

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ГРАДИЕНТЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В БАССЕЙНЕ САЯНО-ШУШЕНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Работа посвящена изучению термического режима в бассейне водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС в целях гидрологических прогнозов. Проведено районирование бассейна. Собран весь материал наблюдений за температурой воздуха в бассейне. Построено среднее многолетнее распределение температуры воздуха с высотой в период снеготаяния. Найдены вертикальные градиенты температуры воздуха. Показана возможность их использования в гидрологических прогнозах.

Ключевые слова: Саяно-Шушенское водохранилище; температура воздуха; вертикальный градиент; прогноз талого стока.

Прогнозы весенне-летнего стока рек Сибири основываются на оценках пространственного распределения в бассейне важнейших его факторов – снежного покрова, осадков и температуры воздуха. Если в бассейне равнинной реки эти характеристики в силу их незначительной изменчивости определяются без труда, то для горных рек, в условиях недостаточной метеорологической изученности, задача многократно усложняется. Характер снегонакопления, выпадение осадков и температурный режим здесь тесно связаны с орографией. Наличие связи с высотой местности способствовало широкому распространению так называемых высотных зависимостей.

Объективная оценка температурного режима на различных высотных зонах в период снеготаяния способствует значительному увеличению оправданности гидрологических прогнозов. На практике температура воздуха неизученной горной части бассейна определяется по температуре опорной станции с учетом вертикального градиента. В публикациях отечественных исследователей климата горных стран можно встретить различные его величины. Широкое распространение получила величина $0,6^{\circ}\text{C}/100$ м. Опыт построения различных высотных зависимостей показал, что интенсивность понижения температуры воздуха в горах в теплый сезон изменяется в зависимости от орографии, сезона года, влажности воздуха, особенностей атмосферной циркуляции, условий подстилающей поверхности и от других факторов. Расчет вертикальных градиентов температуры воздуха в горах Сибири в период снеготаяния являлся основной целью данного исследования.

Большой интерес представляет характер распределения температуры воздуха с высотой в бассейне водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС, отличающийся разнообразием ландшафтов и слабой метеорологической изученностью. Бассейн водохранилища расположен в средней части Азиатского материка, включает юг Красноярского края, районы республик Тывы и Хакасии, часть находится в пределах Монгольской Народной Республики. Рассматриваемая территория представляет собой сложную систему горных хребтов и межгорных котловин Алтае-Саянского нагорья, включающего восточную часть Алтая, Западный Саян, Тувинскую котловину, значительную часть Восточного Саяна и горы Республики Тыва. Тувинская котловина играет большую роль в развитии синоптических процессов и характере погоды в бассейне. Длина котловины (с запада на восток) около 400 км, а ширина варьирует от 60 до 150 км. Котловина со всех сторон окружена горными хребтами. На севере ее границей является хребет Западный Саян, на юге – хребет Танну-Ола. Западной границей котловины слу-

жит Шапшальский хребет, принадлежащий к системе Восточного Алтая. С востока ее ограничивают хребет Академика Обручева и нагорье Сангилен. Центральная пониженная часть котловины имеет абсолютные высоты 500–800 м, а вершины окружающих ее гор поднимаются до высоты 2 000–2 500 м. В отличие от соседней Минусинской котловины, расположенной к северу от разделяющего их Западного Саяна, более открытой с северной стороны, Тувинская котловина со всех сторон изолирована от соседних районов горными хребтами.

Положение бассейна в центре Азиатского материка обуславливает резко континентальный климат, характеризующийся суровой продолжительной зимой. В холодное время всю территорию бассейна охватывает Сибирский антициклон, который начинает формироваться в сентябре и достигает максимума в январе-феврале. Повсеместно наблюдается инверсия температур; градиент повышения температуры с высотой колеблется от $0,5$ до $1,2^{\circ}\text{C}/100$ м. Мощность инверсии достигает 2 000 м и выше. В горах, окружающих Тувинскую котловину, температура воздуха иногда бывает на 10 – 20°C выше, чем на дне этой котловины. Котловинный эффект выражается в опускании более плотного холодного воздуха с окружающих гор в котловину, его застаивании и еще больше облада радиационному выхолаживанию вследствие преобладания малооблачной безветренной погоды.

Для весны на этой территории характерно развитие зональной циркуляции атмосферы, сопровождающейся прохождением циклонов. В марте теплые фронты скользят по верхней границе выхолаженного воздуха, что не приводит к турбулентному перемешиванию воздуха в приземном слое, часты инверсии. И только в начале апреля инверсии разрушаются, котловина начинает прогреваться в результате нарастающего перевеса дневного нагрева почвы и воздуха над ночным охлаждением. Устанавливается нормальная температурная стратификация – падение температуры воздуха с увеличением высоты [1].

Вертикальные градиенты температур воздуха обычно рассчитываются по данным наблюдений пар станций, расположенных как можно ближе друг от друга для уменьшения влияния горизонтальных изменений [2]. В настоящее время в бассейне водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС на площади 181 тыс. км² действуют 14 метеорологических станций, расположенных на значительном расстоянии друг от друга, в основном в котловине. Температурный режим на станциях наблюдается на высотах от 540 до $1\ 400$ м. В горах измерения температуры воз-

духа не проводятся. В Тувинской котловине (г. Кызыл), действует аэрологическая станция.

По данным наблюдений на метеостанциях были рассчитаны вертикальные градиенты температуры воздуха в приземном слое в период снеготаяния (табл. 1). Март не был включен в расчеты по двум причинам, имеющим

отношение к процессу снеготаяния, – частые инверсии в котловине и отрицательные температуры на склонах гор. Величины градиентов отличаются большим разбросом, что указывает на влияние локальных особенностей в расположении станций и значительное удаление друг от друга.

Т а б л и ц а 1

Вертикальные градиенты температуры воздуха (°C/100 м) по данным метеостанций в бассейне Саяно-Шушенского водохранилища

Станции	Высота верхней станции, м	Амплитуда, м	Апрель	Май	Июнь	Июль	Средний
Оленья Речка – Кантегир	1404	689	0,68	0,75	0,51	0,48	0,61
Оленья Речка – Кызыл	1404	778	0,82	1,09	1,02	0,96	0,97
Оленья Речка – Тоора-Хем	1404	485	0,52	0,66	0,54	0,52	0,56
Оленья Речка – Нижне-Усинское	1404	744	0,66	0,78	0,65	0,58	0,67
Тоора-Хем – Кызыл	919	293	1,33	1,81	1,81	1,71	1,66
Туран – Шагонар	862	323	1,15	1,18	0,59	0,77	0,92
Сосновка – Кызыл	947	321	0,31	0,47	0,69	0,78	0,56
Сосновка – Сарыг-Сеп	947	241	-0,29	0,00	0,12	0,21	0,01
Кунгур-Тук – Кызыл	1310	684	0,69	0,82	0,83	0,86	0,80
Кунгур-Тук – Сарыг-Сеп	1310	604	0,50	0,68	0,63	0,65	0,61
Кунгур-Тук – Сосновка	1310	363	1,02	1,13	0,96	0,94	1,01
Телли – Чадан	983	151	0,00	0,07	0,07	0,33	0,12
Хову-Аксы – Шагонар	1043	504	0,69	0,95	0,71	0,87	0,81
Средний			0,62	0,80	0,70	0,74	0,72

В свободной атмосфере до высоты 4 000 м средний градиент температуры по данным аэрологической станции Кызыл за период апрель – июнь 2006–2007 гг. составил 0,62°C/100 м. Градиенты в свободной атмосфере слабо коррелируются с рассчитанными за тот же период по ближайшей паре станций ($r = 0,40$). Отсутствие дублирующей аэрологической станции в бассейне и слабая связь с температурами на станциях не позволяют использовать рассчитанные градиенты в прогнозах стока.

В целях получения объективной оценки распределения температур воздуха с высотой в расчетах задействована вся имеющаяся в Среднесибирском УГМС метеорологическая информация. В расчет были включены данные наблюдений за температурой воздуха на метеорологических и гидрологических постах бассейна. Задействованы данные метеорологических станций, расположенных на сопредельных к бассейну территориях. Всего использованы данные наблюдений на 25 станциях и 26 постах.

В отличие от метеорологических станций, посты ведут наблюдения только за максимальной и минимальной температурой воздуха. Анализ показал, что среднее арифметическое значение между максимальной и минимальной суточными температурами воздуха за период апрель – июль всегда превышают среднюю суточную температуру (табл. 2).

По данным [2], на распределение температур воздуха в пределах исследуемой территории значительное влияние оказывают горизонтальные градиенты. Количество исходной информации не позволяет отделить горизонтальную составляющую от высотной. Выделение в бассейне районов (рис. 1) позволяет учесть это влияние.

Районы были выбраны исходя из особенностей орографии и ландшафтно-гидрологических характеристик, в дальнейшем границы районов корректировались по виду зависимостей температуры от высоты.

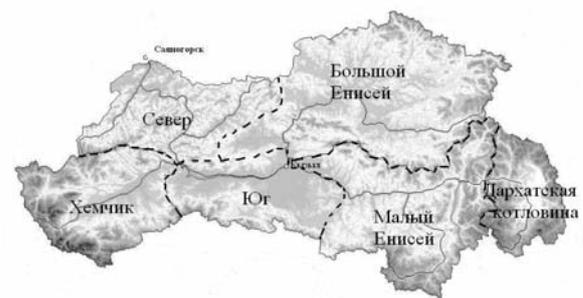


Рис. 1. Схема районирования территории по зависимости $T = f(H)$

Т а б л и ц а 2

Величина поправки (°C) от средней между максимальной и минимальной к средней суточной температуре воздуха в бассейне Саяно-Шушенского водохранилища

Район	Месяц			
	IV	V	VI	VII
Север	-0,9	-0,8	-0,6	-0,7
Большой Енисей	-0,6	-0,4	-0,4	-0,4
Малый Енисей	-0,7	-0,6	-0,6	-0,7
Дархатская котловина	-0,7	-0,6	-0,6	-0,7
Юг	-0,6	-0,2	-0,4	-0,3
Хемчик	-0,4	-0,3	-0,4	-0,5

Для каждого района построены высотные зависимости средних месячных температур воздуха в весенне-летний период (рис. 2). Наблюденные значения были аппроксимированы линейными зависимостями в соответствии с методом наименьших квадратов. Уравнения представлены в табл. 3. Угловые коэффициенты уравнений, умноженные на 100, и есть средние многолетние месячные вертикальные градиенты температуры воздуха, осредненные по районам (табл. 4).

Даты схода снежного покрова в котловине обычно совпадают с датами перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°.

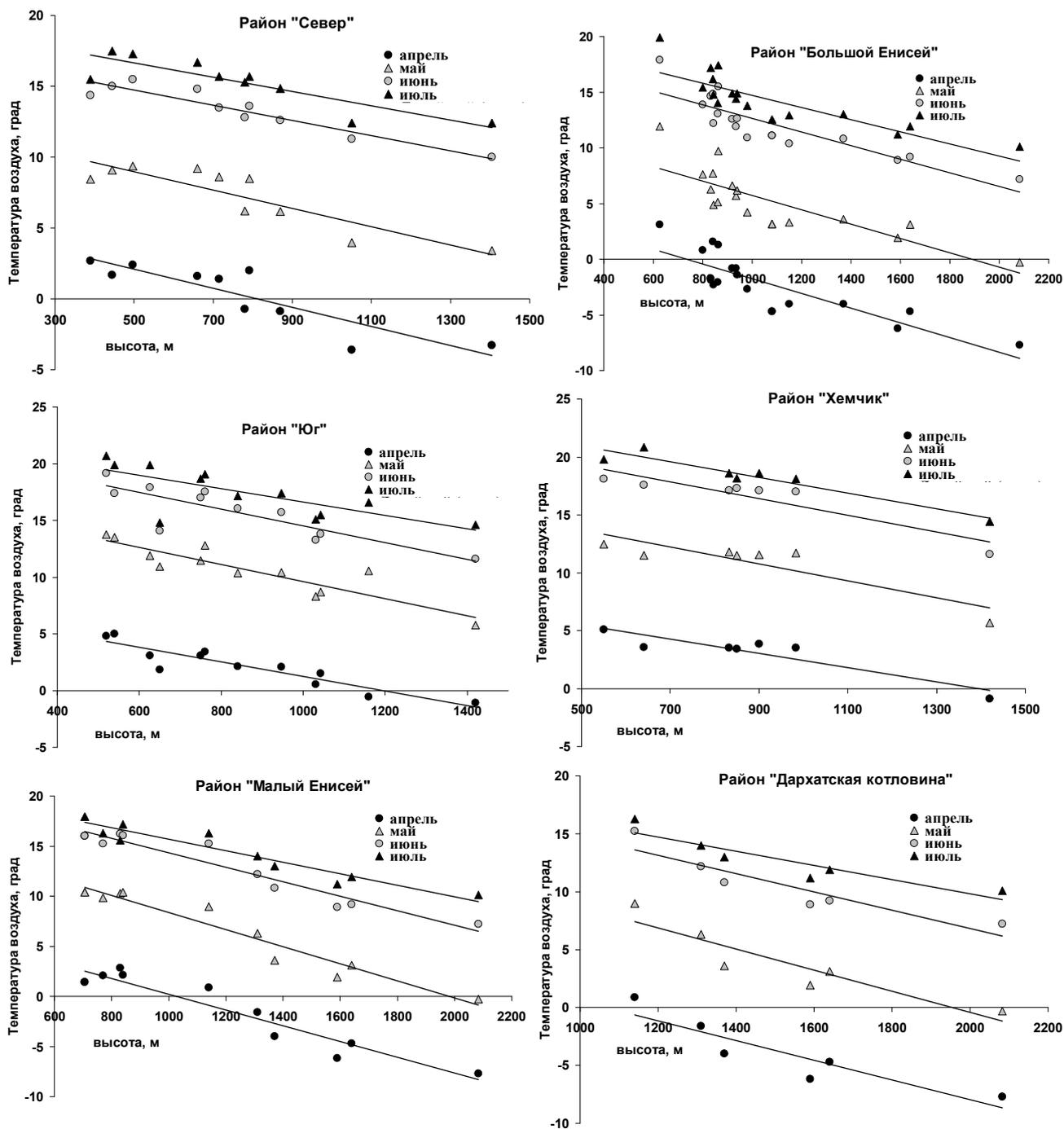


Рис. 2. Распределение средних месячных температур воздуха в зависимости от высоты пунктов наблюдений

К концу марта пониженные участки районов освобождаются от снега. В апреле – мае вертикальный градиент достигает максимальных значений, что объясняется охлаждающим эффектом заснеженных склонов по сравнению с освободившейся от снега котловиной. Периоды с инверсиями снижают расчетные величины градиентов в апреле. К июню-июлю градиенты повсеместно уменьшаются, приближаясь к значению $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$.

По территории бассейна увеличение градиентов температуры согласуется с общим направлением снижения увлажненности атмосферы. Наименьшие значения наблюдаются в районах, близких к увлажненному хребту Запад-

ный Саян, наибольшие – в засушливой Дархатской котловине в пределах Монгольской Народной Республики.

По полученным уравнениям можно также приблизительно оценить средние многолетние температуры воздуха в весенне-летний период на разных высотах.

Оценка температурного режима горных стран сопровождается еще одной трудностью – задание опорной метеостанции, которая обычно расположена в речной долине. На графиках наглядно видны отклонения средних значений температуры на станциях отклонения средних значений температуры на станциях от линий связи. Выбрав для оценки температуры на расчетной высоте разные пункты, даже при одинаковом вертикальном градиенте можно получить несколько различающиеся результаты.

Связь средних месячных величин температур воздуха с высотой пунктов наблюдений

Месяц	Амплитуда, м	Расчетное уравнение	Месяц	Амплитуда, м	Расчетное уравнение
Север			Хемчик		
IV	400–1 400	$T_i = -0,0067 \cdot H_i + 5,46$	IV	500–1 400	$T_i = -0,0061 \cdot H_i + 8,56$
V	400–1 400	$T_i = -0,0065 \cdot H_i + 12,2$	V	500–1 400	$T_i = -0,0073 \cdot H_i + 17,3$
VI	400–1 400	$T_i = -0,0054 \cdot H_i + 17,4$	VI	500–1 400	$T_i = -0,0073 \cdot H_i + 22,9$
VII	400–1 400	$T_i = -0,0051 \cdot H_i + 19,2$	VII	500–1 400	$T_i = -0,0068 \cdot H_i + 24,3$
Большой Енисей			Малый Енисей		
IV	600–2 100	$T_i = -0,0066 \cdot H_i + 4,84$	IV	600–2 100	$T_i = -0,0079 \cdot H_i + 8,04$
V	600–2 100	$T_i = -0,0064 \cdot H_i + 12,1$	V	600–2 100	$T_i = -0,0085 \cdot H_i + 16,9$
VI	600–2 100	$T_i = -0,0061 \cdot H_i + 18,8$	VI	600–2 100	$T_i = -0,0072 \cdot H_i + 21,5$
VII	600–2 100	$T_i = -0,0054 \cdot H_i + 20,2$	VII	600–2 100	$T_i = -0,0058 \cdot H_i + 21,5$
Юг			Дархатская котловина		
IV	500–1 400	$T_i = -0,0064 \cdot H_i + 7,66$	IV	1100–2 100	$T_i = -0,0085 \cdot H_i + 9,10$
V	500–1 400	$T_i = -0,0076 \cdot H_i + 17,2$	V	1100–2 100	$T_i = -0,0091 \cdot H_i + 17,8$
VI	500–1 400	$T_i = -0,0074 \cdot H_i + 21,9$	VI	1100–2 100	$T_i = -0,0079 \cdot H_i + 22,6$
VII	500–1 400	$T_i = -0,0059 \cdot H_i + 22,5$	VII	1100–2 100	$T_i = -0,0061 \cdot H_i + 22,0$

Примечание. T_i – температура воздуха, град, H_i – высота местности, м.

Таблица 4

Расчетные средние месячные вертикальные градиенты температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/100$ м) на уровне станций в бассейне Саяно-Шушенского водохранилища

Месяц	Север	Б. Енисей	Юг	Хемчик	М. Енисей	Дархатская	Весь бассейн
IV	0,67	0,66	0,64	0,61	0,79	0,85	0,70
V	0,65	0,64	0,76	0,73	0,85	0,91	0,76
VI	0,54	0,61	0,74	0,73	0,72	0,79	0,69
VII	0,51	0,54	0,59	0,68	0,58	0,61	0,59
IV–VII	0,59	0,61	0,68	0,69	0,74	0,79	0,68

В оперативной практике гидрологических прогнозов эта задача решается путем расчета средневзвешенной температуры воздуха по формуле

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j (T_j - \gamma \frac{(H_i - H_j)}{100})}{n},$$

где T_i – температура воздуха на высоте H_i , град; T_j – температура на метеостанции, град; H_i – расчетная высота, м, H_j – высота метеостанции, м; γ – вертикальный градиент температуры, $^{\circ}\text{C}/100$ м; λ_j – весовой коэффициент влияния метеостанции; n – число метеостанций, включенных в расчет. Сумма всех весовых коэффициентов влияния равна единице.

Весовые коэффициенты могут быть определены, например, с помощью оптимизационных процедур, в процессе поиска неизвестных параметров в моделях гидрологических прогнозов [3].

Средние месячные значения градиентов по районам можно усреднить нелинейными зависимостями для расчета средних многолетних посуточных величин, используемых в практике прогнозов талого стока. Учет влияния на вертикальный градиент смены типов погоды, характера подстилающей поверхности, влажности воздуха и других факторов, позволяет с большой долей объективности рассчитывать температуру воздуха на всем диапазоне высот бассейна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никольский К.Н. Особенности зимнего температурного режима Тувинской автономной области. Красноярск: Изд-во Краснояр. управления гидрометслужбы, 1956. 78 с.
2. Севостьянов В.В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. 202 с.
3. Бураков Д.А., Авдеева Ю.В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижней Тунгуски) // Метеорология и гидрология. 1996. № 10. С. 75–87.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 25 февраля 2011 г.