parameterization for longwave surface radiation from Sun-synchronous satellite data. J. Climate, 1989, 2, 305-320.
13. Gupta, S. K., W. L. Darnell, and A. C. Wilber. A parameterization of longwave surface radiation from satellite data: Recent improvements. J. Appl. Meteorol., 1992, 31, 1361-1367.
14. Gupta, S. K., P. K. David, P. W. Stackhouse, and A. C. Wilber. The Langley Parameterized Shortwave Algorithm (LPSA) for Surface Radiation Budget Studies. NASA/TP-2001-211272. December 2001, 21 pp. (<http://www.google.ru/search?ie=UTF-8&hl=ru&q=LPSA%2C%20Langley>)
15. Otto-Bliesner, B.L., S. Marshall, J. Overpeck, G. Miller, A. Hu and CAPE Last Interglacial Project Members, 2006: Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. Science, 311, 1751-1753.
16. Overpeck, J.T., B.L. Otto-Bliesner, G.H. Miller, D.R. Muhs, R.B. Alley and J.T. Kiehl: Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise. Science, 2006, 311, 1747-1750.
17. Schneider, S.H., S. Semenov, A. Patwardhan, I. Burton, C.H.D. Magadza, M. Oppenheimer, A.B. Pittock, A. Rahman, J.B. Smith, A. Suarez F. Yamin: Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
18. Vinther, B. M., K. K. Andersen, P. D. Jones, K. R. Briffa, and J. Cappelen. Extending Greenland temperature records into the late eighteenth century, J. Geophys. Res., 2006, 111, D11105, doi:10.1029/2005JD006810
19. Whitlock, C. H., T. P. Charlock, W. F. Staylor, R. T. Pinker, I. Laszlo, A. Ohmura, H. Gilgen, T. Konzelman, R. C. DiPasquale, C. D. Moats, S. R. LeCroy, and N. A. Ritchey: First global WCRP shortwave surface radiation budget dataset. Bull. Amer. Met. Soc., 1995, 76, 905-922.