

Изменения температуры воздуха и осадков в тундровой зоне России

Н. В. Зухерт*, Д. Г. Замолдчиков*

Анализируются тренды современных изменений климатических параметров в связи с изучением влияния изменения климата на тундровые экосистемы и их адаптацию к этим изменениям. Выявленные тренды температуры воздуха и сумм осадков не имеют достаточно четких проявлений. Отсутствие явного потепления в Российской Арктике является отражением региональной специфики изменения климата и не снимает проблему возможной трансформации углеродного баланса тундр.

1. Введение

Современные наблюдения за погодой и анализ ее изменчивости указывают на отчетливое и длительное изменение климата, приводящее к повышению температуры [1—4, 9, 14]. Это изменение носит глобальный характер, и наиболее отчетливо потепление прослеживается с конца 1960-х годов до 1990 г. [16]. Наблюдаемые изменения климата объясняют антропогенными причинами и в первую очередь увеличением содержания CO_2 в атмосфере. В современных сценариях изменения климата, основанных на моделировании атмосферных процессов при удвоении содержания CO_2 в атмосфере [9, 14], а также в палеоаналоговой модели М: И: Будыко [1—3] отмечается неоднозначность региональных изменений климата. При этом предполагается, что наиболее резкое повышение температуры как зимой, так и летом будет происходить в высоких широтах, особенно на Арктическом побережье Сибири.

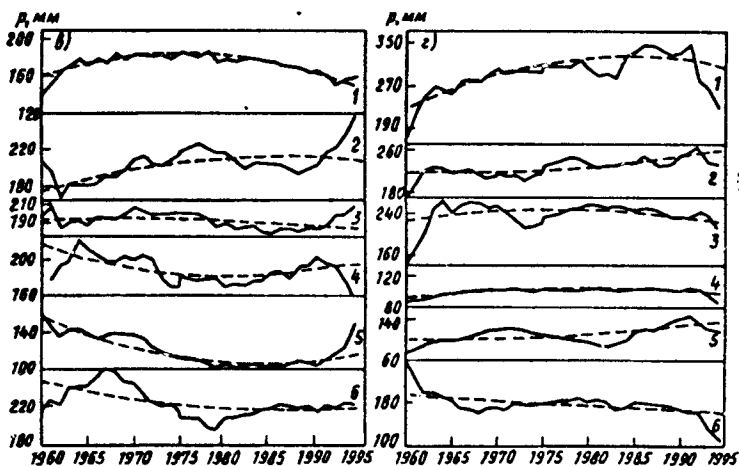
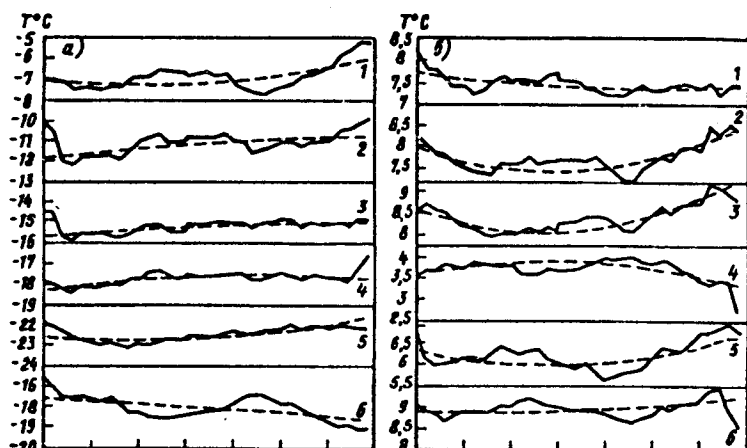
Прогноз неоднозначных климатических изменений требует дополнительных исследований современных колебаний климата в отдельных районах.

Настоящее исследование выполнялось в рамках Государственной научно-технической программы "Глобальные изменения природной среды и климата". В работе анализируются тренды современных изменений климатических параметров для изучения влияния изменения климата на тундровые экосистемы и их адаптацию к этим изменениям.

2. Методика

Оценка изменения температуры воздуха и осадков проводилась для отдельных сезонов года по данным многолетних рядов наблюдений на 17 метеорологических станциях, расположенных в тундровой зоне России. В основном анализируемые многолетние ряды наблюдений на различных станциях составляли от 40 до 100 лет.

* Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук.



Изменения средней температуры воздуха (а, б) и сумм осадков (в, г) в тундровой зоне России с 1960 по 1994 г. в холодный ($T < 0^{\circ}\text{C}$; а, в) и теплый ($T > 0^{\circ}\text{C}$; б, г) сезоны года.

1) Кольский полуостров, 2) большеземельская тундра, 3) полуостров Ямал, 4) полуостров Таймыр, 5) север Якутии, 6) Чукотка. Сплошная линия — ряды метеорологических величин, сглаженные методом скользящей средней по пяти годам; пунктир — аппроксимационные линии, полученные методом регрессионного анализа, используя квадратичную зависимость.

Обычно прогноз изменения климата в различных моделях осуществляется для зимы и лета. Анализ данных о температуре воздуха показал, что для выбранных территорий логичнее делить год на сезоны со средней суточной температурой ниже и выше 0°C (соответственно холодный и теплый сезоны). Исследование рядов температуры воздуха и осадков осуществлялось в отдельности для каждого из этих сезонов. Средние для сезона значения температуры и суммы осадков рассчитывались для каждой станции за весь период наблюдений.

Тундровая зона России была разделена на 6 регионов: тундра Кольского полуострова (2 станции); большеземельская тундра (1 станция); тундра полуострова Ямал (2 станции); тундра полуострова Таймыр (3 станции); тундровая зона Якутии (5 станций); тундровая зона Чукотки (4 станции). Периоды наблюдений на станциях были различными, поэ-

тому проводился совместный анализ данных о температуре и осадках на выбранных для каждого региона станциях. При отсутствии данных за какой-либо год на отдельной станции значения метеовеличин восстанавливались по данным ближайших метеостанций методом приведения данных к одному периоду [7].

Анализ многолетних рядов температуры и сумм осадков для каждой станции позволил выявить общие тенденции в изменениях климата отдельных территорий. В дальнейшем основной анализ многолетних рядов метеорологических величин проводился в целом по регионам, для чего данные отдельных станций усреднялись по выделенным территориям. Наиболее подробный анализ изменений климата сделан для периода с 1960 по 1994 г. Выбор данного периода объясняется тем, что глобальное потепление становится заметным после 60-х годов.

Анализ временных рядов метеорологических величин проводился методом скользящих средних, чтобы выявить длиннопериодные тенденции в изменениях климата и отделить короткопериодные колебания. Этот метод является одним из наиболее распространенных при исследовании изменения климата [10, 12]. Для каждого ряда наблюдений были построены аппроксимационные кривые, позволяющие проследить тренд климатических параметров и направление возможных изменений в будущем (см. рисунок).

Визуальный анализ кривых хода температуры и сумм осадков за холодный и теплый сезоны, построенных для всех 17 метеостанций, показал некоторое различие в изменении климатических параметров в период до 1980 г. и после него. В связи с этим статистические характеристики многолетних рядов температуры воздуха и сумм осадков (средние значения температуры воздуха \bar{T} и сумм осадков \bar{P} , средние квадратические отклонения σ этих параметров; коэффициенты асимметрии A_s и эксцесса E_x) рассчитывались для двух периодов: с 1960 по 1980 г. и с 1980 по 1994 г. для выбранных сезонов. Статистические параметры исследованных рядов приведены в таблице.

3. Результаты и обсуждение

Изменение метеорологических величин в холодный сезон года. Данные таблицы свидетельствуют, что практически во всех регионах тундровой зоны России в холодный сезон в 1980—1994 гг. наблюдалось повышение средней температуры воздуха от 0,2°C на Кольском полуострове до 0,8°C на полуострове Таймыр. Анализ статистических моментов σ , A_s , E_x показал, что после 1980 г. отклонения температуры за каждый отдельный год от средней величины меньше, чем в 1960—1980 г., а повторяемость лет с температурой выше среднего значения больше. Повышение средней температуры воздуха почти не наблюдается на Чукотке. В целом с 1960 г. по настоящее время амплитуда колебаний средней температуры холодного сезона не превышает среднего квадратического отклонения.

Ход изменения средней температуры холодного сезона показан на рисунке а. Видно, что увеличение средней температуры холодного периода наблюдается во всей тундровой зоне России (кроме Чукотки). В колебаниях средней температуры холодного сезона в этих регионах отмечается

Статистические характеристики многолетних рядов температуры воз

Регион	1960—1980 гг.				1980—	
	\bar{T}	σ	A_0	A_1	\bar{T}	σ
Холодный сезон						
Кольский полуостров	-7,0	1,2	0,73	0,58	-6,8	1,7
Большеземельская тундра	-11,4	1,8	-0,06	-0,56	-10,9	1,6
Полуостров Ямал	-15,6	1,6	0,79	0,43	-14,8	1,5
Полуостров Таймыр	-19,2	1,0	-0,56	2,39	-18,4	0,9
Север Якутии	-22,7	0,9	0,71	0,08	-22,1	1,0
Чукотка	-18,0	1,7	-0,05	-0,51	-18,1	1,2
Теплый сезон						
Кольский полуостров	7,5	1,1	0,21	-0,89	7,3	0,6
Большеземельская тундра	7,7	1,0	0,51	1,27	7,9	1,1
Полуостров Ямал	8,2	0,7	-0,21	-0,47	8,7	0,8
Полуостров Таймыр	3,8	0,6	0,66	-0,41	3,7	0,6
Север Якутии	6,1	1,0	-0,06	-0,57	6,3	1,2
Чукотка	9,0	0,6	-1,25	1,58	9,0	0,8

определенная синхронность. При этом колебания сглаженных средних относительно аппроксимационных трендов имеют четкую амплитуду на европейской части тундры (тундра Кольского полуострова и большеземельская тундра). На фоне общего повышения температуры выделяются периоды понижения средней температуры холодного сезона — с 1960 по 1970 г. и с 1980 по 1990 г. На полуостровах Ямал и Таймыр изменчивость сглаженного хода средней температуры холодного сезона относительно тренда незначительна, а тренды недостаточно выражены.

На севере Якутии повышение средней сезонной температуры практически совпадает со сглаженным ходом температур, особенно после 1970 г.

Изменения средней сезонной температуры в зоне тундры на Чукотке несколько отличаются от ее изменений в других регионах. Это единственный район, где аппроксимационная линия указывает на постепенное понижение температуры воздуха.

В целом во всех регионах изменчивость средней сезонной температуры воздуха не превышает среднего квадратического отклонения, что не позволяет говорить о стойких изменениях климата в настоящее время в районах тундры в холодный сезон.

Суммы осадков отличаются сильной изменчивостью от года к году. В то же время анализ многолетних изменений показывает некоторую общую закономерность, проявляющуюся в уменьшении сумм осадков за холодный сезон. В таблице приведены статистические параметры рядов сумм осадков за холодный сезон. Как видно из данных таблицы, после 1980 г. во всех регионах (кроме большеземельской тундры) отмечается некоторое уменьшение сумм осадков в холодный сезон. Однако абсолютные величины уменьшения осадков для всех территорий незначительны и меньше среднего квадратического отклонения.

Ход многолетних изменений сумм осадков холодного сезона приведен на рисунке в. В целом для западных территорий, включая полуостров

дужа (°С) и сумм осадков (мм) для холодного и теплого сезонов

1994 г.		1960—1980 г.				1980—1994 г.			
As	Ex	\bar{P}	σ	As	Ex	\bar{P}	σ	As	Ex
<i>(T < 0°C)</i>									
-0,44	-0,69	176	35	-0,12	-0,74	167	26	-0,44	-0,48
-1,16	1,07	196	47	0,62	-0,05	210	46	-0,12	0,99
0,40	-0,71	197	38	-0,09	-0,55	188	34	-0,08	-0,12
-0,05	-0,67	196	34	0,44	0,53	189	37	-0,08	-1,29
-0,58	-1,14	128	38	0,68	0,14	108	29	1,12	-0,15
0,61	-1,16	230	55	-0,28	-0,35	222	44	0,09	-1,19
<i>(T > 0°C)</i>									
0,64	-0,77	282	79	0,41	0,10	329	134	2,80	9,24
-0,31	0,77	217	58	0,71	0,53	246	63	-0,17	-0,52
-0,39	0,28	236	76	0,25	-0,41	242	55	0,97	0,54
-0,34	-0,31	90	16	0,77	-0,33	93	18	0,09	0,07
0,95	3,51	105	35	0,40	0,43	119	54	0,19	-0,37
0,97	2,26	185	50	0,05	0,38	170	58	0,61	-0,56

Ямал, тренды в изменениях осадков мало выражены, но имеют тенденцию к уменьшению сумм осадков после 1980 г. В районе большеземельской тундры увеличение сумм осадков с 1960 г. до начала 70-х годов сменяется незначительными колебаниями сумм осадков в холодные сезоны относительно аппроксимационной линии, практически не имеющей наклона. Резкое увеличение осадков в 1994 г. сказалось на увеличении средней суммы осадков после 1980 г., но не повлияло на общий тренд. В восточных районах, начиная с полуострова Таймыр, ход усредненных сглаженных значений и аппроксимационные тренды изменения осадков имеют общий характер. На фоне колебаний сумм осадков четко прослеживается уменьшение осадков с 1960 г. до середины 80-х годов. С 1985 г. отмечается постепенное увеличение сумм осадков, которое не сказывается на увеличении средних значений после 1980 г. и практически не изменяет направления тренда. Даже резкое увеличение осадков, отмеченное на Таймыре в 1994 г., не сказалось на общем тренде.

Изменение метеорологических параметров в теплый сезон. Анализ изменения температуры воздуха в теплый сезон показывает, что различия температуры воздуха между периодами 1960—1980 и 1980—1994 гг. незначительны (см. таблицу).

Некоторое увеличение средней температуры (0,2—0,5°C) в теплый сезон после 1980 г. наблюдается в большеземельской тундре, на полуострове Ямал и в Якутии. Это увеличение не превышает среднего квадратического отклонения за оба периода наблюдений. Амплитуды отклонений температуры от средних значений в отдельные годы в оба периода наблюдений достаточно близки, на что указывают значения σ , As , Ex .

Кривые многолетнего хода температуры подтверждают эти выводы (см. рисунок б). Как и в холодный сезон, в теплую половину года практически во всех районах отмечается синхронность в колебаниях температуры. На рисунке прослеживаются довольно четкие положительные тренды средней

температуры воздуха с середины 70-х годов в районах большеземельской тундры, полуострова Ямал, на севере Якутии и на Чукотке.

В районах тундры Кольского полуострова и Таймыра аппроксимационные линии указывают на понижение средней сезонной температуры. В целом по всем территориям колебания температуры относительно аппроксимационной кривой имеют меньшую амплитуду, чем в холодный сезон года. Особенно это заметно проявляется в крайнем западном районе Кольского полуострова и на полуострове Таймыр. Для этих районов сглаженные кривые хода температуры близки к аппроксимационным линиям.

Анализ изменения сумм осадков в теплый сезон года указывает на их увеличение во всех зонах тундры, кроме Чукотки. Наиболее значительное увеличение средних сумм осадков в теплом периоде отмечено на Кольском полуострове (47 мм) и в зоне большеземельской тундры (29 мм). Отметим, что на Кольском полуострове после 1980 г. наблюдаются и более резкие колебания сумм осадков от года к году. В остальных же районах изменения сумм осадков в 1960—1980 гг. и после 1980 г. примерно одинаковы (см. таблицу).

Ход изменения сумм осадков в теплый сезон года показан на рисунке 2. Видно, что во всех регионах, кроме Чукотки, имеется постепенное увеличение сумм осадков. Резкое уменьшение осадков в 1994 г., которое отмечено во всех районах, не меняет направления тренда. Для западных районов характерна синхронность в колебаниях осадков с 1960 г. по настоящее время. На полуострове Таймыр ход усредненной сглаженной кривой практически совпадает с линией тренда и не позволяет выявить заметных колебаний осадков за весь период наблюдений. На севере Якутии изменчивость осадков в целом совпадает с ходом осадков в западных районах, но периоды увеличения и уменьшения сумм осадков имеют некоторый сдвиг относительно западных территорий.

На Чукотке в зоне тундры отмечается уменьшение сумм осадков в теплый сезон, которое отражается на средних значениях за период после 1980 г. и в уменьшении разброса данных за отдельные годы относительно среднего значения. Тренд изменения осадков в теплом периоде на Чукотке имеет достаточно выраженное направление, указывающее на уменьшение количества осадков.

В целом амплитуда изменения осадков в течение всего периода наблюдений, как и температуры воздуха, в районе арктических тундр России не превышает среднего квадратического отклонения.

4. Заключение

Характер современной динамики климата в Арктике чрезвычайно важен для понимания и прогноза климатических изменений в глобальном масштабе. Дело в том, что арктические экосистемы (тундры и лесотундры) содержат значительные запасы углерода в сезонно талом почвенном слое и в вечной мерзлоте. В результате потепления, уменьшения влажности и улучшения аэрации почвы может произойти стимуляция процессов деструкции органического вещества, в результате чего значительные количества углерода попадут из тундровых экосистем в атмосферу. Это, в свою очередь, может привести к еще большему потеплению. Приведенные рассуждения составляют сущность гипотезы о положительной обратной

связи между глобальным потеплением и изменением характера углеродного баланса тундровых экосистем, сформулированной в начале 80-х годов [13].

Широкомасштабные исследования, проведенные в арктических районах Аляски (США), показали, что потепление и уменьшение влажности уже сейчас стали причиной трансформации баланса тундр данного региона, они становятся источником углерода [17—19]. С помощью экспедиционных исследований [17] углеродных потоков на Аляске в 1990—1992 гг. установлено, что поток углерода в атмосферу составляет $156 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в кочкарной тундре и $34 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ во влажной осоковой тундре [17]. В начале же 70-х годов влажная осоковая тундра функционировала как сток углерода и поглощала $25 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ [14]. Столь серьезное изменение характера углеродного баланса тундр Аляски связывается в первую очередь с увеличением на $2\text{—}4^\circ\text{С}$ температуры теплого сезона [17, 18].

Гипотеза о положительной обратной связи между потеплением и изменением углеродного баланса тундр стимулировала исследования углеродного баланса тундр различных регионов. В теплый период 1993—1994 гг. нами были проведены полевые исследования потоков углекислого газа в различных типах тундр полуострова Таймыр [5]. В основном исследованные типы тундр выступали как сток углерода. Системный анализ полученных данных позволил сделать вывод, что в 1994 г. ландшафт типичных тундр Таймыра поглощал около $4 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, т. е. представлял собой слабый сток углерода [6]. Последующие компьютерные эксперименты с имитационной моделью выявили положительную связь между увеличением температуры и сдвигом баланса тундр, т. е. переходом от поглощения углерода к его выделению в атмосферу. Таким образом, типы реакции тундр Таймыра и Аляски на климатические изменения были схожи, а причина современных различий в характере углеродного баланса кроется во внешних причинах, т. е. в региональных особенностях динамики климата. Рисунок 6 свидетельствует, что никаких значительных изменений средней температуры теплого сезона за последнее время на полуострове Таймыр не происходило, поэтому и тундры данного региона не превратились в источник углерода. Современное функционирование тундр в качестве стока углерода отмечалось и в других регионах российской Арктики [8, 11].

Полученные результаты анализа изменений температуры воздуха и сумм осадков с 1960 г. по настоящее время показали неоднозначность климатических изменений в зоне арктических тундр России. Выявленные тренды не имеют достаточно четких проявлений, что ни в коей мере не опровергает общую концепцию глобальных изменений климата. Проведенные в различных местах земного шара исследования часто выявляли явные примеры потепления, как, например, приведенные выше данные по исследованию тундр на Аляске. Отсутствие явного современного потепления в российской Арктике является отражением региональных особенностей климата и не снимает проблему возможной трансформации углеродного баланса тундр.

Литература

1. Антропогенные изменения климата. — Л., Гидрометеоздат, 1987, 309 с.
2. Будыко М. И. Климат конца двадцатого века. — *Метеорология и гидрология*, 1988, № 10, с. 5—23.
3. Будыко М. И., Гройсман П. Н. Ожидаемые изменения климата СССР к 2000 году. — *Метеорология и гидрология*, 1991, № 4, с. 84—93.
4. Завельская Н. А., Зукерт Н. В., Полякова Е. Ю., Пряжм.м.к.л. А. А. Прогноз динамики изменений климата на бореальные леса России. — *Лесоведение*, 1993, № 3, с. 16—24.
5. Замолодчиков Д. Г. и др. Углеродный баланс тундровых экосистем Западного Таймыра. /В сб.: Эволюционные геокриологические процессы в Арктических регионах и проблемы глобальных изменений природной среды и климата на территории криолитозоны. — Пушино, ПНЦ РАН, 1995, с. 83—84.
6. Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В., Иващенко А. И. Углеродный баланс типичных тундр Таймыра: моделирование на геоинформационной основе. — *Журн. общ. биол.*, 1997, т. 58, № 2 (в печати).
7. Кобышева Н. В., Наровлянский Г. Я. Климатическая обработка метеорологической информации. — Л., Гидрометеоздат, 1978, 295 с.
8. Назаров С. К., Сивков М. Д., Некучаева Е. В. Некоторые эколого-физиологические аспекты фотосинтеза арктических растений. /В сб.: Структурно-функциональная организация фитоценозов на Крайнем Севере. — Сыктывкар, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 1994, с. 121—136.
9. Оценки экологических и социально-экономических последствий изменения климата. — СПб, Гидрометеоздат, 1992, 250 с.
10. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии. — Л., Гидрометеоздат, 1967, 242 с.
11. Политова Н. Ю., Лукьянова Л. М. CO₂-газообмен и продуктивность сообществ горной тундры Хибин. /В кн.: Плодородие почв и продуктивность фитоценозов. — Апатиты, КНЦ АН СССР, 1991, с. 72—85.
12. Рубинштейн Е. С., Полозова Л. Г. Современные изменения климата. — Л., Гидрометеоздат, 1966, 267 с.
13. Billings W. D., Luken J. O., Mortensen D.A., and Peterson K.M. Arctic tundra: A source or sink for atmospheric carbon dioxide in a changing environment? — *Oecologia*, 1982, vol. 33, No. 1, pp. 7—11.
14. Climate Change. The IPCC Scientific Assessment Report for IPCC by Working Group I. — WMO, UNEP, 1990, 365 p.
15. Coyne P. I. and Kelley J. J. CO₂ exchange over the Alaskan Arctic tundra: Meteorological assessment by an aerodynamic method. — *J. Appl. Ecol.*, 1975, vol. 12, pp. 587—611.
16. Graham Nicolas E. Simulation of Recent Global Temperature Trends. — 1991, vol. 267, pp. 666—671.
17. Oechel W. C., Hastings S. J., Jenkins M., Riechers G., Grulke N., and Vourlitis G. Recent change in Arctic tundra ecosystems from a carbon sink to a source. — *Nature*, 1993, vol. 361, pp. 520—523.
18. Oechel W. C. and Vourlitis G. L. Effects of Global Change on Carbon Storage in Cold Soils. /In: Soils and Global Change. — London, Lewis Publishers, 1995, pp. 117—129.
19. Oechel W. C., Vourlitis G. L., Hastings, and Bochkarev S. A. Change in Arctic CO₂ flux over two decades: Effects of climate change at Barrow, Alaska. — *Ecol. Appl.*, 1995, vol. 5, No. 3, pp. 846—855.

Поступило
10 XII 1996

VARIATIONS OF AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION IN THE RUSSIAN TUNDRA

N. V. Zukert and D. G. Zamolodchikov

Trends of current variations in climatic parameters are analyzed in view of investigating the influence of climatic changes on tundra ecosystems and their consequent adjustment. The obtained trends of air temperature and precipitation total are not clearly revealed. The lack of obvious warming in the Russian Arctic reflects the regional features of climate change and does not solve the problem of possible transformation of the tundra carbon balance.