

УДК 551.524.7; 551.583.16; 551.589

Поля температуры в нижней тропосфере над Кавказом

В.В. Севастьянов^{✉1}, В.Г. Маргарян^{2*}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Россия

²Ереванский государственный университет
0025, г. Ереван, ул. Алека Манукяна, 1, Республика Армения

Поступила в редакцию 23.04.2024;
после доработки 03.06.2024;
принята к печати 21.06.2024

Климат горных территорий изучен значительно меньше, чем равнинных. Предложенная нами модель распределения характеристик поля температуры нижней тропосферы над Кавказом позволяет оценить тепловые ресурсы горных территорий. На основе данных температурного зондирования на шести аэрологических станциях на высотах 1500, 3000 и 5000 м методами регрессионного и статистического анализа построены поля температуры и ее вертикальное распределение. Приводятся среднемесячные многолетние характеристики полей температуры в нижней тропосфере. Исследовано влияние орографических условий на формирование температурного режима. Использование аэроклиматических показателей температуры воздуха позволяет косвенным способом с помощью станций-аналогов оценивать тепловые ресурсы для более рационального их использования в хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: Кавказ, аэроклиматология, приземная температура, тропосфера, орография; Caucasus, Armenia, aeroclimatology, surface temperature, troposphere, orography.

Введение

Горные районы играют значительную роль в хозяйственной деятельности человека, хотя их освоение началось сравнительно недавно. Здесь добывают полезные ископаемые, быстрыми темпами развиваются сельское хозяйство, индустрия отдыха, спорта. Важным является и тот факт, что они остаются регионами с наименьшими нарушениями экологии. Это делает их более привлекательными для туризма. С целью дальнейшего освоения [1] необходимы исследования и учет их климатических ресурсов.

Горный климат отличается от равнинного, так как при его формировании горизонтальная и вертикальная зональности накладываются друг на друга. При изучении климата в горных странах следует исходить из высотной зоны их расположения, так как от этого зависят геофизические и общегеографические условия формирования климатических особенностей. На формирования режима погоды в горах влияет не только абсолютная высота, но и особенности рельефа, в частности экспозиция склонов, их крутизна. Направление общего простирания горных хребтов обуславливает значительные контрасты климата на отдельных их участках.

По изменчивости погоды и климата в горах принято различать следующие основные типы рельефа: открытые склоны и водоразделы, широкие долины, замкнутые котловины и горные плато. На открытых склонах и водораздельных участках происходит свободный воздухообмен с окружающей атмосферой; различия между приземными и расчетными данными по аэроклиматическим наблюдениям минимальны. В широких долинах и горных котловинах в зависимости от степени котловинности могут формироваться застойные явления воздуха и температурные инверсии, особенно характерные для зимнего периода.

В условиях пространственно-временной изменчивости климата в горах Кавказа требуется увеличение количества метеорологических станций. Обычно такие станции располагаются вблизи населенных пунктов в легко доступных для транспорта местах, но в силу экономических проблем их количество сокращается. Ситуация осложняется еще и тем, что получение данных о климате в горах по результатам измерений наземных станций затруднено в связи с влиянием орографических условий, большим перепадом высот. Значительная часть горной страны оказывается неосвещенной в климатическом отношении.

На температуру в условиях свободной атмосферы не влияют орографические или другие мезо- и микроклиматические факторы. Температура определяется фоновыми климатическими условиями, формирующимися под воздействием солнечной ра-

* Владимир Вениаминович Севастьянов (vvs187@mail.ru); Вардуи Гургеновна Маргарян (vmargaryan@ysu.am).

диации, циркуляции атмосферы и влагооборота. Данные сети аэрологических станций, окружающих горную страну, позволяют построить трехмерную модель распределения поля температуры в тропосфере. Сравнение расчетных значений температуры в условиях свободной атмосферы с данными наземной сети станций позволяет выявить мезо- и микроклиматические особенности расположения станций, обусловленные влиянием разных форм рельефа и др.

В тех горных местностях, где не было метеорологических наблюдений, представляется возможность использовать расчетные данные, а также поправки по станции-аналогу на влияние орографии, наличие водоемов, фенов и других местных особенностей. Аэроклиматические показатели позволяют оценивать тепловые ресурсы с достаточной точностью для практических целей. В частности, по среднемесячным температурам приземного воздуха определяют многие тепловые агроклиматические показатели. Характеристики теплового режима используются при расчетах интенсивности таяния снежного покрова в горах и абляции ледников.

Цель настоящего исследования — оценка пространственно-временной изменчивости среднемесячных температур на разных высотах в нижней тропосфере над горами Кавказа.

Материалы и методы

Исходными данными по температурному режиму приземного воздуха на Кавказе и, в частности, в Армении являются результаты исследований целого ряда авторов [2–5]. Изучению пространственной и временной изменчивости температуры воздуха на Кавказе посвящены работы [6–9]. Оценке современного изменения климата в Армении уделено большое внимание, в том числе в регионах, расположенных в непосредственной близости от оз. Севан в статьях [10, 11]. В [12] исследовался температурный режим в свободной атмосфере над Кавказом.

Данными для построения моделей температуры воздуха в тропосфере послужили сведения из Нового аэроклиматического справочника [13] и аэрологических ежемесячников. В этих справочниках приведены среднемесячные значения температуры воздуха на стандартных изобарических поверхностях и стандартных высотах. От изданных ранее [14, 15] они отличаются большим числом станций и характеризуются более высокой степенью однородности данных.

Для характеристики приземной температуры в Республике Армения использовался справочник [16], в котором содержится информация более чем по 90 станциям. Климатический период от начала регулярных наблюдений до 1960 г. отличается относительной устойчивостью.

Самая высокогорная метеорологическая станция Арагац расположена на высоте 3223 м. Обычно метеостанции располагаются на меньших высотах, главным образом в обжитых местах в долинах рек.

Для анализа температурных условий в тропосфере и построения полей температуры над горными районами Кавказа использовались данные аэрологических станций, ближайших к исследуемой территории и расположенных с разных ее сторон: Баку, Ереван, Минеральные воды, Сухуми, Тбилиси, Туапсе (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
Аэрологические станции Кавказа

Станция	Синоптический индекс	Широта, град	Долгота, град	Высота н.у.м., м
Баку	37850	40,4	49,8	5
Ереван	37789	40,1	44,5	907
Минеральные воды	37054	44,2	43,1	314
Сухуми	37260	42,9	41,1	13
Тбилиси	37549	41,7	45,0	472
Туапсе	37018	44,1	39,1	41

По аэроклиматическим показателям [13] перечисленных выше станций были рассчитаны поля многолетних среднемесячных температур воздуха на высотах 1500, 3000, 5000 м н.у.м. Верхний уровень выбирался таким образом, чтобы он находился на максимальных высотах в горах и был ближайшим к стандартной изобарической поверхности (500 гПа). На каждой станции температура воздуха на выбранных высотах определялась с помощью линейной интерполяции между соседними изобарическими уровнями.

Поля температуры на заданной высоте задавались методом полиномиальной аппроксимации (множественного уравнения регрессии), который основан на описании участка поля температуры в окрестностях точки полиномом первого порядка

$$T(x, y) = A_0 + A_1x + A_2y, \quad (1)$$

где x и y — декартовы координаты локальной системы, ось x направлена на восток, а ось y — на север, координаты задаются в сотнях километров; A_0 , A_1 , A_2 — весовые коэффициенты. Для их вычисления применялся метод наименьших квадратов, изложенный во многих работах (например, [17–19]).

Локальная прямоугольная система координат выбрана следующим образом. Начало координат расположено в точке пересечения параллели 42° с.ш. и меридиана 42° в.д. Координаты x и y в пределах изучаемой территории определяются по формулам

$$x = a \cos \bar{\varphi} (\lambda - \lambda_0); y = a(\varphi - \varphi_0), \quad (2)$$

где φ и λ — широта и долгота места расположения станции, град; φ_0 и λ_0 — координаты начала локальной прямоугольной системы координат, град; $\bar{\varphi}$ — средняя широта исследуемого района, град; $a = 111,2$ км/град — средняя длина одного градуса дуги меридиана.

Формулы (2) хотя и являются приближенными, но для умеренных широт дают хорошие результаты для площадей, поперечник которых не превышает

2000–3000 км [20]. Применение полинома более высокого порядка или оптимальной интерполяции над горной территорией существенно не повышает точности расчетов, так как число аэрологических станций относительно невелико. Тем не менее плотность сети станций в этом регионе обеспечивает достаточную для практических целей точность интерполяции с помощью полинома первого порядка.

Результаты и обсуждение

Аналитическое представление осредненных полей среднемесячных температур воздуха в виде полинома (1) позволяет оценить горизонтальное распределение температуры на разных высотах (табл. 2). Физический смысл весовых коэффициентов заключается в следующем:

1) A_0 характеризует температуру воздуха на определенном высотном уровне в начале координат ($x = 0, y = 0$);

2) A_1 показывает изменение температуры на 100 км с запада на восток, знак «минус» означает понижение температуры с запада на восток;

3) A_2 отражает вариации температуры воздуха на 100 км с юга на север, знак «минус» соответствует понижению температуры с увеличением широты местности.

Таким образом, коэффициенты A_1 и A_2 являются горизонтальными градиентами температуры воздуха.

Для оценки значимости коэффициентов, характеризующих распределение температуры в тропосфере, проверялась нуль-гипотеза H_0 , т.е. отличие статистически значимых оценок коэффициентов регрессии от нуля [19]. Границу значимости устанавливают на основе распределения Стьюдента

$$t = |A_i|/S_{A_i} \geq t_{(n-2;p)}^{\text{табл}}, \quad (3)$$

где A_i — выборочная оценка коэффициента регрессии; S_{A_i} — погрешность коэффициента регрессии; $t_{(n-2;p)}^{\text{табл}}$ — табличное значение критерия Стьюдента при заданном уровне значимости и степени свободы.

Погрешность коэффициента регрессии определяется по формуле

$$S_{A_i} = \sqrt{S_{A_i}^2 \cdot C_{ii}}, \quad (4)$$

где C_{ii} — диагональный элемент матрицы, обратной матрице нормальных уравнений. Вычисленное значение t сравнивают с $t_{\text{табл}}$ при определенной степени свободы. Если условие (3) соблюдается, то можно сделать вывод, что коэффициенты регрессии A_0, A_1, A_2 значимо отличаются от нуля.

Для проверки адекватности описания распределения температуры с помощью уравнений регрессии использовался F -критерий Фишера

$$F = \bar{S}_T^2 / \bar{S}_{\text{ост}}^2, \quad (5)$$

где $\bar{S}_T^2$ — общая дисперсия исследуемого метеорологического элемента; $\bar{S}_{\text{ост}}^2$ — остаточная дисперсия [18, 19]. Для адекватного описания результатов

Таблица 2

Весовые коэффициенты для расчета среднемесячных температур в тропосфере над Кавказом по аэроклиматическим данным

Месяц	Коэффициент	Высота абсолютная, м		
		1500	3000	5000
Январь	A_0	–2,40	–10,00	–22,40
	A_1	0,16	0,30	0,06
	A_2	0,25	–0,09	–0,23
Февраль	A_0	–1,30	–9,20	–22,20
	A_1	–0,11	–0,05	–0,07
	A_2	–0,90	–0,05	–0,32
Март	A_0	1,00	–7,50	–20,10
	A_1	–0,35	–0,30	–0,09
	A_2	–1,47	–0,13	–0,29
Апрель	A_0	6,70	–3,20	–16,30
	A_1	–0,44	–0,13	–0,10
	A_2	–1,02	–0,19	–0,20
Май	A_0	11,80	1,40	–11,80
	A_1	–0,21	–0,15	–0,19
	A_2	–1,04	–0,37	–0,29
Июнь	A_0	15,00	5,00	–8,40
	A_1	–0,29	–0,79	–0,21
	A_2	–1,21	–0,99	–0,47
Июль	A_0	17,80	8,20	–3,70
	A_1	–0,34	–0,21	–0,79
	A_2	–1,46	–1,05	–0,72
Август	A_0	17,80	8,20	–4,50
	A_1	–0,45	–0,10	–0,33
	A_2	–1,64	–1,10	–0,79
Сентябрь	A_0	14,00	4,50	–8,40
	A_1	–0,69	–0,43	–0,03
	A_2	–1,67	–0,81	–0,51
Октябрь	A_0	9,00	–0,30	–12,70
	A_1	–0,51	–0,23	–0,03
	A_2	–1,14	–0,39	–0,44
Ноябрь	A_0	5,50	–3,30	–15,80
	A_1	–0,21	–0,14	–0,03
	A_2	–0,37	–0,15	–0,30
Декабрь	A_0	1,20	–7,00	–19,50
	A_1	0,15	–0,39	–0,30
	A_2	0,24	–0,23	–0,27

аэроклиматических наблюдений полиномами полей температуры воздуха необходимо, чтобы при заданном уровне значимости (обычно 5%) расчетное значение F было больше $F_{\text{табл}}$. В противном случае выбранный полином (или модель) не будет полностью отражать поле распределения среднемесячных температур в тропосфере.

Температурный режим в условиях свободной атмосферы формируется под влиянием основных климатообразующих процессов: лучистой энергии солнца, циркуляции атмосферы и влагооборота. Аэроклиматические показатели характеризуют фоновое поле температуры в тропосфере без учета влияния орографических условий и других местных его особенностей.

В западной части Закавказья температура у поверхности земли выше, чем в других районах, из-за влияния Черного моря и физико-географических условий. Наиболее различаются температуры воздуха на ст. Сухуми и Ереван [12]; по мере

увеличения высоты до 1,5–2 км различия уменьшаются. При этом следует принять во внимание высоту расположения пунктов над уровнем моря. Сухуми расположена на высоте, близкой к уровню моря, в то время как ст. Ереван находится на высоте 910 м.

В табл. 3 приведены средние вертикальные градиенты температуры в нижней тропосфере за все месяцы.

Таблица 3

Средние вертикальные градиенты температуры воздуха, °C/100 м, в тропосфере над Кавказом

Месяц	Слой атмосферы, м		
	910–1500	1500–3000	3000–5000
Январь	–0,03	0,51	0,62
Февраль	0,03	0,53	0,65
Март	0,15	0,57	0,63
Апрель	0,59	0,66	0,66
Май	0,38	0,69	0,66
Июнь	0,46	0,67	0,67
Июль	0,51	0,64	0,60
Август	0,59	0,64	0,64
Сентябрь	0,64	0,63	0,65
Октябрь	0,72	0,62	0,62
Ноябрь	0,08	0,59	0,63
Декабрь	–0,33	0,55	0,63

Вертикальные градиенты температуры с апреля по октябрь над Ереваном устойчивы и изменяются в пределах от 0,4 до 0,7 °C/100 м. В зимний период температура над Ереваном до 1500 м слабо изменяется с высотой. Формируется изотермия. Только в декабре в нижней тропосфере формируется слабое инверсионное состояние.

В слое атмосферы 1500–3000 м вертикальный градиент температуры слабо изменяется, в течение всего года от 0,5 до 0,7 °C/100 м; в слое 3000–5000 м – от 0,6 до 0,7 °C/100 м. Сходные значения вертикальных градиентов температуры были отмечены в прошлые периоды радиозондирования [12]. Важным фактором, способствующим применению моделей полей температуры, является относительно малая изменчивость температурного режима в свободной атмосфере по сравнению с приземным воздухом в различные климатические периоды [21].

Распределение многолетних среднемесячных температур воздуха над ст. Ереван и в свободной атмосфере над ним приведено на рис. 1. Следует отметить, что с высотой уменьшается амплитуда годового хода температуры. На ст. Ереван она составляет почти 31 °C, на высоте 1500 м $T = 20$ °C, а на высотах 3000–5000 м – 18 °C.

Годовой ход пространственного распределения температуры воздуха в горизонтальном направлении с запада на восток на разных высотах представлен на рис. 2. Большую часть года температура воздуха в направлении с запада на восток на всех выбранных высотах имеет тенденцию к понижению. Наибольшее понижение температуры в направлении на восток (коэффициент A_1) отмечается на высоте 1500 м. С увеличением высоты в тропосфере градиент A_1 уменьшается. Это объясняется значительным влиянием высоких Кавказских гор. На высотах 3000–5000 м отопляющий эффект горных массивов летом и охлаждающий эффект зимой уменьшается: большую часть года коэффициент A_1 изменяется в небольших пределах от 0 до 0,8 °C/100 км. В зимние месяцы изменения температуры в нижней тропосфере на разных высотах практически не наблюдаются. В целом за год проявляется отопляющий эффект Черного, Средиземного морей и Атлантики на горную систему Кавказа.

Годовой ход градиентов температуры в свободной атмосфере в меридиональном направлении над Кавказом приведен на рис. 3.

Во все месяцы на разных высотах над Кавказом отчетливо прослеживается понижение температуры воздуха в свободной атмосфере с юга на север. Только в декабре и январе на высотах до 1500 м к более северным широтам температура повышается. В пограничном слое атмосферы в этот период формируется слабая инверсия температуры, так как горные территории подвержены более интенсивному выхолаживанию по сравнению с равнинными. Максимальные горизонтальные градиенты температуры воздуха на высоте 1500 м могут достигать 1,5 °C/100 км, а по мере увеличения высоты в тропосфере имеют тенденции к уменьшению.

Приведенные пространственно-временные модели полей среднемесячных температур имеют

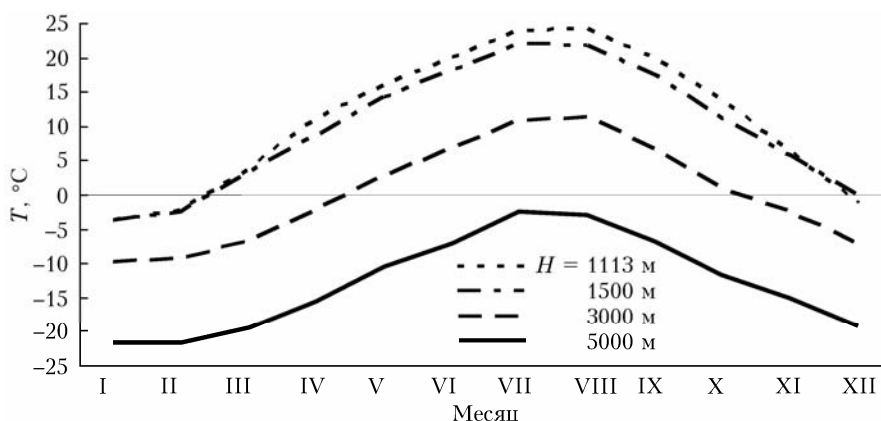


Рис. 1. Годовой ход температуры приземного воздуха над Ереваном и в свободной атмосфере

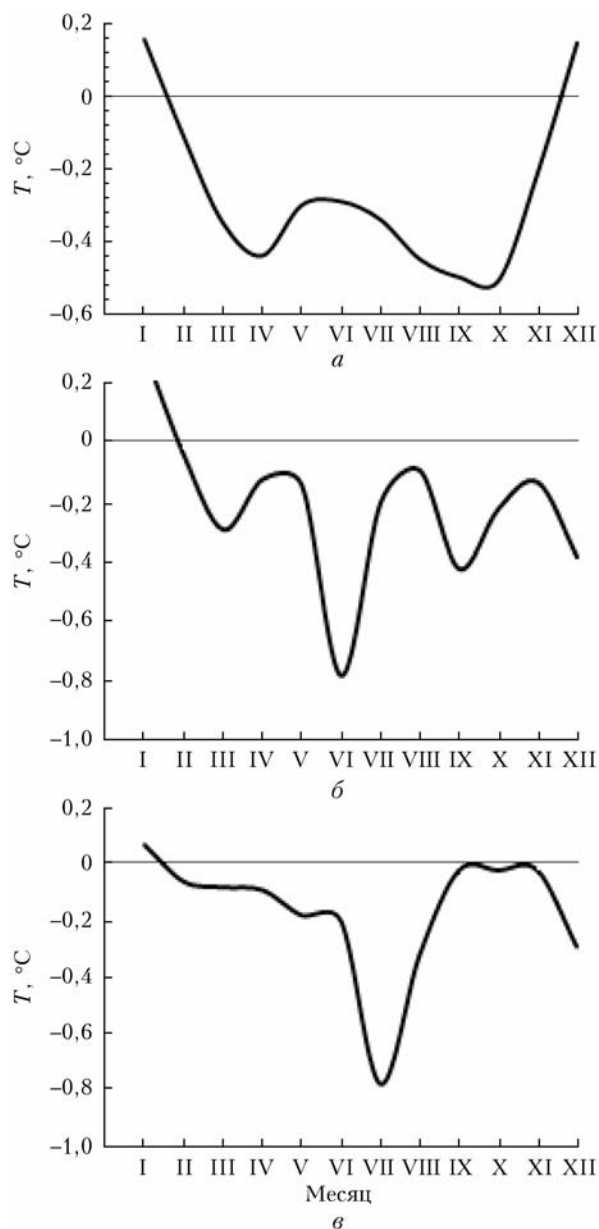


Рис. 2. Годовой ход горизонтальных градиентов температуры воздуха (A_1) над Кавказом с запада на восток на высоте: a – 1500; $б$ – 3000; $в$ – 5000 м

отчетливый физический смысл. Они отражают воздействие основных климатообразующих процессов, происходящих в атмосфере (приход-расход солнечной радиации, циркуляционные процессы и влагооборот).

По данным о среднемесячных температурах воздуха на метеорологических станциях Республики Армения [16] проведен анализ закономерностей распределения температур воздуха в зависимости от абсолютной высоты местности. На рис. 4 показаны зависимости среднемесячных температур воздуха от абсолютной высоты расположения станций Армении в виде прямых линий в январе и июле для различных климатических периодов. Также приведены уравнения регрессии и коэффициенты

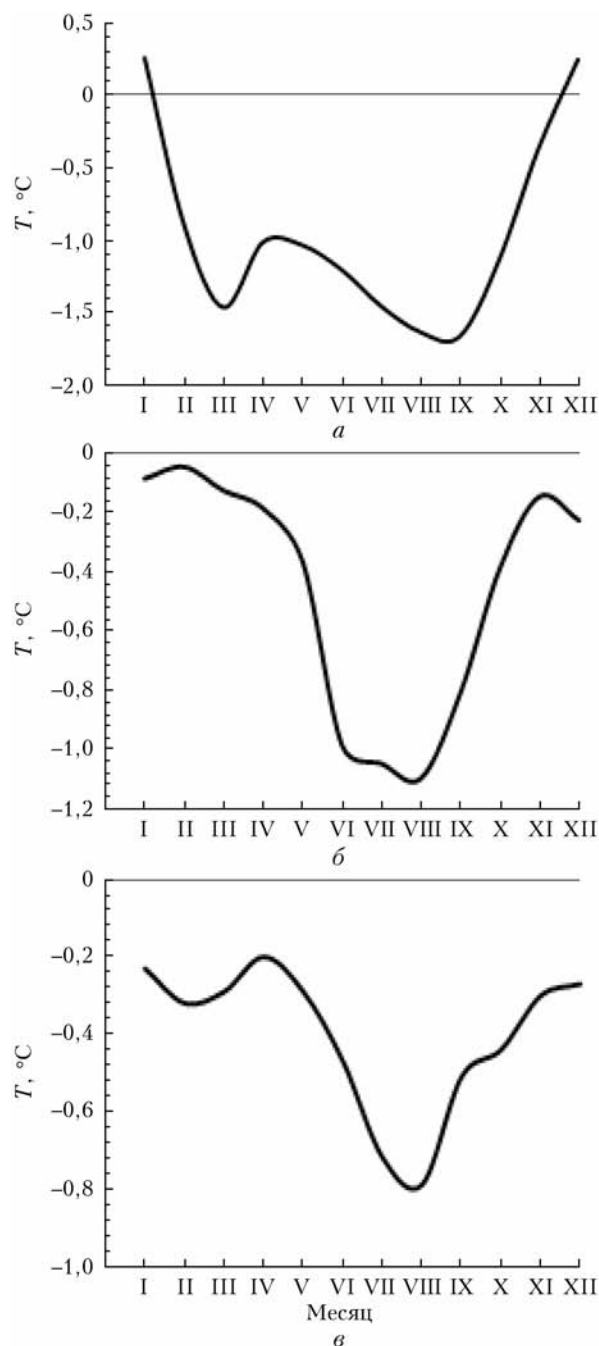


Рис. 3. Годовой ход горизонтальных градиентов температуры воздуха (A_2) над Кавказом с юга на север на высоте: a – 1500; $б$ – 3000; $в$ – 5000 м

детерминации. Аналогичные зависимости приземной температуры воздуха от высоты используются при изучении других горных стран [3, 22].

Климатический период до середины XX в. считается относительно устойчивым по отношению к температуре приземного воздуха. Следующий климатический период (1960–2020 гг.) сопровождался значительным потеплением. В январе осредненные температуры воздуха на малых высотах (500–800 м н.у.м.) в Республике Армения повысились на 1,3–1,5 °C по сравнению с предыдущим

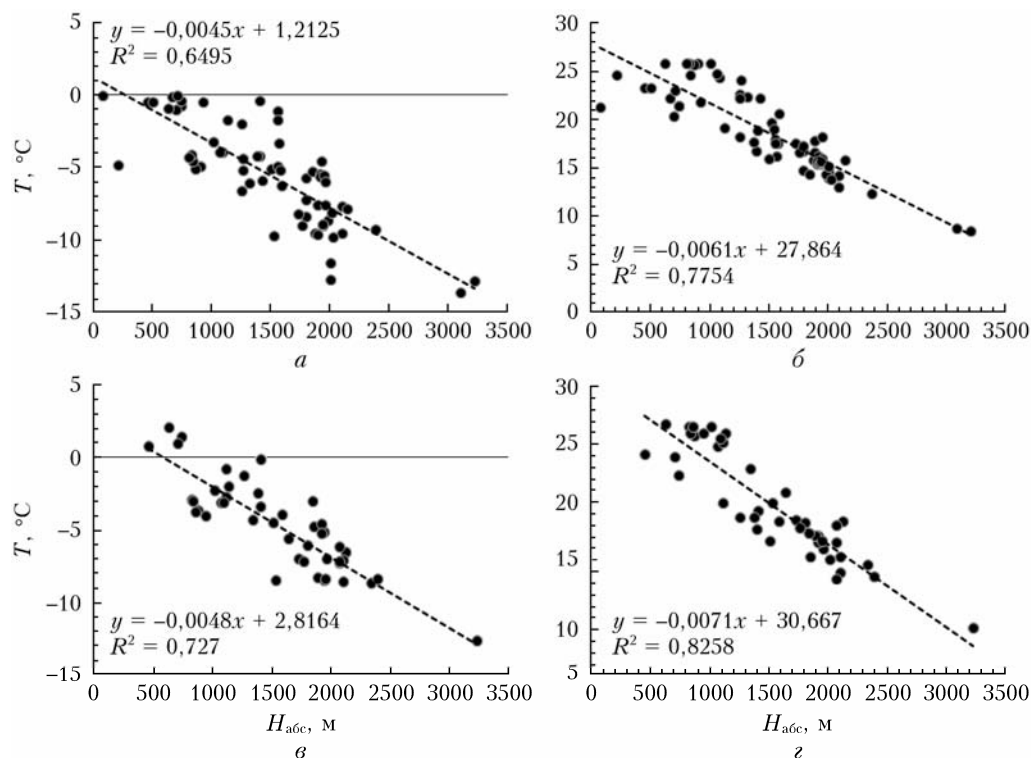


Рис. 4. Зависимость среднемесячных температур воздуха в Республике Армения от высоты станций: а – январь, б – июль по данным до 1960 г. [16], е – январь, з – июль по данным за период 1966–2021 гг.

периодом. В июле нормы среднемесячных температур воздуха в Республике Армения за 1966–2021 гг. на тех же высотах возросли на 2,0–3,0 °C по сравнению с предшествующим периодом до 1960 г. Темпы повышения температуры следует считать ориентировочными, так как число метеорологических станций в Армении в современный период значительно сократилось.

На высоте около 3000 м н.у.м. температура повысилась менее чем на 1 °C как в январе, так и в июле. В холодный и теплый периоды в Армении отмечается тесная связь среднемесячных температур воздуха с высотой станций в различные климатические периоды. Значимый коэффициент корреляции в январе равен 0,80, в июле – 0,88. Уравнение регрессии между температурой и высотой местности показывает, что вертикальный градиент температуры в январе составил 0,46 °C/100 м, а в июле – 0,61 °C/100 м.

Разброс точек на рис. 4 говорит о том, что на режим температуры влияют местные орографические условия, наличие водоемов, ветры и т.д. Сравнение фактических температур на станциях с аэроклиматическими (фоновыми) показывает влияние мезо- или микроклимата. На водоразделах режим температуры меньше всего отличается от условий свободной атмосферы.

В замкнутых формах рельефа в холодный период года образуются локальные очаги холода, а в теплый – наблюдается перегрев по сравнению с равнинной территорией. В районах, где часто проявляются феновые явления, температуры воз-

духа повышены по сравнению с регионами, где фены отмечаются редко.

Сравнительный анализ влияния рельефа на температурный режим на некоторых станциях в Республике Армения в январе показал следующие результаты (табл. 4). Обычно разность между температурой воздуха на станциях на открытой равнинной местности или на водоразделах и расчетной по аэрологическим данным не превышает –1,5–2,0 °C. Таким образом, в условиях свободной атмосферы теплее, чем на метеорологической станции на той же высоте. Это связано с радиационным выхолаживанием подстилающей поверхности (эффект касания подстилающей поверхности). Застой воздуха

Таблица 4
Разности фактических и расчетных температур воздуха в Республике Армения в январе на «холодных» и «теплых» станциях

Станция/высота, м	Фактическая $T_{ф}$, °C	Расчетная $T_{р}$, °C	$\Delta T = T_{ф} - T_{р}$, °C
Пагакн*/2009	–12,7	–6,0	–6,7
Ашоцк*/2009	–11,6	–6,0	–5,6
Гюмри*/1525	–9,7	–3,9	–5,8
Амасия*/1878	–9,5	–5,3	–4,2
Раздан*/1761	–9,0	–4,9	–4,1
Армавир*/865	–5,1	–0,7	–4,4
Горис**/1553	–1,1	–4,0	2,9
Гехи**/1558	–1,7	–4,1	2,4
Севкар**/925	–0,5	–1,6	1,1

* «Холодные» станции.

** «Теплые» станции.

в котловинах влияет на формирование инверсий температуры и оказывает заметный выхолаживающий эффект на ряде станций — Пагакн, Гюмри и др. Он достигает $-6,0$ – $-7,0$ °C. Такие очаги холода формируются в неглубоких широких долинах при типичных условиях общей циркуляции атмосферы над восточными европейскими регионами. Для сравнения: в Алтае-Саянской горной стране разности температур на станциях в котловинах достигают в январе $-20,0$ °C [22]. Это связано с наличием хорошо орографически выраженных котловин и воздействием Азиатского антициклона в зимний период.

На ст. Горис, Гехи, Севкар расчетные температуры оказываются ниже, чем их фактические значения. Повышение температуры может быть вызвано локальным обогревающим влиянием фенов или воздействием водных поверхностей. При оценке обогревающего влияния фенов надо учитывать понижение температуры воздуха за счет касания подстилающей поверхности. Для этого к положительной разности температур необходимо добавить еще $1,5$ – $2,0$ °C. Отметим, что именно в холодный период года феновые явления наиболее активны.

Заключение

Предложенная модель позволяет оценить пространственно-временное распределение температуры в нижней тропосфере над горами Кавказа на разных высотах до 5000 м н.у.м.

Вертикальные градиенты температуры над Кавказом в теплый период года (апрель–октябрь) устойчивы и меняются в пределах $0,4$ – $0,7$ °C/100 м. Слабые приземные инверсии формируются в холодный период в нижнем слое до высоты 1500 м.

Горизонтальные градиенты температуры в направлении с запада на восток меняются в небольших пределах до $-0,8$ °C/100 км. Относительно слабые межсезонные колебания горизонтальных градиентов температуры до высоты 3000 м связаны прежде всего с влиянием горной системы на нижнюю тропосферу и особенностями общей циркуляции атмосферы в переходные сезоны года.

Изменения горизонтальных градиентов в меридиональном направлении (с юга на север) существенно больше и составляют до $1,5$ °C/100 км. По мере увеличения высоты горизонтальные градиенты температуры уменьшаются.

Сравнение фактических значений температуры приземного воздуха на станциях Республики Армения с температурами, рассчитанными по аэрологическим данным, позволило оценить влияние орографических условий в различные сезоны года. Для расчетов температуры воздуха необходимо знать географические координаты, абсолютную высоту местности и «орографическую» поправку, которая принимается по станции-аналогу в регионе. На примере отдельных метеорологических станций Армении показано влияние орографических условий на формирование термического режима в январе. На станциях, расположенных в неглубоких котлови-

нах, средние январские температуры оказываются на $5,0$ – $7,0$ °C ниже расчетных. Это говорит о формировании инверсий температуры в этот период года. На станциях, где наблюдаются феновые явления, фиксируется повышение температуры по сравнению с расчетными значениями. В зависимости от повторяемости фенов температуры на станциях могут быть выше на $2,0$ – $3,0$ °C по сравнению со свободной атмосферой.

Аэроклиматические показатели температуры позволяют объективно и с достаточной для практических задач точностью оценивать тепловые ресурсы в районах, где отсутствуют метеорологические наблюдения, в частности в высокогорной зоне и ледниковых районах.

Представленная локальная модель распределения температуры воздуха в нижней тропосфере может применяться для оценки тепловых ресурсов в пределах всего Кавказского региона. Аналогичным способом можно оценивать климатические значения скорости ветра и влажности воздуха.

Список литературы

1. Баденков Ю.П., Котляков В.М., Ревякин В.С. Устойчивое развитие горных регионов России // Горы и человек: в поисках путей устойчивого развития. Барнаул, 1996. С. 23–25.
2. Gevorgyan A. Surface and tropospheric temperature trends in Armenia // Int. J. Clim. 2014. V. 34. P. 3559–3573. DOI: 10.1002/joc.3928.
3. Давидович Н.В. Поле летней температуры воздуха в горноледниковых бассейнах // Материалы гляциологических исследований: Хроника. Обсуждения. 1982. Вып. 45. С. 56–65.
4. Маргарян В.Г. О термическом режиме приземного слоя воздуха в бассейне реки Дебед (Армения) // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. 2021. Вып. 1. С. 31–44.
5. Сафаров С.Г. Современная тенденция изменения температуры воздуха и атмосферных осадков в Азербайджане. Баку: Изд-во «Элм», 2000. 333 с.
6. Багдасарян А.Б. Климат Армянской ССР. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1958. 151 с.
7. Мелконян Г.А., Овсепян А.Р., Ирицян А.Р., Халатян Е.С., Геворгян А.М. Оценка изменения климата на территории Армении // Тр. ин-та гидрометеорологии Грузинского технического университета. Тбилиси. Т. 119. 2013. С. 32–36.
8. Hovsepian A., Melkonyan H., Petrosyan Z., Sahakyan V., Shoukourian Yu. Climate change over South Caucasus based on regional climate model simulations // Comput. Sci. Inform. Technol. 2011. V. 13. P. 325–327.
9. Маргарян В.Г., Ольчев А.В. Пространственная и временная изменчивость температуры воздуха и осадков бассейна реки Дебед // Ученые записки ЕГУ. Геология и география. 2022. Т. 56, № 1. С. 1–13. DOI: 10.46991/PYSU/C/2022.56.1.001.
10. Маргарян В.Г. Изменчивость зимних экстремальных низких температур приземного слоя воздуха в бассейне озера Севан (Армения) // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12, № 4. С. 523–531. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-523-531.
11. Маргарян В.Г., Аветисян Г.Д., Сарсян А.Т., Маргарян П.Н. Закономерности пространственно-временного распределения абсолютных минимальных температур приземного слоя воздуха в бассейне озера Севан

- // Изв. РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86, № 2. С. 232–242. DOI: 10.31857/S2587556622020078.
12. *Кварацхелия И.Ф.* Аэрологические исследования в Закавказье. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 246 с.
 13. *Новый* аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР. М.: Гидрометеиздат, 1980. Т. 1, 2.
 14. *Статистические* характеристики распределения температуры в свободной атмосфере для станций СССР. Обнинск: Гидрометеиздат, 1975. Ч. 1–4.
 15. *Ханевская И.В., Пашкова З.Д.* Сравнительные характеристики полей средней температуры за семилетний и четырнадцатилетний периоды // Тр. НИИАК. 1966. Вып. 35: Вопросы аэроклиматологии северного полушария. С. 43–57.
 16. *Справочник* по климату СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. Вып. 16, ч. 2. 216 с.
 17. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 572 с.
 18. *Исаев А.А.* Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во Московского ун-та, 1988. 245 с.
 19. *Львовский Е.Н.* Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1988. 239 с.
 20. *Каган Р.Л.* Осреднение метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 213 с.
 21. *Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко А.В.* Современные изменения климата пограничного слоя атмосферы над территорией сибирского региона. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 212 с.
 22. *Севастьянов В.В.* Климатические ресурсы Горного Алтая и их прикладное использование. Томск, Изд-во Том. гос. пед. ун-та. 2009. 252 с.

V.V. Sevastyanov, V.G. Margaryan. Temperature fields in the lower troposphere over the Caucasus.

The climate of mountain regions is studied much worse than of plain territories. We suggest a model of the distribution of temperature field parameters in the lower troposphere over the Caucasus, which is to enable estimating the thermal resources of mountainous regions. Based on temperature sounding data at altitudes of 1500, 3000, and 5000 m from six aerological stations located on different sides in the mountainous country and regression and statistical analysis, we retrieve the temperature fields and distribution in the lower troposphere. The monthly average characteristics of the temperatures are presented; the effect of orography on the temperature regime is studied. The use of aeroclimatic temperature indicators makes it possible to indirectly estimate the thermal resources of mountain regions from analog station data for their effective use in economic activity.