

УДК 911.52 (575.2) (04)

**ЧИСЛЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫСОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ТЕРРИТОРИИ КЫРГЫЗСТАНА**

О.А. Подрезов

Приведены результаты обобщающих исследований по высотным зависимостям характеристик температуры, давления и плотности воздуха, снежного покрова, промерзания грунтов, гроз, максимальных скоростей ветра и гололедных отложений на территории Кыргызстана.

Ключевые слова: высотная зональность климата; Кыргызстан.

**1. Методический подход
и использованные исходные данные**

Высотная климатическая зональность есть основная черта горных климатов [1], наблюдаемая в Кыргызстане [1, 2, 4–6, 12–15], как и во всех других горных областях [9, 10, 16–19]. Количественно она выражается в высотных зависимостях метеорологических величин (давление, температура воздуха, осадки, ветер и др.), носящих численно различный характер не только в разных горных регионах, но и внутри каждого из них, т.е. имея различные виды в разных его частях.

Причина кроется в том, что для многих метеорологических величин (МВ) высота не единственный и часто не главный фактор, определяющий ее географическое распределение в горах. Решающим фактором, как правило, являются макро-, мезо- и микрорельефные условия конкретной части территории. Поэтому высотные профили МВ, в большинстве случаев, могут быть надежно выявлены только в пределах их одновременной однородности. Например, существует хорошо выраженная высотная зависимость для максимальных скоростей на наветренных участках склонов передовых хребтов-барьеров (Киргизский, Таласский, Ферганский и др.), представленных их орографически незащищенными боковыми водоразделами. Но уже для склона любого хребта в целом (боковые водоразделы и склоновые долины-ущелья) такой зависимости нет.

Подробно методология необходимого учета макро-, мезо- и микрорельефных условий при построении высотных зависимостей рассмотрена в работах [11–13].

Ниже будут кратко рассмотрены полученные автором высотные зависимости для терри-

тории Кыргызстана следующих метеорологических величин: 1) давление воздуха, 2) плотность воздуха, 3) температура воздуха, 4) глубина промерзания грунтов, 5) характеристики гроз, 6) максимальные снеговые нагрузки, 7) максимальные скорости ветра, 8) максимальные гололедные отложения на технические конструкции. Сведения о высотных зависимостях осадков можно найти в работах [1, 4, 6, 8, 15].

Материалом для исследований послужили многолетние данные наблюдений метеостанций и постов Кыргызгидромета и сопредельных стран, которые располагались в диапазоне высот от 0,2 до 3,61 км, результаты экспедиционных гололедно-ветровых съемок, проводившихся под руководством автора в течение 30 лет, не только на территории Кыргызстана, но и в горах Таджикистана, Узбекистана, Туркмении, Сахалина и Урала.

2. Давление и плотность воздуха

Из всех МВ давление P и плотность воздуха ρ менее всего зависят от рельефных условий и их высотные зависимости проявляются в наиболее чистом виде. По данным 70 метеостанций получены следующие уравнения степенных регрессий средних для года (\bar{P} и $\bar{\rho}$), средних из годовых максимумов (\bar{P}_+ и $\bar{\rho}_+$) и годовых минимумов (\bar{P}_- и $\bar{\rho}_-$) давлений и плотностей воздуха (z , км; ρ , кг/м³; P , гПа):

$$\begin{aligned} \bar{P}(z) &= 1017 (1-0,02 z)^{5,85}, \\ \bar{\rho}(z) &= 1,253 (1-0,02 z)^{4,85}, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_+(z) &= 1040 (1-0,02 z)^{6,00}, \\ \bar{\rho}_+(z) &= 1,437 (1-0,02 z)^{5,35}, \end{aligned} \tag{2}$$

Оценки характеристик давления в горах Тянь-Шаня (гПа)

Характеристика давления	Высота, км							
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Абс. мин., P	936	881	830	780	732	687	645	605
\bar{P}_-	943	888	837	787	739	694	652	612
\bar{P}	958	903	851	801	753	708	665	624
\bar{P}_+	978	921	867	814	764	717	673	631
Абс. макс., P	987	929	874	820	769	721	676	634

$$\bar{P}_-(z) = 1001 (1 - 0,02z)^{5,91},$$

$$\bar{P}_+(z) = 1,142(1 - 0,02z)^{4,65}. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены расчеты для характеристик давления по этим формулам, наглядно характеризующие его режим в горах Кыргызстана. В первой и последней строчках этой таблицы дополнительно даны оценки абсолютных минимумов и максимумов давления.

Относительные погрешности приведенных регрессий давления составляют всего около 0,2% (1–2 гПа), а регрессий плотности около 1%. Регрессиям соответствуют коэффициенты степенной корреляции около 0,99. Поэтому, имея высокую точность, они пригодны для решения многих практических вопросов.

Используя (1)–(3) или данные табл. 1 можно также легко рассчитать аналогичные оценки парциального давления кислорода гПа в легких человека на различных высотах путем подстановки соответствующих значений давления $P(z)$ в уравнение:

$$P(z, O_2) = 0,21 (P(z) - 63). \quad (4)$$

3. Температура воздуха

В отличие от давления (плотности), температурные характеристики достаточно сильно зависят от рельефных условий. Поэтому их высотные профили следует рассматривать не только для территории в целом, но также и для отдельных климатических провинций (учет макро-рельефа). Были найдены следующие линейные высотные регрессии (табл. 2): средней годовой температуры t для всей территории Кыргызстана, его Северной, Юго-Западной климатических провинций и Внутреннего Тянь-Шаня; средние из годовых максимумов t_+ и абсолютных максимумов t_{+a} по этим территориям. Для минимальных температур, вследствие исключения значительной части станций, относящихся к подгорным равнинам и днищам котловин, где

очень сильно зимнее радиационное выхолаживание в приземных слоях, оказалось возможным рассчитать только t_- и t_{-a} , т.е. средние из годовых минимумов и абсолютные минимумы для всей территории.

Этим линейным регрессиям соответствуют коэффициенты корреляции $r_1 = -0,81 \dots -0,90$, кроме минимальных температур, для которых $r_1 = -0,60 \dots -0,70$. Как видно из данных табл. 2, стандартные ошибки средних и максимальных температур находятся в пределах $\pm 1,2 \dots \pm 3,2^\circ\text{C}$. Они меньше для региональных регрессий, соответствующих отдельным провинциям. Только минимальные температуры имеют более низкие коэффициенты корреляции и стандартные ошибки регрессий около $\pm 4,0^\circ\text{C}$. Напротив, самая высокая корреляция и самые малые ошибки соответствуют максимальным температурам, которые испытывают наименьшее влияние рельефа. Коэффициенты при z в уравнениях табл. 2 есть вертикальные градиенты температуры ($^\circ\text{C}/\text{км}$), показывающие скорость ее уменьшения с высотой.

Регрессиями табл. 2, с учетом величин их ошибок, можно с успехом пользоваться на практике для решения многих прикладных задач.

4. Глубина сезонного промерзания грунтов

Нормативная глубина сезонного промерзания грунта f , определяемая как средняя из ее годовых максимумов, является важной характеристикой строительной климатологии, которая используется для решения вопросов заглубления фундаментов сооружений и сантехнических устройств [3]. Она зависит от режима таких климатических характеристик как температура воздуха, снежный покров, а также состав и увлажненность грунтов. Оказалось, что интегрально, с приемлемой для практики точностью, эти зависимости f могут быть учтены через высоту места. Полученные линейные регрессии имеют

Таблица 2

Уравнения температурных регрессий Кыргызстана

Территория	Уравнение регрессии температуры	Территория	Уравнение регрессии температуры
Весь Кыргызстан	$\bar{t} = -4,72z + 13,4 \pm 3,2$	Юго-Западный Кыргызстан	$\bar{t} = -5,78z + 16,4 \pm 2,5$
	$t_+ = -7,07z + 43,6 \pm 2,0$		$t_+ = -5,28z + 42,2 \pm 2,2$
	$t_{+a} = -6,47z + 46,6 \pm 2,2$		$t_{+a} = -4,73z + 44,9 \pm 2,7$
	$t_- = -3,86z - 18,0 \pm 4,0$	Внутренний Тянь-Шань	$\bar{t} = -5,92z + 14,5 \pm 2,3$
$t_{-a} = -2,76z - 28,7 \pm 4,1$	$t_+ = -5,84z + 40,4 \pm 2,4$		
Северный Кыргызстан	$\bar{t} = -5,57z + 12,4 \pm 1,2$	Примечание: слагаемые со знаком \pm есть стандартные ошибки регрессий.	$t_{+a} = -5,17z + 42,6 \pm 2,4$
	$\bar{t}_+ = -7,55z + 43,5 \pm 1,6$		
	$\bar{t}_{+a} = -7,85z + 47,7 \pm 2,2$		

вид (в скобках приведены коэффициенты корреляции r и число использованных станций n):

Кыргызстан в целом
 $f_n(M) = 0,45z(\text{км}) \pm 0,34$
 $(r_1=0,67; n=50),$ (5)

Юго-Западный Кыргызстан
 $f_n(M) = 0,58z - 0,34 \pm 0,25$
 $(r_1 = 0,83; n = 20),$ (6)

Внутренний Тянь-Шань
 $f_n(M) = 1,03z - 0,86 \pm 0,37$
 $(r_1 = 0,76; n = 17),$ (7)

где слагаемые со знаком \pm есть стандартные ошибки регрессии (м).

В табл. 3 приведены рассчитанные по (5)–(7) значения глубин промерзания грунтов, которые по своему смыслу соответствуют максимально возможным 1 раз в год. Видно, что на высотах до 1 км в Юго-Западной климатической провинции глубины увеличиваются с высотой гораздо медленнее ($f = 0,8$ м на $z = 2$ км и $f = 1,4$ м на $z = 3$ км), чем во Внутреннем Тянь-Шаня с его более суровым и континентальным климатом ($f = 1,2$ м на $z = 2$ км и $f = 2,2$ м на $z = 3$ км). Для Северного Кыргызстана рассчитать регрессию не удалось вследствие того, что все станции располагались только на малых высотах. Для него можно использовать общее уравнение, полученное для Кыргызстана в целом.

С учетом ошибок регрессий ($\pm 0,25$ – $0,37$ м) оценки промерзания грунтов по регрессиям могут быть использованы на практике для решения многих задач строительной климатологии.

Таблица 3

Рассчитанные по (4)–(6) глубины промерзания грунтов f (м)

Регион	Высота, км			
	1	2	3	4
Тянь-Шань в целом	0,45	1,08	1,62	2,16
Юго-Западный Тянь-Шань	0,24	0,82	1,40	1,98
Внутренний Тянь-Шань	-	1,20	2,23	3,26

5. Характеристики гроз

По данным 65 метеостанций исследовались высотные зависимости следующих климатически характеристик гроз [14]: среднегодовой частоты (числа случаев) – \bar{x} , длительности одной грозы – \bar{t} и годового числа грозочасов – \bar{n} . Оказалось, что зависимости $\bar{x}(z)$ и $\bar{n}(z)$ статистически наиболее адекватно могут быть выражены параболическими регрессиями второго порядка, а зависимости $\bar{t}(z)$ – линейной регрессией. В целом для Кыргызстана они имеют вид (в скобках даны коэффициенты параболической и линейной корреляции):

$\bar{x} = -9,773z^2 + 34,77z + 3,26 \pm 12,1$ ($r = 0,53$), (8)

$\bar{t} = -0,283z + 1,80 \pm 0,42$ ($r = 0,47$), (9)

$\bar{n} = -12,621z^2 + 39,059z + 16,42 \pm 22,2$ ($r = 0,50$), (10)

где z , км; \bar{t} , час; \bar{n} , грозочасах, последние слагаемые справа – стандартные ошибки регрессий.

Как видно, эти зависимости имеют умеренную по силе корреляцию, но вполне пригодны для решения многих задач строительной климатологии. Получены также уточненные регрессии

такого вида для четырех климатических провинций Кыргызстана, которые здесь не приводятся.

Согласно (8), частота гроз в году на высотах 0,6 км составляет в среднем около 20, возрастая к 1,5–2 км до 34 (максимум частоты), а затем убывает к 3,5 км до 5. Средняя длительность гроз по (9) линейно убывает от 1,63 ч на $z = 0,6$ км до 0,81 ч на $z = 3,5$ км. Грозочасы по (10) имеют максимум $\bar{n} = 47$ на $z = 1,5$ км, убывая к гребневой зоне хребтов до 10 ($z = 3,5$ км).

6. Максимальные снеговые нагрузки

Под нормативной снеговой нагрузкой на сооружения [3] понимается максимальная поверхностная плотность снегового покрова S_0 (кг/м²), численно равная его водозапаса (мм), которая может возникнуть 1 раз в год (т.е. в конце каждой зимы). Для определения S_0 (как среднего из годовых максимумов S) были использованы многолетние данные снегосъемок на 178 станциях и постах Кыргызгидромета за 1941–1978 гг., а также обобщенные материалы наблюдений по 393 снегопунктам (1,88–4,25 км) и 564 авиарейкам на склонах и в гребневой зоне хребтов [7].

Это позволило построить 17 генерализированных высотных зависимостей $S_0(z)$, соответствующих склонам конкретных хребтов Кыргызстана или группам таких хребтов, обладающих достаточной однородностью режима снежного покрова [13]. По заказу МЧС КР была разработана крупномасштабная карта (М 1:500000), на которой выделено 15 нормативных снеговых районов от $S_0 = 50$ кг/м² до $S_0 = 1100$ кг/м². В табл. 4 в качестве примера приведено положение высот-

ных границ районов для группы внешних западных хребтов и внутренних хребтов Тянь-Шаня. Видно, что на многоснежных внешних хребтах граница первого снегового района ($S_0 = 50$ кг/м²) лежит на малой высоте $z = 700$ м. С ее увеличением S_0 быстро растет, достигая в гребневой зоне наивысшего 15 района с $S_0 = 1100$ кг/м². Напротив, на малоснежных хребтах Внутреннего и Центрального Тянь-Шаня первый район лежит на очень большой высоте – 3700 м (на 3000 м выше), а в их гребневых зонах на высотах 5100 м и более располагается всего лишь седьмой район с $S_0 = 300$ кг/м².

Полные данные о 17 высотных зависимостях S_0 с положением границ нормативных снеговых районов по всей территории Кыргызстана приведены в [13].

7. Максимальные скорости ветра и гололедные отложения

Все технические сооружения рассчитываются на определенные максимальные скорости ветра и гололедные отложения (осадки), наблюдающиеся в данной местности. В качестве их нормативных значений [3] принимаются максимальные скорости (V_{10} , м/с) и гололедные осадки (P_{10} , кг/м и эквивалентные им стенки гололеда b_{10} , мм), вероятные 1 раз в 10 лет.

Эти характеристики, в отличие от рассмотренных выше, наиболее сильно зависят от макро-, мезо- и микрорельефных условий места. Поэтому автором разработана специальная методика построения их обобщенных высотных зависимостей в безразмерных “приведенных

Таблица 4

Высотное положение границ снеговых районов, фрагмент из [13]

Снеговой район	S_0 , кг/м ²	Высотные границы, м	Снеговой район	S_0 , кг/м ²	Высотные границы, м
Восточный склон Чаткальского хр., южный склон Атойнокского хр., западный склон Ферганского хр.					
1	50	Менее 700	9	500	2400–2700
2	70	700–900	10	600	2700–2900
3	100	900–1100	11	700	2900–3100
4	150	1100–1400	12	800	3100–3200
5	200	1400–1700	13	900	3200–3300
6	250	1700–1900	14	1000	3300–3400
7	300	1900–2100	15	1100	Выше 3400
8	400	2100–2400			
Горное обрамление Чатыркульской, Аксайской и Ак-Шийракской впадин, хребты Центрального Тянь-Шаня					
1	50	Ниже 3700	5	200	4700–4900
2	70	3700–4000	6	250	4900–5100
3	100	4000–4400	7	300	Выше 5100
4	150	4400–4700			

высотах” ($z_{пр}$), когда подножью хребта всегда соответствует $z_{пр} = 0$, середине склона $z_{пр} = 0,5$ и гребню $z_{пр} = 1,0$ [11, 13].

Так как на открытых главных и боковых водоразделах хребтов метеостанций нет, то в течение 1965–1990 гг. были проведены экспедиционные гололедно-ветровые съемки на склонах и гребнях хребтов Средней Азии с целью получения фактических данных для построения высотных зависимостей $V_{10}(z_{пр})$ и $P_{10}(z_{пр})$, что диктовалось тогда острой необходимостью строительства высоковольтных ЛЭП от Токтогульской ГЭС и Нурекской ГЭС.

Полученные обобщенные по высотным зависимостям данные об увеличении V_{10} и P_{10} на открытых участках склонов внешних хребтов Средней Азии в приведенных высотах даны в табл. 5. Из этих данных следует, что в зоне подножий склонов ($z_{пр} = 0$) максимальные скорости V_{10} составляют около 25 м/с, а гололедные осадки P_{10} около 0,6 кг/м (на метр конструкции). В средней части склонов ($z_{пр} = 0,5$) V_{10} увеличиваются до 34 м/с, а P_{10} до 3 кг/м. На гребнях хребтов ($z_{пр} = 1,0$) нормативные скорости становятся равными 43 м/с, а гололедные осадки 7 кг/м. Это очень тяжелые гололедно-ветровые условия, приводящие к удорожанию ЛЭП и других сооружений в 5–10 раз по сравнению с обычными более легкими условиями большинства равнин. Заметим, что по нашим исследованиям [11], в горах Сахалина и Урала V_{10} и P_{10} значительно выше. Так, для гребневой зоны получено: V_{10} (Урал) = 48 м/с, V_{10} (Сахалин) = 48 м/с; P_{10} (Урал) = 59 кг/м, P_{10} (Сахалин) = 26 кг/м. Интересно от-

метить, что в горах континентального Урала гололедные осадки в два раза больше чем в горах прибрежно-океанического Сахалина.

На закрытых участках склонов (талевги склоновых долин и ущелий) высотных зависимостей нет, и значение параметров самые низкие:

$$V_{10} = 20\text{--}25 \text{ м/с}, P_{10} = 0,3\text{--}0,6 \text{ кг/м}.$$

Разработанные автором и его учениками крупномасштабные карты нормативных ветровых и гололедных нагрузок для стран Средней Азии, в основе которых лежат эти высотные зависимости, были утверждены Минэнерго СССР в качестве нормативных для проектирования, строительства и эксплуатации ЛЭП.

Таблица 5

Нормативные скорости ветра и гололедные осадки на открытых водораздельных участках внешних хребтов Средней Азии

Характеристика	Высота					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Скорости ветра V_{10} , м/с	25	28	32	36	40	43
Гололедные осадки P_{10} , кг/м	0,6	1,3	2,4	3,6	5,2	7,0

По этим картам построены ЛЭП – 500 кВ от Токтогульской и Нурекской ГЭС и многие другие линии.

В заключение на рис. 1 и 2 показаны фото фрагмента опоры ВЛ 220 кВ с большим отложением плотной изморози и рекордное ее отложение на тросе опытного пролета с массой осадка



Рис. 1. Отложение плотной изморози на опоре ВЛ – 220 кВ (масса осадка около 20 кг/м), Сахалин, гора Подсека, высота 1000 м.



Рис. 2. Отложение плотной изморози на тросе опытного пролета (масса осадка 35 кг/м), Урал, Таганай гора, высота 1100 м.

35 кг/м как примеры возможных сильных обледенений сооружений в гребневых зонах даже невысоких хребтов.

Литература

1. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др. Климатология. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 567 с.
2. Атлас Киргизской ССР. Т. 1. Природные условия и ресурсы. – М.: ГУКГ, 1971. – 157 с.
3. Заварина М.В. Строительная климатология. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 312 с.
4. Климат Киргизской ССР / Под ред. З.А. Рязанцевой. – Фрунзе: Илим, 1965. – 289 с.
5. Климат и климатические ресурсы Грузии // Труды ЗаКНИГМИ. – Вып. 44 (50). – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 384 с.
6. Кузмиченок В.А. Цифровые модели характеристик увлажнения Кыргызстана. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2008. – 227 с.
7. Методические рекомендации по определению режима снежного покрова в горах Средней Азии / САНИИ. – Ташкент, 1982. – 167 с.
8. Оледенение Тянь-Шаня / Отв. ред. М.Б. Дюргеров (Россия), Лю Шаохай, Се Зичу (Китай). – М.: Инст. геогр. РАН, 1995. – 233 с.
9. Опасные гидрометеорологические явления в Средней Азии. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 336 с.
10. Опасные гидрометеорологические явления на Кавказе. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 264 с.
11. Подрезов О.А. Опасные скорости ветра и гололедные отложения в горных районах. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 223 с.
12. Подрезов О.А., Джаксыбаев М.А., Мезгин В.А., Чен Б.Б. Климатические условия Кыргызстана (Для технических приложений). – Бишкек: Илим, 1992. – 170 с.
13. Подрезов О.А. Горная метеорология и климатология. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2000. – 269 с.
14. Подрезова Ю.А. Основные климатические данные о режиме гроз в Кыргызстане // Вестник КРСУ. – 2009. – Т. 9. – № 7. – С. 61–67.
15. Пономаренко П.Н. Атмосферные осадки Киргизии. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 134 с.
16. Роджер Г. Барри. Погода и климат в горах / Пер. с англ.; Под ред. А.Х. Хргиана. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 311 с.
17. Севастьянов В.В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1998. – 184 с.
18. Сухова М.Г. Биоклиматические условия жизнедеятельности человека в Алтае-Саянской горной стране. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2009. – 259 с.
19. Челпанова О.М. Климат СССР. Вып. 3. Средняя Азия. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 447 с.