

А. Н. ГОРОХОВ*, **, А. Н. ФЁДОРОВ***, ****

*Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия, algor64@mail.ru

**Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, algor64@mail.ru

***Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, anfedorov@mpi.ysn.ru

****Международный научно-образовательный центр BEST Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия, anfedorov@mpi.ysn.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В ЯКУТИИ

Рассмотрены пространственные закономерности распределения климатических изменений на территории Якутии. Рассчитаны коэффициенты линейного тренда климатических характеристик — температуры воздуха (средних годовых, средних январских и средних июльских значений), а также среднегодового количества атмосферных осадков. Использованы данные 26 метеорологических станций Якутии за период 1966–2016 гг. Составлены карты тенденций изменения климатических характеристик по коэффициентам линейного тренда. Проведен пространственный анализ зональных (региональных) особенностей климата Якутии. За рассматриваемый период в 50 лет установлено повышение температуры воздуха. Выявлено, что годовые величины тренда температуры воздуха положительны, в среднем интервал изменения трендов равен 0,3–0,6 °С/10 лет. На большинстве метеостанций зафиксированы тренды температуры воздуха с максимумом значений в зимние месяцы и минимумом в летние. Установлено, что тренды годовых осадков имеют разную направленность значений, положительные тренды зафиксированы на более чем 70 % территории Якутии. Их максимум приходится на горно-таежные районы Южной Якутии. В тундровых ландшафтах наблюдаются отрицательные тренды осадков со значениями до –15 мм/10 лет. Полученные результаты показывают, что различные регионы Якутии по-разному реагируют на изменения климата. Тенденция увеличения средней годовой температуры в значительной мере обусловлена ростом температур зимних месяцев. Повышение температуры воздуха в Якутии может быть частью глобального потепления климата. За последние 50 лет в целом по Якутии количество атмосферных осадков возросло.

Ключевые слова: коэффициент линейного тренда, температура воздуха, атмосферные осадки, регионы Якутии, пространственный анализ, климатические характеристики.

A. N. GOROKHOV*, **, A. N. FEDOROV***, ****

*Institute of Applied Ecology of the North, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russia, algor64@mail.ru

**Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, pr. Lenina, 41, Yakutsk, 677980, Russia, algor64@mail.ru

***Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, 677010, Russia, anfedorov@mpi.ysn.ru

****International Scientific-Educational Center BEST, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russia, anfedorov@mpi.ysn.ru

CURRENT TRENDS IN CLIMATE CHANGE IN YAKUTIA

The spatial distribution patterns of climatic changes in Yakutia are considered. For 26 meteorological stations of Yakutia we calculated the linear trend coefficients of climatic characteristics: air temperature (mean annual, January and July temperatures) and the mean annual amount of atmospheric precipitation from 1966 to 2016. Maps of climate change trends were compiled from linear trend coefficients. A spatial analysis of the zonal (regional) peculiarities of the climate of Yakutia has been carried out. An increase in air temperature was established for the 50-year period under consideration. It was found that the annual values of the air temperature trend are positive and, on average, a characteristic trend change interval is 0.3 to

0.6 °C/10 years. Most of the meteorological stations recorded trends of air temperature with maximum values in winter and minimum values in summer. It was determined that the values of the trends in annual precipitation show different directions, and positive trends occur on more than 70 % of the territory of Yakutia. Their maximum corresponds to the mountain-taiga regions of Southern Yakutia. Negative trends in precipitation with values of up to -15 mm/10 years are observed in tundra landscapes. The findings show that different regions of Yakutia respond differently to climate change. The trend of an increase in mean annual temperature is largely due to the rise in temperatures during the winter months. The rise in air temperature in Yakutia may be part of global warming. Over the last 50 years there has been an increase in the amount of precipitation in Yakutia as a whole.

Keywords: linear trend coefficient, air temperature, atmospheric precipitation, regions of Yakutia, spatial analysis, climatic characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Современное изменение климата носит глобальный характер и наиболее отчетливо прослеживается с конца 1960-х гг. [1, 2]. Данные о колебаниях средней годовой температуры воздуха за последнее время, как в различных регионах России, так и на территории Республики Саха (Якутия) указывают на отчетливое и длительное изменение климата и повышение температуры [3–6].

Изменение климата в первую очередь исследовалось посредством анализа трендов изменений температуры воздуха в разные периоды. За 1947–1996 гг. С. М. Варламовым с соавт. [3] определены максимальные линейные тренды среднегодовых температур воздуха в 0,02–0,04 °C в год, а Ю. Б. Скачковым [5] за период 1965–1995 гг. отмечалось увеличение среднегодовой температуры от 0,5 до 2 °C. По данным Г. В. Малковой с соавт. [6], значения трендов среднегодовой температуры воздуха за 1965–2010 гг. составили от <0,03 до >0,06 °C в год.

Целостность структуры мерзлотных ландшафтов в их развитии зависит от изменения незначительных факторов. Причина этого — наличие подземных льдов в литогенной основе природно-территориальных комплексов (ПТК). Стабильное функционирование таких ландшафтов определяется условиями сохранения подземных льдов, а ухудшение криоэкологической обстановки связано с развитием криогенных процессов — термокарста, термоэрозии, солифлюкции, пучения и др., связанных с фазовыми переходами воды [7].

Как следствие, могут измениться не только природные условия Якутии, но и разнообразие и характер динамики ландшафтов. Изменение климата — основной фактор динамики современных ландшафтов.

Реакции многолетнемерзлых пород (ММП) и мерзлотных ландшафтов на климатические изменения посвящено большое количество работ российских и зарубежных исследователей [8–13]. Многие авторы отмечают активизацию термокарста, вызывающую деградацию вечной мерзлоты. Так, К. Уолтер с соавт. [8], А. Моргенштерн с соавт. [9], Дж. ван Хайстеден с соавт. [10] и др. с конца 1970-х до 2000-х годов выявили образование и существенное расширение молодых термокарстовых озер на едомах в зоне тундры и северной тайги, обусловленные повышением температуры грунтов вечной мерзлоты в этих районах на 1–1,5 °C [11]. Такие же изменения отмечались и в Центральной Якутии [12, 13].

В данной работе приведены результаты анализа многолетних наблюдений за климатическими характеристиками на территории Якутии. Основная цель исследования — определение пространственных закономерностей распределения климатических изменений на территории Республики с 1966 по 2016 г. Для этого нами проанализирована изменчивость температуры воздуха и количества осадков.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для учета ландшафтной дифференциации в анализе климатических характеристик на территории Якутии мы использовали мерзлотно-ландшафтную карту Якутской АССР [14].

За основные единицы приняты природные зоны (подзоны): тундра, северная тайга, средняя тайга со сплошными ММП, средняя тайга с прерывистыми и островными ММП, горная тундра и редколесья Северо-Восточной Сибири, горная тайга и редколесья Южной Якутии. Кроме того, учитывались региональные отличия природных зон. По геолого-геоморфологическим особенностям, ландшафтным условиям и промышленному освоению, а также по степени антропогенного воздействия на ландшафты Якутию можно разделить на четыре региона: Северо-Западный, Северо-Восточный, Центральный и Южный.

Таблица 1

Принадлежность метеорологических станций к регионам Якутии

Природная зона (подзона)	Регион			
	Северо-Западная Якутия	Северо-Восточная Якутия	Центральная Якутия	Южная Якутия
Тундра	Саскылах	Тикси, Котельный, Казачье, Чокурдах, Амбарчик	—	—
Северная тайга	Шелагонцы, Оленек, Джарджан	Среднеколымск, Зырянка	—	—
Средняя тайга со сплошными ММП	Мирный	—	Вилуйск, Якутск, Усть-Мая	—
Средняя тайга с прерывистыми и островными ММП	—	—	Витим, Ленск, Олёкминск, Учур	—
Горная тундра и редколесья	—	Верхоянск, Оймякон, Усть-Мома	—	—
Горная тайга и редколесья	—	—	—	Алдан, Чульман, Нагорный, Токо

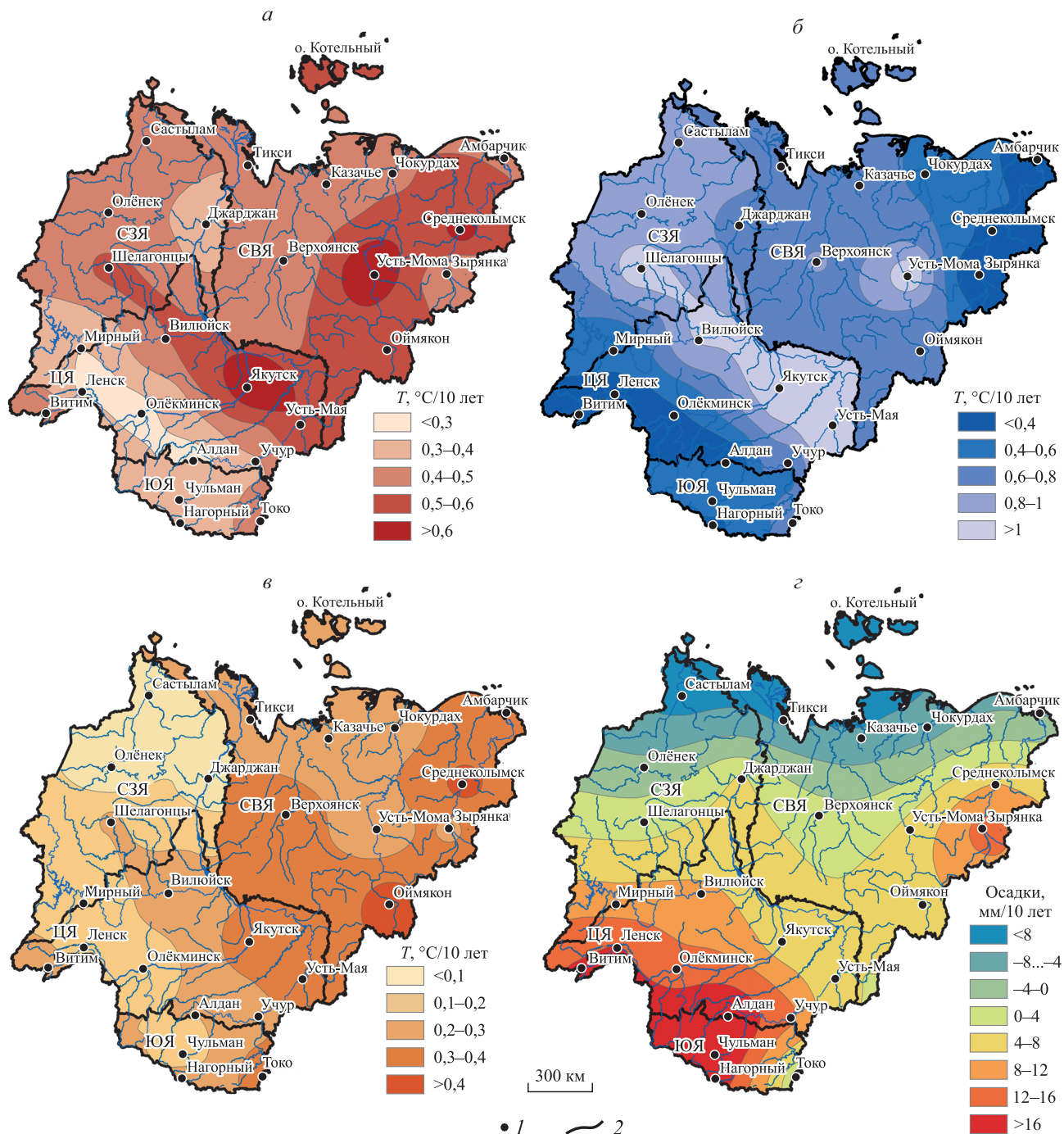
Примечание. «—» — метеорологические станции отсутствуют.

Таблица 2

Значения линейных трендов характеристик ландшафтов

Природная зона (подзона)	Метеостанция	Средняя годовая температура воздуха		Температура января		Температура июля		Годовое количество осадков	
		°C/10 лет	коэффициент детерминации	°C/10 лет	коэффициент детерминации	°C/10 лет	коэффициент детерминации	мм/10 лет	коэффициент детерминации
Тундра	Саскылах	0,48	0,24	0,99	0,09	0,07	0,01	-14,71	0,16
	Тикси	0,43	0,20	0,79	0,12	0,30	0,06	-13,80	0,06
	Котельный	0,58	0,41	0,60	0,12	0,21	0,06	-8,86	0,16
	Казачье	0,42	0,03	0,65	0,09	0,25	0,03	-10,16	0,07
	Чокурдах	0,49	0,38	0,58	0,10	0,27	0,04	-9,51	0,06
	Амбарчик	0,47	0,32	0,28	0,02	0,37	0,06	-10,11	0,05
Северная тайга	Шелагонцы	0,53	0,26	1,11	0,14	0,21	0,03	0,62	0
	Оленек	0,41	0,21	0,96	0,08	-0,01	1	-4,24	0,01
	Джарджан	0,36	0,19	0,77	0,09	0,07	0,01	14,76	0,10
	Среднеколымск	0,63	0,49	0,37	0,63	0,43	0,04	12,37	0,08
	Зырянка	0,41	0,34	0,19	0,01	0,29	0,04	22,56	0,20
Средняя тайга со сплошными ММП	Мирный	0,30	0,12	0,45	0,02	0,12	0,01	7,26	0,02
	Вилуйск	0,50	0,32	1,03	0,12	0,27	0,05	10,03	0,07
	Якутск	0,68	0,58	1,31	0,26	0,36	0,11	-0,78	0
	Усть-Мая	0,59	0,49	1,47	0,29	0,39	0,14	1,18	0
Средняя тайга с прерывистыми и островными ММП	Витим	0,46	0,23	0,26	0,01	0,27	0,07	17,88	0,13
	Ленск	0,28	0,10	0,27	0,01	0,13	0,02	21,90	0,17
	Олекминск	0,26	0,10	0,34	0,01	0,13	0,01	6,77	0,02
	Учур	0,38	0,26	0,73	0,07	0,28	0,08	22,57	0,08
Горная тундра и редколесье	Верхоянск	0,44	0,28	0,81	0,15	0,32	0,06	1,70	0
	Оймякон	0,50	0,46	0,61	0,06	0,44	0,17	4,75	0,02
	Усть-Мома	0,70	0,59	1,11	0,23	0,24	0,05	5,26	0,03
Горная тайга	Алдан	0,24	0,11	0,21	0,01	0,20	0,03	29,63	0,14
	Чульман	0,33	0,23	0,47	0,05	0,15	0,02	23,04	0,13
	Нагорный	0,32	0,13	0,37	0,04	0,25	0,09	23,93	0,09
	Токо	0,44	0,33	0,65	0,09	0,33	0,13	-13,77	0,07

Для оценки состояния ландшафтов Республики нами проанализированы динамические ряды, составленные на основе межгодовой изменчивости климатических характеристик по материалам метеостанций. Для каждого региона выбраны станции с наиболее полными рядами наблюдений (период наблюдений с 1966 по 2016 г.). Всего выбрано 26 метеорологических станций. Анализ данных и результаты климатических тенденций сделаны по матрице (табл. 1). Для Южной Якутии дополни-



Тенденции изменения климатических характеристик Якутии по коэффициентам линейного тренда за период 1966–2016 гг.

а — средняя годовая температура воздуха; б — температура воздуха в январе; в — температура воздуха в июле; г — количество атмосферных осадков. СЗЯ — Северо-Западная Якутия; СВЯ — Северо-Восточная Якутия; ЦЯ — Центральная Якутия; ЮЯ — Южная Якутия. 1 — метеорологические станции; 2 — границы регионов.

тельно проанализированы данные по метеостанции Токо, расположенной в Хабаровском крае. Привлечены архивные данные по температуре воздуха и осадкам Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации — Мирового центра данных [15].

Проблемы изменчивости климата рассматриваются нами с позиции динамики мерзлотных ландшафтов. В качестве критерия оценки приняты коэффициент линейного тренда климатических характеристик — температуры воздуха (среднее годовое значение и значения января и июля), а также количество осадков за 50 лет. Значения трендов определены с помощью программы Microsoft Excel (табл. 2). Полученные данные отражают среднюю скорость и тенденции изменений температуры воздуха и осадков и интерполированы в программе ArcGIS 10 для составления карт тенденций изменения климатических характеристик (см. рисунок). Анализ трендов необходим для понимания процессов развития мерзлотных ландшафтов и их реакции на изменения климата.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средняя годовая температура воздуха. Вся территория Якутии находится в зоне положительных трендов. Для средней годовой температуры воздуха в среднем характерен интервал изменения трендов от 0,3 до 0,6 °C/10 лет. Значительная часть территории Якутии (более 45 %) относится к районам с трендами от 0,4 до 0,5 °C/10 лет, а около 25 % — к районам с трендами от 0,5 до 0,6 °C/10 лет. Максимальные положительные тренды средней годовой температуры (>0,6 °C/10 лет) отмечены в Центральной Якутии и долинах среднего течения рек Индигирки и Колымы. На этих относительно небольших территориях (около 5 %) температура воздуха за 50-летний период повысилась более чем на 3 °C. Минимальное повышение средней годовой температуры воздуха отмечено в юго-западных районах Якутии (3,7 %) — Мирном, Ленске, Олёкминске и Алдане (<0,3 °C/10 лет) — и за рассматриваемый период составило в среднем не более 1,5 °C.

Региональный анализ трендов показал, что в Северо-Западной и Северо-Восточной Якутии преобладают значения 0,4–0,5 °C/10 лет — более 65 и 50 % территории регионов соответственно. В Центральной Якутии равномерно распределены значения от 0,3 до 0,6 °C/10 лет — по 25 %. В Южной Якутии доминируют значения 0,3–0,4 °C/10 лет — около 85 %.

Температура января. Повышение температуры за январь отмечено на всей территории Якутии. Для температуры воздуха в январе в среднем характерен интервал изменения трендов от 0,4 до 1 °C/10 лет. Районы с трендами от 0,6 до 0,8 °C/10 лет занимают площадь около 37 % территории Якутии, 0,8–1 и 0,4–0,6 °C/10 лет — 22 и 17 % соответственно. Максимум повышения (>1 °C/10 лет) зафиксирован на линии метеостанций Шелагонцы–Вилюйск–Якутск–Усть-Мая, а также на метеостанции Усть-Мома. Эти районы в целом занимают 11 % территории Якутии. Температура здесь в среднем повысилась более чем на 5 °C. На Колыме (Амбарчик, Среднеколымск, Зырянка), на юго-западе (Витим, Ленск, Олёкминск) и на юге (Алдан, Нагорный) Якутии отмечены минимальные тренды (<0,4 °C/10 лет): за рассматриваемый период повышение температура в среднем составило <2 °C.

Значения трендов температуры воздуха в январе 0,8–1 °C/10 лет в Северо-Западной Якутии и 0,6–0,8 °C/10 лет в Северо-Восточной характерны для >64 % площади регионов. В Центральной Якутии преобладают крайние значения — 33 % (>1 °C/10 лет) и 22 % (<0,4 °C/10 лет). В Южной Якутии доминируют значения 0,4–0,6 °C/10 лет — более 85 % территорий.

Температура июля. Повышение температуры воздуха за июль отмечается для большей части территории Якутии. В среднем интервал изменения трендов составляет 0,1–0,4 °C/10 лет. Районы с трендами 0,1–0,2 °C/10 лет охватывают примерно 20 % территории Республики, 0,2–0,3 и 0,3–0,4 °C/10 лет — более чем по 30 % каждый. Максимальное повышение температуры июля (>0,4 °C/10 лет) наблюдается в верхней части бассейна р. Индигирки и в среднем течении р. Колымы. В этих незначительных по площади районах (около 2 %) повышение температуры воздуха оценивается в >2 °C. На северо-западе Якутии выделяется район с минимальными положительными и отрицательными трендами (<0,1 °C/10 лет), который занимает более 10 % территории региона. Здесь повышение температуры июля за рассматриваемый период в среднем не превышает 0,5 °C.

В Северо-Западной Якутии по температуре июля преобладают значения трендов >0,1 °C/10 лет (48 % территории региона), в Северо-Восточной — 0,3–0,4 °C/10 лет (54 %), в Центральной и Южной — 0,2–0,3 °C/10 лет (42 и 50 % соответственно).

Атмосферные осадки. Изменчивость количества осадков носит разнонаправленный характер. На территории Якутии годовому количеству атмосферных осадков в среднем присущ интервал изменения трендов от –8 до 16 мм/10 лет. Большая часть территории Республики (около 73 %) относится к райо-

нам с положительными трендами, а около 27 % — с отрицательными. Максимальные положительные тренды количества осадков (>16 мм/10 лет) отмечены в юго-западных и южных районах Якутии. На этих территориях (~7 %) повышение количества осадков за 50-летний период оценивается в 80 мм. Максимальные отрицательные тренды зафиксированы в крайних северных районах (6,4 %), где за рассматриваемый период количество осадков в среднем уменьшилось на 40 мм.

В Северо-Западной Якутии преобладают значения трендов 0–4 и 4–8 мм/10 лет, по ~25 % территории региона каждый. В Северо-Восточной и Центральной Якутии доминируют тренды 4–8 мм/10 лет — примерно 30 и 35 % соответственно. Значения трендов >16 мм/10 лет преобладают в Южной Якутии (около 60 %).

Тундровые ландшафты. Изменчивость температуры воздуха в тундровой зоне носит положительный характер. За рассматриваемый период средняя годовая температура повысилась в среднем на 2,4 °С. По температуре января наблюдается уменьшение значений трендов с запада на восток, по температуре июля — увеличение. Повышение температуры в январе составило в западной части тундровой зоны почти 5 °С, в восточной — почти 3 °С, в июле — 0,3 и 1,4 °С соответственно.

Тренды годового количества осадков имеют одинаковую отрицательную направленность. Понижение количества осадков в среднем составило почти 56 мм, в западной тундре — 73, в восточной — 52 мм.

М. Н. Григорьев с соавт. [16] отмечают, что термоэрозия на сильнольדיстых берегах арктических морей Восточной Сибири активизируется с повышением температуры воздуха, и это наблюдалось как в 1930–1940-е, так и в 1980–1990-е годы. Позже им был зафиксирован пик активизации термоэрозии в 2006–2008 гг. вследствие резкого повышения температуры воздуха в Восточно-Сибирской части Арктики [17]. Согласно данным CALM [18], в тундре низовья р. Колымы за 2005–2010 гг. глубина протаивания на площадках в среднем увеличилась на 17 % по сравнению с 1996–2004 гг., что в среднем составляет 10 см (при разбросе от 3 до 23 см).

Таким образом, геокриологическая ситуация в тундровой зоне в 2000-х гг. резко обострилась по сравнению с 1988–1995 гг.

Северотаежные ландшафты. Тренды данных температуры воздуха имеют положительный характер. В северной тайге Северо-Западной Якутии средняя годовая температура воздуха в среднем повысилась на 2,2 °С, а в Северо-Восточной Якутии — на 2,6 °С. В среднем в Северо-Западной Якутии повышение температуры января составило 2,7 °С, июля — почти 0,5 °С, а в Северо-Восточной — 1,7 °С и 1,8 °С соответственно.

В Северо-Западной Якутии тренды данных по годовому количеству осадков носят разнонаправленный характер. В Северо-Восточной Якутии они положительные: увеличение количества осадков в среднем в северной тайге Северо-Западной Якутии составляет 19 мм, а в Северо-Восточной Якутии — 87 мм.

Несмотря на столь значительные изменения климатических характеристик, на температуре грунтов это сказалось слабо. Например, в 1988–1995 гг. в северной тайге средняя годовая температура грунтов оставалась в норме при относительно большом повышении температуры воздуха. Это связано с особенностями снегонакопления, когда мощность снежного покрова в начале зимы была ниже, чем средняя многолетняя. Относительно низкие температуры грунтов способствовали стабилизации глубины протаивания в этот период. В 2005–2008 гг., судя по данным метеостанций, снежный покров в Северо-Восточной Якутии (Среднеколымск и Усть-Мома), по-видимому, также был ниже нормы, и это препятствовало повышению температуры грунтов (отклонение средней годовой температуры грунтов на глубине 1,6 м составляет ~0 °С).

На территории северной тайги в среднесибирской части Якутии отклонения температуры грунтов в 2005–2008 гг. достигли максимальных значений для всего Северо-Востока Евразии — в среднем +1,1 °С. Таким образом, мерзлотные ландшафты северной тайги в опасные климатические фазы продемонстрировали как стабильность развития (1988–1995 гг.), так и наибольшую реакцию на потепление (2005–2008 гг.). Стабилизация температурного режима связана с накоплением снежного покрова в начале зимы, что очень важно для мерзлотных ландшафтов.

Среднетаежные ландшафты на сплошной мерзлоте. Анализ трендов температуры воздуха выявил их положительный характер. В целом по подзоне повышение средней годовой температуры воздуха составляет 2,3 °С, в западной части подзоны — более 1,5 °С, в Центральной Якутии — до 2,9 °С. Наблюдается увеличение значений трендов температуры января и июля с запада на восток. Температура воздуха в январе в среднем повысилась на 5,3 °С, в западной части подзоны — 2,2 °С, в центральной — 6,3 °С; в июле — на 1,4, 0,6 и 1,7 °С соответственно.

Тренды данных по среднему годовому количеству осадков имеют разнонаправленный характер. Повышение количества осадков в среднем по подзоне составляет 22 мм, в западной части — 36, а в центральной — 17 мм.

Наши наблюдения за развитием термокарста в Центральной Якутии подтверждают, что именно на последние две положительные фазы приходится активизация просадок поверхности [11, 19]. С положительной фазой 2000-х гг. связано резкое изменение геокриологических условий в ландшафтах Центральной Якутии в сочетании с обильными осадками [13]. В целом эти фазы создали критическую ситуацию на нарушенных и открытых участках, в антропогенных ландшафтах, развитых на ледовом комплексе, и обусловили формирование бугристо-полигональных форм рельефа и развитие термокарстовых озер.

Среднетаежные ландшафты на прерывистой и островной мерзлоте. Характер изменчивости температуры воздуха имеет общую тенденцию развития. В этой подзоне средняя годовая температура воздуха повысилась в среднем на 1,7 °С. По температуре января наблюдается повышение значений трендов с запада на восток. Увеличение температуры в январе составило почти 2 °С, в июле — около 1 °С.

Тренды значений по количеству осадков в подзоне имеют положительную направленность: в среднем оно выросло на >86 мм.

Отклонения температуры грунтов на глубине 1,6 м в средней тайге в 1988–1995 гг. были на уровне $-0,1 \div -0,2$ °С, а на следующей фазе она повысилась до 0,6–0,7 °С (2005–2009 гг.). Изменения глубины промерзания в основном повторяют изменения температуры грунтов; как правило, идет сокращение ее мощности.

Горно-тундровые ландшафты и редколесья Северо-Восточной Сибири. Изменчивость температуры воздуха в подзоне имеет положительный характер. За рассматриваемый период средняя годовая температура повысилась в среднем на 2,7 °С, в январе — на 4,2 °С, в июле — на 1,7 °С.

Тренды годового количества осадков имеют разнонаправленный характер. Только северная часть подзоны относится к районам с отрицательными трендами. В целом увеличение осадков в этой подзоне составляет ~19 мм.

В горно-тундровых и редколесьях также отмечается повышение температуры грунтов и увеличение глубины сезонного протаивания. Например, на сильнольдистых отложениях подножий склонов и морен хр. Сунтар-Хаята в районе горы Мус-Хаи обнаруживаются свежие термокарстовые провалы.

Горно-таежные ландшафты и редколесья Южной Якутии. Анализ трендов температуры воздуха указывает на их положительный характер. В целом по подзоне повышение средней годовой температуры воздуха составляет 1,6 °С, в январе — 2,1 °С, в июле — почти 1,2 °С.

Тренды данных по среднему годовому количеству осадков имеют разнонаправленный характер. Повышение количества осадков в среднем по подзоне равно 78 мм.

Мерзлотные ландшафты Южной Якутии также испытывают большой пресс современного потепления климата. На маревых участках Алданского плоскогорья в последние два-три десятилетия фиксируется активизация термокарста. В горных районах Южной Якутии в период 1966–2009 гг. отмечается повышение температуры грунтов с трендом 0,3–0,5 °С/10 лет [20]. Максимальные повышения температуры отмечены в подгольцовых областях.

С. М. Варламов с соавт. [3] сделали пространственный анализ современных изменений температуры в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России. В приводимой ими картосхеме территория Якутии характеризуется разными показателями трендов за период 1947–1996 гг. Согласно работе А. Н. Фёдорова и А. Н. Свинобоева [4], в которой было проведено районирование изменения климата территории Якутии во второй половине XX в., тренды за 1951–1989 гг. также разнонаправлены. Имеются районы как с положительными, так и с отрицательными трендами температуры приземного слоя. Характер распространения полученных нами трендов изменения средней годовой температуры воздуха за период 1966–2016 гг. существенно отличается от этих данных: направленность изолиний трендов сильно изменилась, а их значения в целом заметно возросли.

В работе Г. В. Малковой с соавт. [6] направленность трендов среднегодовой температуры воздуха за период 1965–2010 гг. уже положительная. Наиболее высокие тренды ($>0,06$ °С/год) температуры воздуха зафиксированы в Центральной Якутии, а наиболее низкие ($<0,03$ °С/год) сконцентрированы на Лено-Оленёкском междуречье. Здесь значения трендов изменения средней годовой температуры воздуха совпадают с показателями трендов за период 1966–2016 гг., которые в основном не выходят за пределы 0,02–0,07 °С/год. Совпадение высоких трендов потепления воздуха наблюдается только в Центральной Якутии.

За 1966–2016 гг. нами выявлены линейные тренды средней годовой температуры воздуха в Якутии, которые варьируют от 0,24–0,46 °C/10 лет в зоне островного и прерывистого распространения вечной мерзлоты до 0,41–0,68 °C/10 лет в зоне ее сплошного распространения, что коррелирует с усредненными оценками Росгидромета [21] по Средней и Восточной Сибири за 1976–2012 гг. (0,43 и 0,50 °C/10 лет соответственно).

По данным Ю. Б. Скачкова [22], атмосферные осадки за период 1966–1995 гг. в Центральной Якутии в целом за год находятся в пределах нормы, тенденции к увеличению или уменьшению не выявлены. Аналогичная ситуация характерна и для всего периода наблюдений 1966–2016 гг.

Оценивая изменения климата в Якутии за последние 50 лет, можно отметить следующие региональные (зональные) особенности.

1. В Северо-Западной Якутии доминирует область с трендом средней годовой температуры воздуха $>0,4$ °C/10 лет, который совпадает с трендом температуры воздуха в январе. Температура воздуха в июле имеет здесь самую небольшую в Якутии тенденцию к увеличению, при этом преобладают значения трендов $<0,2$ °C/10 лет. Изменение количества осадков имеет разнонаправленную тенденцию: в тундровых ландшафтах — отрицательную, в северотаежных — около нуля и в среднетаежных — положительную. В целом в этом регионе преобладают положительные значения тренда осадков (58 %).

2. Северо-Восточная Якутия характеризуется едиными значениями тренда средней годовой температуры воздуха ($>0,4$ °C/10 лет). В бассейне р. Колымы выделяется район с минимальными положительными трендами температуры воздуха в январе ($<0,4$ °C/10 лет). Максимальное повышение температуры воздуха в июле на территории Якутии ($>0,4$ °C/10 лет) наблюдается в верхней части бассейна р. Индигирки и в среднем течении р. Колымы. Понижение количества выпадаемых осадков наблюдается в тундровых ландшафтах, наибольшее повышение — в северотаежных в бассейне р. Колымы. Здесь доминируют положительные значения тренда осадков — 62 %.

3. В Центральной Якутии районы трендов средней годовой температуры воздуха во многом совпадают с таковыми для января, а в июле тренды имеют среднюю тенденцию к увеличению — 0,1–0,4 °C/10 лет. В целом температура воздуха повышается с запада на восток. Атмосферные осадки имеют тенденции к увеличению, особенно в среднетаежных ландшафтах с прерывистой и островной мерзлотой, где наблюдаются тренды >16 мм/10 лет.

4. На территории Южной Якутии тренды средней годовой температуры воздуха и температуры января также совпадают: 0,3–0,4 и 0,4–0,6 °C/10 лет соответственно. Примерно для половины территории региона характерен средний тренд температуры июля 0,2–0,3 °C/10 лет. Максимальное увеличение количества осадков на территории Якутии наблюдается в этом регионе, особенно в западных частях. Здесь доминируют значения трендов больше 16 мм/10 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различные регионы Якутии, вследствие больших площадей и многообразия ландшафтов, по-разному реагируют на изменения климата (см. рисунок). В зоне максимальных изменений среднегодовых температур (тренды 0,5–0,6 °C/10 лет и более) оказались среднетаежные ландшафты Центральной Якутии по оси Шелагонцы–Виллойск–Якутск–Усть-Мая, а также горные и равнинные ландшафты Северо-Восточной Якутии вдоль зоны Оймякон–Усть-Мома–Среднеколымск. Минимальные изменения (тренды меньше 0,3 °C/10 лет) характерны для среднетаежных ландшафтов по линии Мирный–Ленск–Олёкминск–Алдан. Максимальное количество атмосферных осадков (тренды 12–16 мм/10 лет и более) выпадает в среднетаежных ландшафтах юго-западной части Центральной Якутии и в горнотаежных ландшафтах Южной Якутии. Зона без тенденции к увеличению или уменьшению располагается в северной тайге. Максимальное снижение количества осадков (тренды -8 – -4 мм/10 лет и менее) фиксируется в тундровых ландшафтах.

Наблюдаемые в настоящее время на территории Якутии изменения климата приводят к трансформациям в структуре и функционировании мерзлотных ландшафтов. Потепление климата с повышением температуры грунтов и увеличением глубины протаивания вызывает активизацию криогенных процессов [11]. Мерзлотные ландшафты на сильнольдистых отложениях теряют свою устойчивость, а нарастающие темпы развития термокарста [23, 24] требуют принятия действенных мер по защите и охране вечной мерзлоты.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН (ИХ.127.2.3) и государственного задания Минобрнауки России (5.8169.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Предстоящие** изменения климата. Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 272 с.
2. **Будыко М. И., Ефимова Н. А., Строкина Л. А.** Эмпирические оценки изменения климата к концу XX столетия // *Метеорология и гидрология*. — 1999. — № 12. — С. 5–12.
3. **Варламов С. М., Ким Е. С., Хан Е. Н.** Современные изменения температуры в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России // *Метеорология и гидрология*. — 1998. — № 1. — С. 19–28.
4. **Фёдоров А. Н., Свинобоев А. Н.** Изменения температуры воздуха приземного слоя воздуха в Республике Саха (Якутия) // *Климат и мерзлота: комплексные исследования в Якутии*. — Якутск: Изд-во СО РАН, 2000. — С. 68–75.
5. **Скачков Ю. Б.** Тенденции современных изменений температуры воздуха в Республике Саха (Якутия) // *Вопросы географии Якутии*. Вып. 9: Исследование ландшафтов криогенных областей. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2005. — С. 27–31.
6. **Малкова Г. В., Павлов А. В., Скачков Ю. Б.** Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // *Криосфера Земли*. — 2011. — Т. 15, № 4. — С. 33–36.
7. **Фёдоров А. Н.** Влияние современных изменений климата на криоэкологическое состояние ландшафтов Центральной Якутии // *География и природ. ресурсы*. — 1996. — № 2. — С. 101–108.
8. **Walter K. M., Zimov S. A., Chanton J. P., Verbula D., Chapin III F. S.** Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // *Nature*. — 2006. — N 443. — P. 71–75.
9. **Morgenstern A., Grosse G., Gunther F., Fedorova I. V., Schirrmeister L.** Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta // *The Cryosphere*. — 2011. — N 5. — P. 849–867.
10. **Huissteden J. van, Mi Y., Gallagher A., Budishev A.** The Importance of Ecosystem Recovery for Quantification of Greenhouse Gas Fluxes from Permafrost Degradation // *1st International Conference Global Warming and the Human Nature Dimension in Siberia: Social Adaptation to the Changes of the Terrestrial Ecosystem, with an Emphasis on Water Environments*. RIHN, 7–9 March, 2012. — Kyoto, Japan: RIHN, 2012. — P. 48–50.
11. **Fedorov A. N., Ivanova R. N., Park H., Niyama T., Iijima Y.** Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia // *POLAR SCIENCE*. — 2014. — Vol. 8, Issue 2. — P. 114–128.
12. **Кравцова В. И., Быстрова А. Г.** Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // *Криосфера Земли*. — 2009. — Т. 13, № 2. — С. 16–26.
13. **Iijima Y., Fedorov A. N., Park H., Suzuki K., Yabuki H., Maximov T. S., Ohata T.** Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, Central Lena river basin, Russia // *Permafrost and Periglac. Process*. — 2010. — N 21. — P. 30–41.
14. **Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР**. М-6 1:2 500 000 / Ред. П. И. Мельников. — М.: ГУГК, 1991. — 2 л.
15. **Архив данных ВНИИГМИ—МЦД** [Электронный ресурс]. — <http://www.meteo.ru> (дата обращения 02.03.2017).
16. **Григорьев М. Н., Разумов С. О., Куницкий В. В., Спектор В. Б.** Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // *Криосфера Земли*. — 2006. — Т. 10, № 4. — С. 74–94.
17. **Григорьев М. Н.** Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2008. — 40 с.
18. **Данные CALM** [Электронный ресурс]. — <http://www.gwu.edu/~calm/data/north.html> (дата обращения 02.03.2017).
19. **Фёдоров А. Н., Константинов П. Я.** Реакция мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии на современные изменения климата и антропогенные воздействия // *География и природ. ресурсы*. — 2009. — № 2. — С. 56–62.
20. **Сериков С. И., Железняк М. Н., Гулый С. А., Скачков Ю. Б.** Мониторинговые наблюдения за динамикой температурного режима горных пород в Восточной Сибири // *Труды Десятой Междунар. конф. по мерзлотоведению*. — Тюмень: Печатник, 2012. — Т. 5. — С. 287–288.
21. **Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014 [Электронный ресурс]. — <http://climatechange.igce.ru> (дата обращения 02.03.2017).
22. **Скачков Ю. Б.** Современные изменения климата Центральной Якутии // *Климат и мерзлота: комплексные исследования в Якутии*. — Якутск: Изд-во СО РАН, 2000. — С. 55–63.
23. **Fedorov A. N., Gavriliev P. P., Konstantinov P. Y., Niyama T., Iijima Y., Iwahana G.** Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, Eastern Siberia // *Ecologyhydrology*. — 2013. — N 7. — P. 188–196.
24. **Гаврильев П. П., Угаров И. С., Ефремов П. В.** Криогенные процессы и изменение устойчивости пород ледового комплекса в Центральной Якутии при современном изменении климата и нарушении поверхности // *Наука и образование*. — 2005. — № 4 (40). — С. 84–87.

Поступила в редакцию 14 августа 2017 г.