

ДИНАМИКА СУММ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ЯКУТИИ

Тимофеев М.А.,

Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

Аннотация. Исследована динамика положительной температуры воздуха по данным 16 метеостанций, которые расположены на территории арктической зоны Якутии. Исследуемые метеостанции: Верхоянск, Среднеколымск, Джалинда, Сухана, Оленек, Депутатский, Кюсюр, Джарджан, Саскылах, Юбилейная, Усть-Чаркы, Тикси, Чокурдах, Бухта Амбарчик, Жиганск, Остров Котельный. Эти станции имеют продолжительные временные ряды без длительных пропусков в рассматриваемом периоде. Временной диапазон 1961-2020 гг. Показано наличие трендов на увеличение количества дней с положительной температурой воздуха. Отмечено увеличение сумм активных температур выше 10 °С (САТ) в современном периоде относительно базового для всех метеостанций. Наибольший прирост суммы температур наблюдается у Верхоянска, а наименьший у станции Остров Котельный. Пространственное распределение роста температуры при этом неравномерно. У шести метеостанций сумма температур начала превышать 1500 °С, при этом в базовом периоде такого не наблюдалось.

Ключевые слова: метеостанции, температура воздуха, СПТ, САТ, Арктика.

DYNAMICS OF SUM OF POSITIVE AIR TEMPERATURES IN THE ARCTIC ZONE OF YAKUTIA

Timofeev M.A.,

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

Abstract. This study analyzes the dynamics of positive air temperature data from 16 meteorological stations located in the Arctic zone of Yakutia. The stations included are: Verkhoyansk, Srednekolymsk, Dzhalinda, Sukhana, Olenek, Deputatsky, Kyusyur, Dzhjarjan, Saskylakh, Yubileynaya, Ust-Charky, Tiksi, Chokurdakh, Bukhta Ambarchik, Zhigansk, and Ostrov Kotelny. These stations provide long-term time series without significant gaps over the study period from 1961 to 2020. The results indicate a trend toward an increase in the number of days with positive air temperatures. A rise in the sum of active temperatures above 10 °C (SAT) was observed in the modern period compared to the baseline for all stations. The highest increase in temperature sums was recorded at Verkhoyansk, while the smallest was observed at Ostrov Kotelny. The spatial distribution of warming is uneven. For six meteorological stations, temperature sums began to exceed 1500 °C, a phenomenon not observed during the baseline period.

Keywords: meteorological stations, air temperature, sum of positive temperatures (SPT), sum of active temperatures (SAT), Arctic.

Введение. Арктический регион является одним из наиболее чувствительных индикаторов глобальных климатических изменений, где повышение температур происходит в два раза быстрее, чем в среднем по планете [5, 6]. Суммы положительных температур (СПТ) — интегральный показатель теплового режима, отражающий накопление тепла за период, когда среднесуточные температуры превышают 0 °С, — играют ключевую роль в формировании экосистем, динамики многолетней мерзлоты и ледового покрова. А суммы активных температур (САТ) служат важным индикатором для оценки вегетационных циклов и биологической активности экосистем [10, 11]. Потепление климата в Арктике приведет к

интенсивному продвижению клещевых инфекций, так как будут расширяться ареалы переносчиков [7, 8]. И к тому, что на территории арктической зоны Якутии смогут широко распространиться те растения, что раньше там не могли произрастать.

Изменение климата в арктической зоне Якутии является одной из наиболее динамично развивающихся и экологически значимых проблем современности. Несмотря на многочисленные исследования, посвященные температурным трендам в Арктике [3, 12], детальный анализ динамики сумм положительных температур остается недостаточно изученным, особенно в контексте региональных вариаций и их долгосрочных последствий. Несмотря на возрастающее внимание к климату Арктики, пространственно-временная динамика сумм положительных температур именно в арктической зоне Якутии, отличающейся контрастностью природных условий, остается недостаточно изученной. Существующие работы часто фокусируются на экстремальных температурах или сезонных показателях, в то время как кумулятивные тепловые ресурсы, описываемые СПТ и САТ, несут уникальную информацию о совокупном тепловом воздействии на окружающую среду.

Термический режим в арктической зоне Якутии рассматривался в работах [1, 4]. Было показано, что Арктика нагревается быстрее, по сравнению со средними широтами. Дополнительной проблемой является огромные расстояния между метеостанциями, поэтому для таких районов целесообразно использовать пространственные покрытия реанализов, что отмечено в работах [13, 14].

Материалы и методы. Статистическая обработка производилась в среде Rstudio пакеты “stats”, “dplyr” для статистической обработки и пакет “ggplot2” для построения графиков. Для оценки общих термических ресурсов использовалась сумма активных температур выше 10 °С, так как большинство растений активно растёт при превышении данного порога. Росгидрометом определены тридцатилетние климатические периоды, базовый – 1961-1990 г. и современный 1991-2020 гг. Рассчитана величина изменения САТ между этими периодами для каждой метеостанции.

Выбрано 16 метеостанций, которые расположены севернее 66°30' N, данные с которых находятся в открытом доступе [15], и имеют длительные временные ряды без пропусков. Самой северной станцией среди выборки является станция остров Котельный (76°00' N, 137°52' E), а возле границы Полярного круга расположена станция Жиганск (66°47' N, 123°22' E). Самой западной точкой является метеостанция Оленек (68°31' N, 112°29' E), а самой восточной Бухта Амбарчик 69°37' N, 162°18' E).

Для того, сравнить динамику СПТ с данными до 1961 г., в данной работе использованы данные метеостанций Верхоянск и Жиганск, предоставленные Агроклиматическим справочником ЯАССР [9] за исторический период до 1961 г. Рассчитывалась СПТ и САТ нарастающим итогом на последний день каждой декады с мая по сентябрь. Для выявления трендов использовались методы сравнительного и статистического анализа.

Результаты и обсуждение. По данным среднесуточных температур построен график количества дней с положительной температурой за период с 1961-го по 2020-й (Рис. 1). Такое графическое представление позволяет наглядно продемонстрировать, что количество теплых дней увеличивается для всех рассмотренных станций.

Только на одной метеостанции 21432 – Остров Котельный, СПТ за весь период наблюдений не превышала 500 °С, но при этом на ней всё равно заметен тренд на увеличение количества теплых дней. Так в базовом периоде СПТ превысила 100, только один раз в 1971 г, а в современном периоде число таких лет больше десяти.

Три метеостанции выдают СПТ выше 1500 как в базовом, так и в современном периоде. Это 24266 – Верхоянск, 24343 – Жиганск, 24371 – Усть-Чаркы.

У шести метеостанций 21908 – Джалинда, 21921 – Кюсюр, 24125 – Оленек, 24136 – Сухана, 24143 – Джарджан, 25206 – Среднеколымск ярко показано, что в последние годы

сумма температур начала превышать 1500, при этом в базовом периоде такие суммы не достигались.

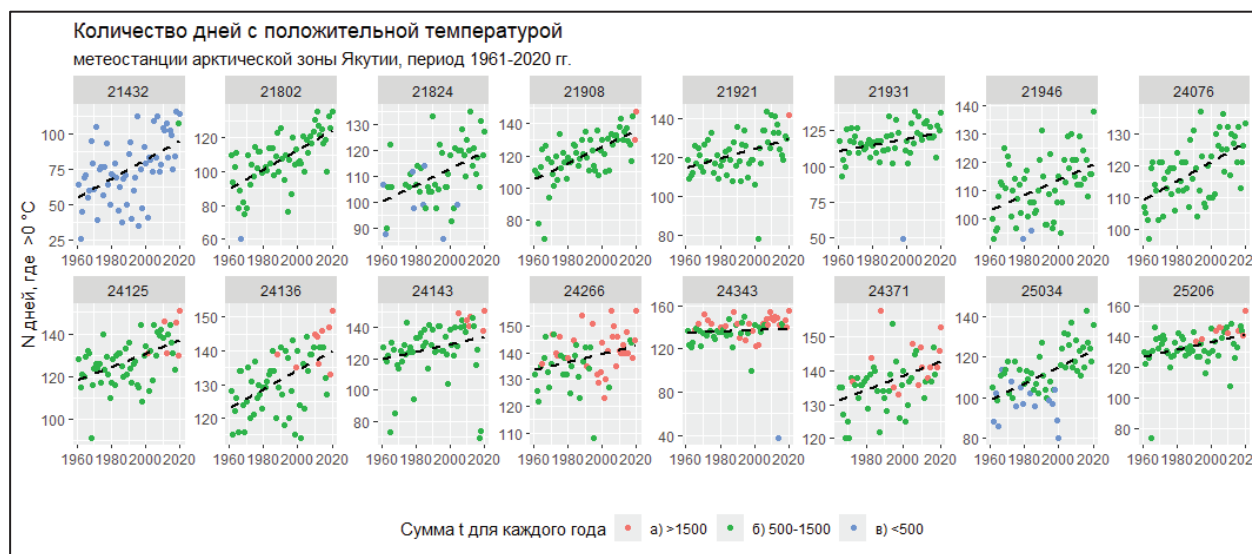


Рис. 1. Количество дней с температурой выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цвет точек характеризует СПТ по градациям. Черной пунктирной обозначена линия тренда.

За 60-летний период наблюдается устойчивая тенденция к увеличению продолжительности периода с положительными температурами. Период интенсивного роста особенно выражен в последнее двадцатилетие (2001–2020 гг.), но тренд на увеличение начался гораздо раньше. В базовом периоде у метеостанции 21432 Остров Котельный среднее количество дней с положительной температурой составляло 66, а в современном 84. Это дает величину линейного роста порядка 0,3 дней в год. Это наибольшее значение из рассмотренных станций. Аналогичный высокий рост отмечен и для метеостанций 21802 – Саскылах и 21908 – Джалинда, у которых величина роста держится на уровне 0,2 дней в год за 60 лет. При этом у других станций значения величины тренда ниже. Наиболее убедительным свидетельством климатических изменений служит поведение станций, расположенных в континентальных районах Якутии. Например, на станции 24125 – Оленек, где базовый период демонстрировал СПТ в диапазоне $1000\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, в современный период значения стабильно превышают $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в отдельные годы приближаются к $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, даже если абсолютные значения СПТ остаются сравнительно низкими на арктических островах, как на Котельном, устойчивый рост продолжительности теплого сезона повсеместно указывает на глубокую перестройку термического режима всего региона, последствия которой носят комплексный и необратимый характер.

В климатическом справочнике [9] параметры рассчитывались для временных рядов до 1961 г., при этом представлена информация о средних суточных положительных температурах нарастающим итогом (Табл. 1) рассчитана только у двух арктических метеостанций – Верхоянск и Жиганск. Поэтому расчеты сумм производились только для этих двух станций, чтобы можно было сравнить с историческими данными. По обеим станциям наблюдается устойчивый рост СПТ от исторического периода к современному.

Для Верхоянска абсолютный прирост за весь период наблюдений составил $164\text{ }^{\circ}\text{C}$, и $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ для Жиганска. Важно отметить смещение сроков накопления тепла. В Верхоянске к 20 мая величина СПТ в современный период ($46\text{ }^{\circ}\text{C}$) более чем в 2.5 раза превышает значение исторического периода ($17\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это свидетельствует о более раннем начале и интенсивном прогреве в весенний период. Рост САТ выражен ещё более значительно, чем СПТ. К 31 августа величина САТ у Верхоянска возросла с $817\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ист. пер.) до $835\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1961–1990) и до $967\text{ }^{\circ}\text{C}$

(1991–2020). Максимальные значения в современном периоде (1261 °С на 31 августа) не только значительно выше, но и фиксируются позднее, что указывает на продление периода активной вегетации. Для станции Жиганск наблюдается аналогичная, но менее выраженная тенденция: рост с 1078 °С (ист. пер.) до 1134 °С (1961–1990) и до 1238 °С (1991–2020) на ту же дату (31 августа). Появление значимых величин САТ уже во второй декаде мая в Верхоянске (32 °С для периода 1991–2020 против отсутствия значений в более ранние периоды) является ключевым индикатором смещения фенологических дат на более ранние сроки.

Таблица 1

Суммы положительных средних суточных температур воздуха выше 0, 10 °С нарастающим итогом на последний день декады. Сведения за исторический период до 1961 г. составлены по данным агроклиматического справочника [9]

Период	Май		Июнь			Июль			Август			Сентябрь			
	20	31	10	20	30	10	20	31	10	20	31	10	20	30	
Верхоянск															
Σt_0	Ист.	17	90	196	326	472	627	783	946	1079	1188	1284	1346	1373	1374
	1961-90	31	105	214	346	494	658	810	967	1101	1210	1303	1358	1383	1384
	1991-20	46	138	257	399	559	725	898	1074	1223	1347	1449	1512	1535	1538
Σt_{10}	Ист.	-	-	67	197	343	498	654	817	950	1059	-	-	-	-
	1961-90	-	-	82	215	363	526	678	835	970	1059	1069	-	-	-
	1991-20	-	32	151	293	453	619	792	967	1117	1240	1261	-	-	-
Жиганск															
Σt_0	Ист.	5	68	162	285	431	592	755	931	1073	1189	1287	1351	1390	1405
	1961-90	13	62	156	276	417	576	738	911	1058	1175	1281	1350	1384	1389
	1991-20	23	90	197	331	488	652	826	1001	1149	1275	1386	1457	1498	1508
Σt_{10}	Ист.	-	-	31	154	300	461	624	800	942	1058	1078	-	-	-
	1961-90	-	-	63	183	324	483	645	817	965	1082	1134	-	-	-
	1991-20	-	-	97	231	389	553	727	901	1049	1176	1238	-	-	-

Наиболее значительный прирост тепла (Рис. 2) наблюдается в континентальных районах, удаленных от смягчающего влияния Северного Ледовитого океана. Верхоянск – континентальная часть арктической зоны Якутии. Среднеколымск - восточный сектор. Сухана - западный сектор. Это согласуется с физикой климатических процессов: прогрев суши происходит интенсивнее, чем прогрев океана. Наименьшие изменения зафиксированы в прибрежных и островных районах. О. Котельный - островная Арктика. Тикси - побережье моря Лаптевых. Бухта Амбарчик - побережье Восточно-Сибирского моря. Адвекция холодных воздушных масс с еще не полностью свободной от льда акватории Арктики оказывает сдерживающее влияние на рост летних температур.

По оси абсцисс показана величина изменения САТ, при этом на всех рассмотренных метеостанциях величина изменения строго положительная. Это однозначно свидетельствует о значительном потеплении климата в регионе, что полностью согласуется с мировыми тенденциями усиления глобального потепления в Арктике. Наибольший рост отображен для метеостанции Верхоянск, при этом в базовом периоде, сумма была выше 1500. Наименьший рост наблюдается у метеостанции Остров Котельный, у которой так же отмечена наименьшая сумма активных температур.

В целом наблюдается тенденция: чем выше были САТ в базовом периоде, тем значительнее абсолютный прирост тепла в современном периоде. Это указывает на нелинейный характер потепления — более теплые районы разогреваются быстрее, что может

вести к увеличению контрастов внутри региона. Рост САТ напрямую свидетельствует о продлении периода биологической активности. Создаются условия для продвижения древесной растительности на север и смещению границ природных зон [1, 2].

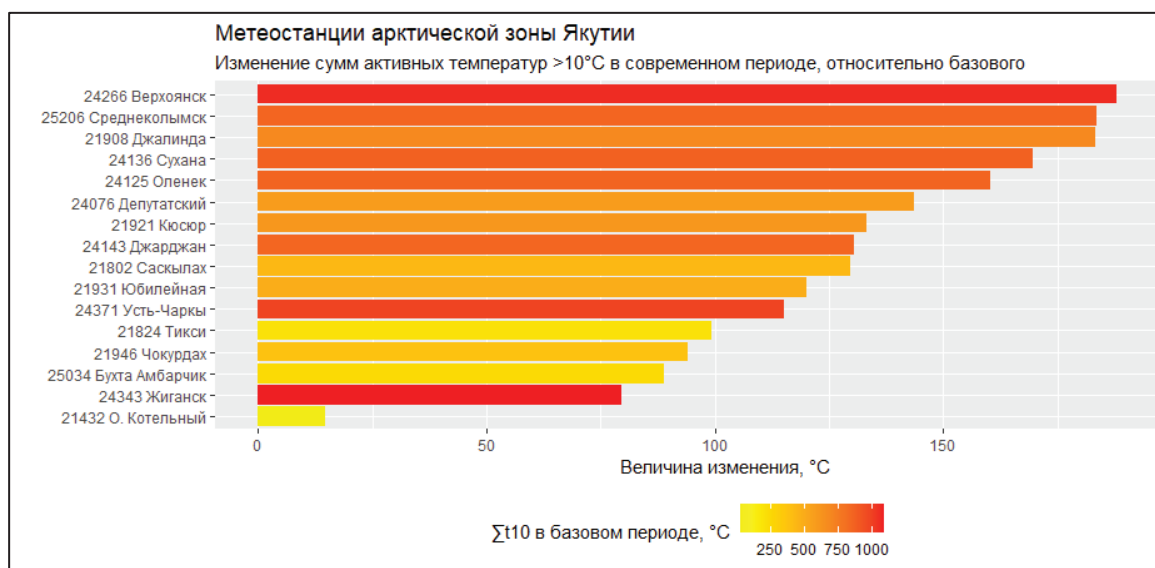


Рис. 2. Изменение САТ в современном (1991-2020 гг.) периоде, относительно базового (1961-1990 гг.). Цвет заливки показывает сумму активных температур, что была отмечена в базовом периоде.

Заключение

В арктических районах Якутии число дней с положительной температурой неуклонно увеличивается на всех рассмотренных метеостанциях. При этом чем выше была величина САТ в базовом периоде, то тем и больше потепление. Проведенный анализ выявил наличие тренда на рост СПТ и САТ. Установлено, что современный период характеризуется наиболее интенсивным увеличением термических ресурсов. Показана пространственная неоднородность потепления в Арктике. Наблюдаемые в последние десятилетия резкие межгодовые скачки суммы положительных температур свидетельствуют о дестабилизации климатической системы региона. Эти скачки, приводящие к регулярному превышению исторических пороговых значений, стали новой климатической нормой. Данная динамика указывает на фундаментальный и ускоряющийся сдвиг в термическом режиме, ведущий к глубоким изменениям в природной среде.

Полученные результаты согласуются с глобальными тенденциями изменения климата и подчеркивают необходимость разработки адаптационных мер для социально-экономического развития арктических районов Якутии.

Литература

1. Белоновская Е.А., Тишков А.А., Вайсфельд М.А. и др. "Позеленение" Российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2016. – № 3. – С. 28-39. DOI 10.15356/0373 2444 2016 3 28 39.
2. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Мониторинг растительного покрова арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // Наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 58-62.

3. *Васильев М.С., Николашкин С.В., Каримов Р.Р.* Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – Т. 11. – № 5. – С. 82-88.
4. *Васильев М.С., Петрова А.Н.* Температурный режим холодного периода в Арктической зоне Якутии за 1960–2022 гг // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2024. – Т. 29. – № 1. – С. 60–68. DOI 10.31242/2618-9712-2024-29-1-60-68.
5. *Данилов Ю.Г.* Изменение климата в Арктике на примере Якутии // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2021. – № 1(3). – С. 34-48.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.; 2022:104. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf> (дата обращения: 01.08.2025).
7. *Игнатьева М.Е., Самойлова И.Ю., Будацыренова Л.В., Григорьева В.И.* Клещевой вирусный энцефалит в Республике Саха (Якутия) // Здоровье основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2022. – Т. 17. – № 2. – С. 817-830.
8. *Малхазова С.М., Миронова В.А., Башмакова И.Х.* Природноочаговые болезни в Арктике в условиях меняющегося климата // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2022. – № 1. – С. 43-57.
9. Мозалевская А.К. Агроклиматический справочник по Якутской АССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 146 с.
10. *Носкова Е.В., Вахнина И.Л., Рахманова Н.В.* Суммы активных температур воздуха (выше 10° С) на территории Забайкальского края // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 11. – С. 148-153.
11. *Попова Е.Н., Попов И.О., Семенов С.М.* Оценка изменения годовой суммы активных температур и количества осадков за вегетационный период для территории России и соседних стран // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 6. – С. 98-105.
12. *Спорышев П.В., Катцов В.М., Гулев С.К.* Изменения приземной температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 479. – № 5. – С. 569-573. DOI 10.7868/S0869565218110208.
13. *Тананаев Н.И.* Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2023. – № 2(30). – С. 88-101. DOI 10.25587/SVFU.2023.30.2.008.
14. *Тананаев Н.И., Тимофеев М.А.* Оценка точности реанализа GHCN CAMS в расчетах внутригодового распределения температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2023. – № 4(32). – С. 99-110. DOI 10.25587/2587-8751-2023-4-99-110.
15. ФГБУ «ВНИИГМИ МЦД». Специализированные массивы данных для климатических исследований [Электронный ресурс]. URL:<http://aisori-m.meteo.ru/> (дата обращения: 01.05.2025).