

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.345

РЕАКЦИЯ МНОГОЛЕТНЕ- И СЕЗОННОМЕРЗЛЫХ ПОРОД
СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ НА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

А. П. Горбунов, С. С. Марченко, Э. В. Северский

*Институт мерзлотоведения СО РАН им. П. И. Мельникова, Казахская высокогорная
геокриологическая лаборатория, 480000, Алматы, а/я 138, Казахстан*

Анализ длиннопериодных наблюдений на метеостанциях Тянь-Шаня показал, что основными образующими гармониками внутривекового хода средней годовой температуры воздуха в этом регионе являются периоды около 80, 22, 8 лет и 3—4 года. Изменения климата, имеющие определенную периодичность, вызывают аналогичные циклические изменения термического состояния многолетнемерзлых пород.

В результате геотермических наблюдений в Северном Тянь-Шане было выявлено повышение температуры многолетнемерзлых пород в подпоясах островного и прерывистого распространения на 0,2—0,5 °С в течение последних 25 лет. Эти изменения термического состояния криолитозоны в основном являются следствием 80- и 22-летнего периодов колебания средней годовой температуры воздуха. В процессе роста температуры мерзлых пород в течение 25-летнего периода наблюдений были отмечены волны ее понижения с периодичностью 3—5 лет.

Исследования сезонного промерзания пород в различных ландшафтно-фациальных условиях свидетельствуют о неоднозначном изменении глубины промерзания на различных абсолютных высотах за рассматриваемый период.

В низкогорье, несмотря на значительные межгодовые колебания, существенных изменений в глубине промерзания не наблюдается. В среднегорном подпоясе выше 1400—1500 м, вплоть до верхней границы леса (абс. выс. 2700 м) в настоящий момент наблюдается уменьшение глубины сезонного промерзания. Так, на высотах 2500—2600 м глубина промерзания в одинаковых по составу и строению суглинисто-щебенистых грунтах изменялась на северном склоне от 80 см в 1974—1975 гг. до 50 см в 1996—1997 гг., а на южном от 130 до 85 см соответственно. При этом на общем фоне уменьшения глубины промерзания за 25-летний период прослеживаются 3—5-летние циклы уменьшения и увеличения мощности сезонномерзлого слоя. В период похолодания (1982—1985 гг.) глубина промерзания на бесснежном южном склоне увеличивалась до 170—200 см, а в периоды потеплений уменьшалась в 2—2,5 раза.

Иная реакция сезонномерзлого слоя горных пород наблюдается в высокогорье на абс. высотах более 3000 м. В настоящее время здесь отмечается увеличение глубины сезонного промерзания, а в некоторые годы в особых условиях возможно формирование перелетков.

Изменение климата, температура многолетнемерзлых пород, глубина сезонного протаивания

PERMAFROST AND SEASONALLY FROZEN GROUND RESPONSE
TO CLIMATE CHANGE IN THE NORTHERN TIEN SHAN

A. P. Gorbunov, S. S. Marchenko, E. V. Seversky

Permafrost Institute SB RAS, Kazakhstan Alpine Laboratory, 480000, Almaty, Box 138, Kazakhstan

Analysis of climatological data recorded over the last hundred years from high-mountain weather stations situated in the Tien Shan has been made. The analysis shows that the basic harmonics forming the course of mean annual air temperatures during the past century in this region are about 80, 22, 8, and 3—4 years. Climatic changes having a certain periodicity cause similar cyclic changes of the thermal state of permafrost rocks.

Geothermal observations during the last 25 years in the Northern Tien Shan show a growth of permafrost temperature by 0.2—0.5 °C. These changes in the permafrost thermal state are a reflection of 80- and 22-year periods of changes in annual air temperature. During the growth of permafrost temperature the periods of ground temperature decrease have been marked with a periodicity of 3—5 years.

The research of seasonal freezing in various landscapes and altitudes shows different depths of freezing.

In the low-mountain relief significant changes in the depth of seasonal freezing is not observed. In the medium-height mountains (higher 1400—1500 m a.s.l. and up to tree line 2700 m a.s.l.) a decrease in seasonal depth of freezing is observed. At the altitudes 2500—2600 m a.s.l., in the ground of the same structure, the depth of freezing varied on northern slopes from 80 cm in 1974—1975 up to 50 cm in 1996—1997. On southern slopes from 130 up to 85 cm, respectively. The thickness of seasonally frozen layer had important changes every 3—5 years during the last 25 years. During the period of cooling (1982—1985) the depth of seasonal freezing increased up to 170—200 cm on the southern slope, and during warm periods decreased by half.

In the high-mountain area (higher 3000 m a.s.l.) we observed a different response in the thickness of seasonally frozen layers. Currently, an increase in the depth of seasonal freezing depth occurs. Formation of short-term permafrost (pereletok) under specific conditions is sometimes possible.

Climate change, temperature of frozen ground, seasonal thawing depth

ВВЕДЕНИЕ

Изменения геокриологических условий в высокогорных районах Средней Азии в течение последних десятилетий являются следствием потепления климата. Климатические изменения особенно заметно воздействуют на современное оледенение, площадь которого неуклонно сокращается. Повышение температуры многолетнемерзлых пород и активизация посткриогенных процессов в зоне распространения альпийской вечной мерзлоты также являются следствием климатических изменений. В итоге эти процессы нередко приводят к явлениям, имеющим негативный, а иногда и катастрофический характер: гляциальные сели, оползни, сбросовые подвижки каменных глетчеров и др. К настоящему времени накопился материал, позволяющий выявить характер и тенденции развития этих природных процессов.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕРЗЛОТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ В ТЕЧЕНИЕ XX СТОЛЕТИЯ

Анализ длиннопериодных наблюдений на метеостанциях Тянь-Шаня показал, что в этом регионе на протяжении столетия происходят значительные изменения климата. По данным гидрометеорологической обсерватории (ГМО) Алматы в период 1879—1996 гг. средняя годовая температура воздуха повысилась на 2,1 °С, а среднее значение температуры воздуха за холодный период, который на этом высотном уровне (абс. отм. 847 м) равен трем зимним месяцам, возросло на 3,4 °С [Марченко, 1998].

Анализ прироста минимальных, максимальных и средних значений температуры за период

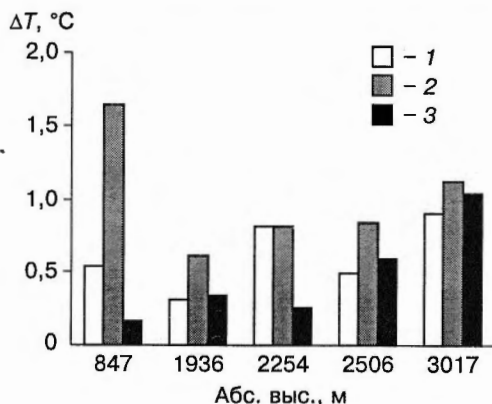


Рис. 1. Величина прироста значений средней годовой (1), средней за холодный период (2) и средней летней (3) температур на различных высотных уровнях в центральной части Заилийского Алатау за период 1937—1992 гг.

1937—1992 гг. на различных высотных уровнях показал наличие положительной корреляции между приростом температуры и абсолютной высотой (рис. 1, 2). Наиболее тесная связь наблюдается для летнего периода. Так, коэффициенты корреляции r для значений средней, минимальной и максимальной летних температур соответственно равны 0,82, 0,91 и 0,70. Аналогичная зависимость прироста температуры воздуха от абсолютной высоты была отмечена в Швейцарских Альпах [Beniston, Robetez, 1996].

Необходимо отметить, что ГМО Алматы в настоящее время располагается в черте города, поэтому метеорологические данные, полученные здесь в последние десятилетия, скорее отражают влияние антропогенной нагрузки на климат, нежели естественно-природные климатические тренды.

В основу ряда современных физико-статистических методов прогноза метеорологических величин положен принцип периодических составляющих. Считается, что некоторые статистические характеристики ряда мало отличаются от одного периода к другому. Данное допущение позволяет выделять основные структурные элементы (элементарные гармоники) и экстраполировать поведение ряда в будущем (перспективный прогноз), либо реконструировать его структуру в прошлые периоды (ретроспективный прогноз). В качестве основного статистического аппарата в таких моделях используются гармонический или автокорреляционный анализы.

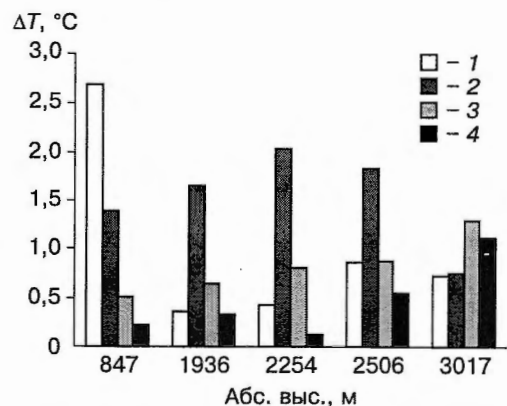


Рис. 2. Величина прироста экстремальных значений температуры для летних месяцев и в течение холодного периода на различных высотных уровнях в центральной части Заилийского Алатау за период 1937—1992 гг.

1 — минимальные, 2 — максимальные значения температуры за холодный период; 3 — минимальные, 4 — максимальные летние значения температуры.

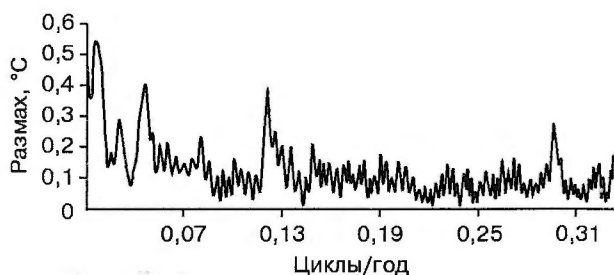


Рис. 3. Периодограмма ряда средних годовых температур воздуха, зафиксированных на ГМО Алматы в период 1879—1996 гг.

Для получения спектра ряда среднегодовых температур воздуха, зафиксированных на ГМО Алматы, использован метод Диминга [Deeming, 1975] с применением функции спектрального окна с целью управления эффектами, обусловленными наличием боковых лепестков в спектральных оценках. Анализ показал, что основными образующими ритмами хода средней годовой температуры воздуха здесь являются периоды продолжительностью около 182, 81, 22, 8 лет и 3,4 года, полученные в результате спектрального разложения ряда и имеющие наибольший размах (таблица). На рис. 3 представлена периодограмма, полученная в результате анализа ряда.

Выявленные периоды могут быть сопоставлены с 80—90-летним ритмом солнечной активности и 22-летней периодичностью перемены магнитной полярности солнечных пятен. Наблюдения за динамикой горных ледников во Внутренней Азии с середины XX в. фиксируют подвижки с созданием соразмерных моренных комплексов в середине 1950-х и 1970-х гг. Их можно достаточно уверенно связывать с проявлениями 22-летнего ритма солнечной активности. Ритмы со средней продолжительностью около 22 лет хорошо проявляются в горах Внутренней Азии не только в динамике ледников, но и, например, в продуктивности лесной растительности на верхнем пределе ее распространения [Чистяков и др., 1994].

Основные периодические составляющие ряда средних годовых температур воздуха, зафиксированных на ГМО Алматы

Период	Размах, °C	Частота, год ⁻¹	Фаза, годы
182,47	0,47	0,0055	36,15
81,19	0,52	0,0123	15,02
22,12	0,42	0,0452	21,12
8,02	0,41	0,1247	0,27
3,48	0,29	0,2871	1,03

Изменения климата, имеющие определенную периодичность, вызывают аналогичные циклические изменения термического состояния многолетнемерзлых пород. В результате геотермических наблюдений в Северном Тянь-Шане было выявлено повышение температуры многолетнемерзлых пород в подпоясах островного и прерывистого их распространения на 0,2—0,6 °C в течение последних 25 лет. Эти изменения термического состояния криолитозоны в основном являются следствием 80- и 22-летнего периодов колебания средней годовой температуры воздуха. В процессе роста температуры мерзлых пород в течение 25-летнего периода наблюдений были отмечены волны ее понижения с периодичностью 3—4 года (рис. 4).

Вопросы, связанные с реконструкцией геокриологических условий в течение последних 100—150 лет, не вызывают особых трудностей ввиду того, что на этом отрезке времени в некоторых регионах уже проводились инструментальные наблюдения. Имея данные о непрерывном ходе температуры воздуха и осадков, получение эволюционных кривых мощности и температуры многолетнемерзлых пород не составляет труда и сводится лишь к вычислительной процедуре.

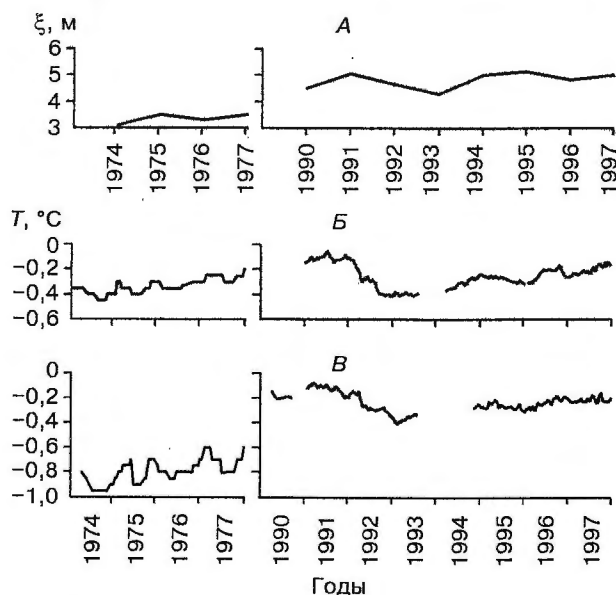


Рис. 4. Изменение мощности сезонноталого слоя и температуры многолетнемерзлых пород в скважинах на перевале Жусалыкезен (Северный Тянь-Шань, хр. Заилийский Алатау, абс. выс. 3330 м).

А — глубина сезонного протаивания, ξ (скв. 2), Б — температура на глубине 14 м (скв. 2), В — температура на глубине 15 м (скв. 1).

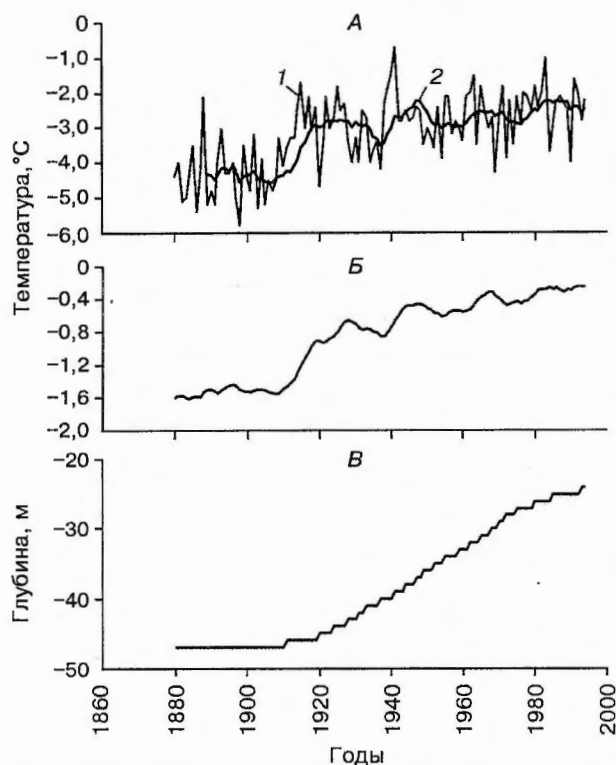


Рис. 5. Динамика температуры воздуха (А), расчетная температура многолетнемерзлых пород на глубине 20 м (Б) и динамика изменения мощности мерзлых толщ (В). Перевал Жусалыкезен, хр. Заилийский Алатау, абс. выс. 3330 м.

1 — средние годовые значения, 2 — сглаженные десятилетними скользящими средними.

Для выявления характера динамики температуры и мощности многолетнемерзлых пород в Северном Тянь-Шане в течение последнего столетия были использованы данные метеорологических и геотермических наблюдений. В качестве примера рассматривался район перевала Жусалыкезен (Северный Тянь-Шань, хр. Заилийский Алатау, $43^{\circ}05'$ с.ш., $76^{\circ}55'$ в.д., абс. выс. 3336 м). В этом месте, в диапазоне абсолютных высот 3320—3350 м, расположена сеть термометрических скважин, и начиная с 1973 г. проводятся работы по программе геотермического мониторинга. Теплофизические и влажностные характеристики грунтов задавались в соответствии с данными реальных геологических разрезов. Начальные условия краевой задачи определялись в соответствии с климатическими параметрами. На верхней границе расчетной области задавались граничные условия 3-го рода, на нижней — значение теплового потока, характерного для данной местности ($25\text{--}30\text{ мВт/м}^2$)

[Шварцман, 1985]. Шаг временной сетки — 1 год. В результате расчетов была получена динамика температуры многолетнемерзлых пород и изменение мощности мерзлых толщ с конца прошлого века до настоящего времени (рис. 5).

Результаты модельной оценки геокриологических условий в течение последних 120 лет показали, что в конце XIX в. многолетнемерзлые толщи имели температуру на $1,3\text{--}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже по сравнению с современными. Ход температуры на глубине 20 м имеет вид кривой температур воздуха, сглаженных десятилетними скользящими средними, а ее колебания имеют ярко выраженный период, близкий 22-летней периодичности перемены магнитной полярности солнечных пятен [Марченко, 1997].

Мощность мерзлых толщ с конца прошлого века до настоящего времени уменьшилась почти на 25 м. Сокращение мощности многолетней мерзлоты происходило в основном в толще коренных пород. В настоящее время скорость этого процесса резко сократилась за счет того, что протаивание снизу происходит в слое рыхлых льдистых отложений.

СЕЗОННОЕ ПРОМЕРЗАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Материалы исследований сезонного промерзания пород в различных ландшафтных условиях Северного Тянь-Шаня свидетельствуют о неоднозначном изменении глубины и температуры на различных абс. высотах за 25-летний период наблюдений.

Основные закономерности пространственных изменений глубин сезонного промерзания в различных условиях Северного Тянь-Шаня опубликованы [Северский, Северский, 1990; Горбунов и др., 1996] и отображены на рис. 6.

В низкогорье (от 900—1000 до 1400—1500 м абс. высоты) наиболее важной климатической особенностью является температурная инверсия воздуха в холодный период, которая обуславливает здесь относительно мягкую зиму в сравнении с предгорной равниной. Глубина промерзания на заснеженных склонах северной экспозиции в среднем составляет $0,3\text{--}0,5\text{ м}$, а на южных склонах, практически бесснежных — $0,1\text{--}0,5\text{ м}$. Здесь процесс сезонного промерзания отличается неустойчивостью и зачастую сменяется протаиванием в периоды потеплений. При этом на северных склонах это происходит эпизодически в экстремально теплые зимы или в периоды продолжительных оттепелей, а на южных — проявляется систематически и неоднократно в течение холодного периода, когда большая часть или весь промерзающий слой протаивает. При незначительной глубине промер-

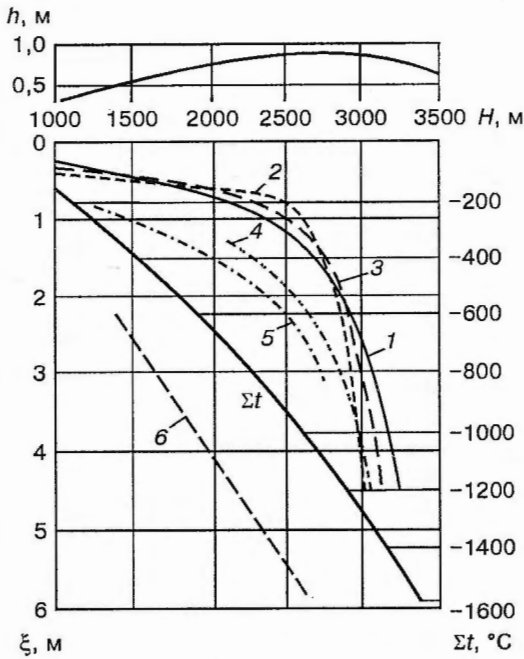


Рис. 6. Зависимость высоты снежного покрова (h), сумм отрицательных температур воздуха (Σt) и глубины сезонного промерзания грунтов (ξ) в различных ландшафтных условиях (1—6) от абс. высоты местности (H) на северном склоне Зайлийского Алатау.

1 — лугово-степные склоны южной экспозиции, 2 — луговые склоны северной экспозиции, 3 — луговые склоны восточной и западной экспозиции, 4 — кустарниковые заросли можжевельника, 5 — еловые леса, подкروновые участки, 6 — крупнообломочные отложения.

зания и ее существенной межгодовой изменчивости выявить устойчивые ее изменения за последние 25 лет не представляется возможным. Отметим, что за последние 3—4 года на южных склонах сезонномерзлый слой практически не формировался; более характерным был процесс кратковременного (суточного) промерзания—протаивания на глубину до 10 см.

В среднегорье вплоть до верхней границы леса (от 1400—1500 до 2700 м) отмечается устойчивая тенденция к снижению глубины сезонного промерзания в различных ландшафтных условиях за рассматриваемый период. Так, на двух контрастных по ориентации склонах (северный и южный) в центральной части Зайлийского Алатау на абс. выс. 2570 м глубина сезонного промерзания в одинаковых по составу и строению суглинисто-щебенистых грунтах за период с 1975 по 1998 гг. в среднем уменьшилась на 25 см, а на южном склоне соответственно на 21 см. Значение современного тренда уменьше-

ния глубины промерзания для северного склона составляет 1,1 см/год, а для южного — 0,9 см/год (рис. 7). При этом в процессе уменьшения глубины промерзания отмечаются волны ее увеличения с 3—5-летней периодичностью.

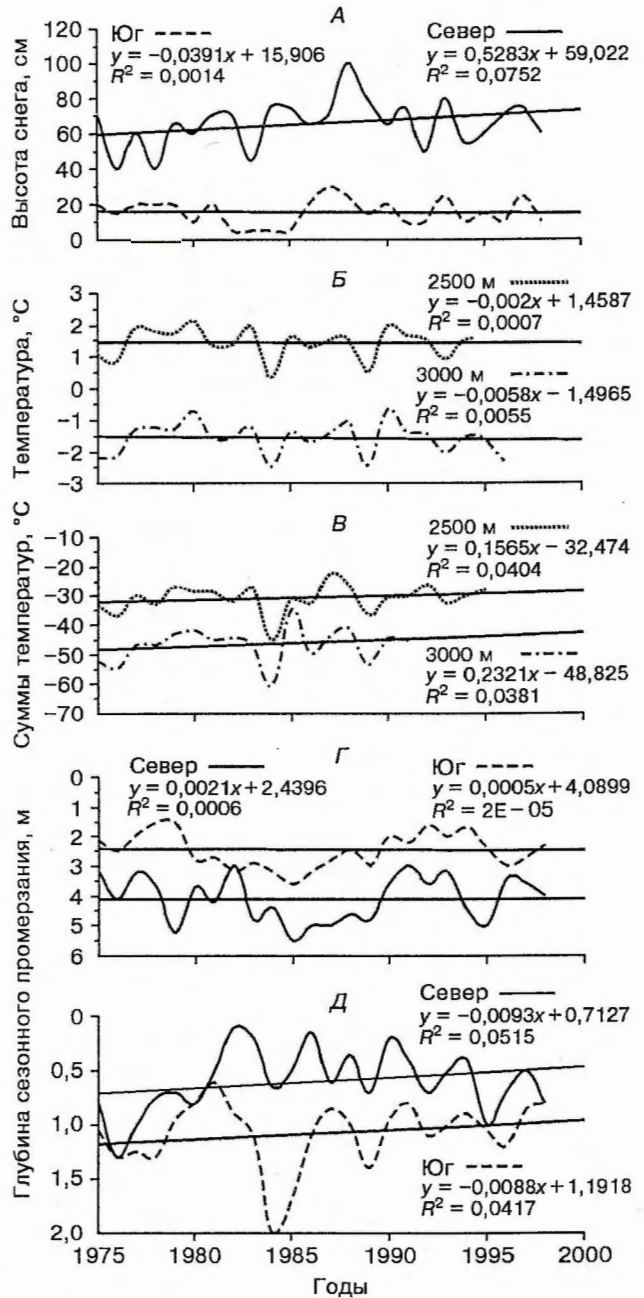


Рис. 7. Мощность снежного покрова на абс. выс. 2500 м (А), средняя годовая температура воздуха (Б), суммы средних месячных отрицательных температур воздуха (В), значения глубины сезонного промерзания на абс. выс. 3000 м (Г) и 2500 м (Д) и их линейные тренды.

Уменьшение глубины промерзания в среднегорье четко согласуется с ходом увеличения снежности и снижения суровости зим, выраженной в суммах отрицательных средних месячных температур воздуха (см. рис. 7). Тренд снижения последних составил $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а тренд увеличения снежности — $0,48\text{ см}/\text{год}$ для северных склонов. Отметим, что средняя годовая температура на высоте 2500 м за рассматриваемый период не изменилась, и ее межгодовая изменчивость находится в пределах естественных колебаний (см. рис. 7). Это еще раз свидетельствует о том, что она не может служить надежным индикатором глубины сезонного промерзания, и более надежным показателем является сумма отрицательных температур воздуха.

Характерной особенностью среднегорного подпояса является изменение глубины промерзания на северных и южных склонах в сравнении с низкогорьем. Здесь выше 1800 м, вплоть до 2700—2800 м малоснежные, с неустойчивым залеганием снега склоны почти всегда промерзают в 1,5—2 раза глубже, чем заснеженные северные, а процесс промерзания носит устойчивый характер. При этом в отдельные зимы, несмотря на значительные различия в режиме и высоте снежного покрова, глубина промерзания на склонах разных экспозиций бывает практически одинаковой. Такое явление за 24-летний период наблюдений здесь отмечалось 4 раза в 1975—1976, 1979—1980, 1994—1995 и 1997—1998 гг. Происходит это при резкой смене теплового периода на холодный, когда температуры грунтов перед началом промерзания на южных склонах на $4\text{—}8\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем на северных. Отмеченное обстоятельство является существенным фактором, сдерживающим начало промерзания, его темп и ход на южных склонах. Интенсивному выхолаживанию северных склонов препятствует сравнительно мощный ($>30\text{ см}$) снежный покров, формирующийся уже после первых снегопадов. Поэтому промерзание на северных склонах происходит одновременно с установлением снежного покрова, а на южных — значительно позже, так как требуется значительное время на их охлаждение.

Таким образом, соотношением двух факторов — различиями в температурах грунтов перед промерзанием и сроками между началом промерзания и установлением снежного покрова — определяется существенная межгодовая изменчивость в интенсивности и глубине промерзания в одних и тех же пунктах [Северский, 1996]. В указанные выше годы складывается эффект равновесного влияния этих факторов на глубину промерзания на склонах разных экспозиций.

Выше 2700—2800 м участки северных склонов находятся в зоне активного ветрового снеготранспорта, формирующегося по типу уплотнения, и его высота здесь значительно (в 2—3 раза) меньше фоновая и зачастую не превышает 30 см. На южных склонах высота снега в среднем на 10—15 см меньше. Здесь, как и в низкогорье, соотношение в глубинах промерзания на склонах разных экспозиций меняется на обратное — северные склоны всегда промерзают на большую глубину, чем южные. На абс. выс. 3000 м средняя глубина промерзания за период 1975—1998 гг. на южных склонах составляет 2,6 м, что в 1,5—2 раза меньше в сравнении с северными, где в отдельные годы формируются даже перелетки. На этих абсолютных высотах не проявляется тенденция в изменении глубины промерзания на северных и южных склонах в течение 23-летнего периода. Межгодовая изменчивость и 3—5-летняя периодичность смен увеличения и снижения глубины промерзания остаются в пределах естественных колебаний, и тренды имеют нулевые значения (см. рис. 7). Таким образом, за последние 25 лет в среднегорье и высокогорье существенных изменений климата в годовом балансе не наблюдается — средняя годовая температура воздуха остается в пределах естественных колебаний и не имеет тенденции к ее изменению. Сезонные характеристики климата имеют другие проявления, в частности в холодный период отмечены устойчивые тренды к снижению отрицательных температур воздуха и увеличению снежности. Вследствие этого в среднегорье до абс. выс. 2700 м произошло заметное (до 31 %) снижение глубины сезонного промерзания на северных и до 18 % — на южных склонах. Выше, вплоть до абс. высот 3000—3100 м тенденций в изменении глубины промерзания на различно ориентированных склонах не отмечается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ геотермических материалов, полученных в Северном Тянь-Шане, показал, что в этом регионе происходят существенные изменения термического состояния многолетнемерзлых пород, вызванные изменением климата. Реакция сезонномерзлых пород на различных абсолютных высотах является неоднозначной. В настоящее время наблюдается активная перестройка пространственных закономерностей распространения мерзлых пород, их температуры, мощности, параметров слоя протаивания и промерзания. В итоге следует ожидать изменений в структуре высотной геокриологической поясности.

Литература

- Горбунов А. П., Северский Э. В., Титков С. Н. Геокриологические условия Тянь-Шаня и Памира. Якутск, 1996, 196 с.
- Марченко С. С. О прогнозе термического состояния мерзлых пород Заилийского Алатау в связи с изменением климата // Гидрометеорология и экология, 1997, № 3, с. 198—208.
- Марченко С. С. Эволюция криолитозоны Северного Тянь-Шаня в голоцене и мерзлотно-климатический прогноз на ближайшие десятилетия // Мат-лы Респ. конф. „Устойчивость, антропогенная трансформация и оптимизация природной среды Казахстана“. Алматы, 1998, с. 74—78.
- Северский И. В., Северский Э. В. Снежный покров и сезонное промерзание грунтов Северного Тянь-Шаня. Якутск, 1990, 181 с.
- Северский Э. В. Особенности сезонного промерзания пород в горах Тянь-Шаня // Мат-лы I конф. геокриологов России, кн. 1. М., 1996, с. 139—148.
- Чистяков К. В., Селиверстов Ю. П., Москаленко И. Г. и др. Проблемы устойчивости внутриконтинентальных горных ландшафтов в изменяющемся мире. СПб., 1994, 94 с.
- Шварцман Ю. Г. Геотермический режим, динамика литосферы и перспективы использования геотермальной энергии Тянь-Шаня // Геотермические исследования в Средней Азии и Казахстане. М., Наука, 1985, с. 236—250.
- Beniston M., Rebetez M. Regional Behavior of Minimum Temperatures in Switzerland for the Period 1979—1993 // J. Theor. Appl. Climatol., 1996, 53, p. 231—243.
- Deeming T. J. Fourier Analysis with Unequally-Spaced Data // Astrophysics and Space Sci., 1975, vol. 36, p. 137—158.

*Поступила в редакцию
17 августа 1999 г.*