

УДК 551.578.462

## О КЛЮЧЕВОЙ РОЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССАХ АБЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ ЛЕДНИКОВОГО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА

Канд. техн. наук Б. С. Степанов

Канд. геогр. наук Р. К. Яфязова

*Считается, что положительные температуры воздуха в период абляции, в условиях ледникового континентального климата, играют роль фона, благоприятствующего процессам таяния ледников. Однако это не позволяет объяснить, почему небольшие изменения глобальной температуры определяют масштабы оледенения горных стран.*

*Анализ теплового баланса ледниковых поверхностей в условиях ледникового континентального климата показал, что температура играет ключевую роль в распределении энергии солнечной радиации на составляющие абляции.*

Важнейшим из факторов, определяющих возможность существования оледенения, является климат. Г. А. Авсюк впервые выделил ледниковые климаты морского и континентального типов [1]. Характерной особенностью морских климатов является относительно высокая сумма годовых осадков, превышающая 1000 мм; таяние ледников осуществляется преимущественно за счет тепла воздуха в ходе турбулентного теплообмена между ледником и атмосферой, конденсация на ледниках преобладает над испарением. Для континентальных ледниковых климатов типична более низкая сумма осадков, таяние льда и снега вызывается преимущественно солнечной радиацией, испарение преобладает над конденсацией. Обширная информация о результатах исследований, выполненных в период МГТ на многих ледниках земного шара.

Ценная информация о распространении оледенения в Зайлийском и Джунгарском Алатау, составляющих теплового баланса ледников получены Н. Н. Пальговым, П. А. Черкасовым, П. П. Кузьминым и другими исследователями. Одним из наиболее важных в этих исследованиях был вывод о ведущей роли солнечной радиации в приходе тепла к тающей поверхности. По мнению П. П. Кузьмина "Стаивание с ледника определяется в первую очередь мощностью солнечной радиации и может происходить при температуре окружающего воздуха, далеко не благоприятной для таяния. Другие факторы имеют второстепенное значение. К их числу следует отнести: температуру воздуха, скорость ветра, испарение, конденсацию, загрязненность ледника и температуру воды ручейков на его поверхности" [5]. Г. А. Авсюк считал, что "Положительные температуры воздуха в период таяния играют в условиях ледников Тянь-Шаня роль как бы фона, благоприятствующего процессам таяния, так как поверхности ледников не испытывают сильного охлаждения. Вследствие этого часто и ночью поверхности ледников если почти не тают, то и не замерзают, что создает благоприятные условия для наиболее полного использования для таяния дневного тепла. Небольшие отрицательные температуры, наблюдающиеся в период таяния, также не сильно охлаждают ледниковые поверхности и, следовательно, не создают серьезных препятствий для таяния". На более важную роль температуры в абляции ледников указывал М. В. Тронов "...чтобы солнечная радиация как фактор абляции была эффективной, необходим общий фон положительных температур. Значение его тройное: 1) снижается величина альбедо ледниковых поверхностей; 2) не замерзают талые воды; 3) не требуется в утренние часы начального нагревания льда до  $0^{\circ}\text{C}$ " [7].

Оценим энергетические затраты, необходимые, в соответствии с вышеприведенным, для того, чтобы "солнечная радиация, как фактор была эффективной". Если допустить, что в результате ночного охлаждения ледниковой поверхности температура льда уменьшается в слое 3 см на  $2,5^{\circ}\text{C}$  и вода в слое 0,1 см превратилась в лед, несложно подсчитать, что энергозатраты близки к  $460 \text{ кДж/м}^2$ . Принимая во внимание, что на горизонтальную поверхность нижней части ледника Центральный Туяксуиский за период абляции 1957 г. поступало  $22\,210 \text{ кДж/м}^2$  день, в 1958 г. -  $18\,600 \text{ кДж/м}^2$  день, и в 1959 г. -

16 590 кДж/м<sup>2</sup> день [6], нетрудно прийти к выводу, что затраты на создание "благоприятного фона" для реализации радиационного фактора не так уж и велики и составляют 2,5 % от общего поступления энергии или около 10 % от энергии воздуха, затрачиваемой на абляцию.

По данным П.А. Черкасова "...на высотах от 3000 до 3150 м альbedo льда быстро увеличивается от 7 до 15 %, затем на высотах 3150-3450 м растет медленнее - от 15 до 23 %, а на высотах 3450 -3550 м его рост вновь убыстряется от 23 до 30 %..." [8]. Однако в течение дня альbedo, вследствие увлажнения поверхности и изменения угла падения солнечных лучей, в каждой из высотных зон изменяется незначительно. Так, значения дневного хода альbedo свежевыпавшего снега при ясной погоде изменяются в пределах 60-76 % [8]. Следовательно, изменение значений альbedo также не может существенно влиять на величину абляции.

Сказанное выше и учет обстоятельства, что примерно 80-85 % тепла, поступающего на поверхность ледников в условиях Средней Азии и Казахстана, приходится на солнечную радиацию и лишь 15-20 % на тепло воздуха [8], как будто подтверждают тезис о второстепенной роли температуры в оледенении гор южных и умеренных широт, где господствует континентальный климат. Однако имеются факты, позволяющие усомниться в правомерности такого вывода. Наиболее важным из них, по нашему мнению, является быстрое уменьшение поверхностной абляции ледников с абсолютной высотой. Действительно, превышение фирновой линии над концами ледников северного склона Заилийского Алатау составляет 400-500 м, разность температур этих уровней близка к 2,6 - 3,2 °С. Возникает вопрос: каким образом столь незначительная разница дневной температуры воздуха над ледником, достигающей в разгар абляции 10 - 12 °С (учитывая, что, к тому же, вклад тепла воздуха в абляцию составляет лишь 15 - 20 %), приводит к резкому уменьшению таяния льда и снега в области питания ?

Поскольку радиационная составляющая теплового баланса поверхностной абляции с увеличением абсолютной высоты местности с высотой местности обычно объясняют возрастанием альbedo поверхности ледников. Однако широкий диапазон изменения ве-

личины альбедо: от 0,1 и даже менее на конце языка ледника, до 0,85 - 0,95 в области питания, характерен лишь для максимума абляции. К началу абляции значения альбедо участков, расположенных на различных высотах, имеют близкие величины. Следовательно, существенная разница в значениях альбедо - следствие физических процессов, протекающих на леднике, но никак не первопричина различной интенсивности абляции. Сказанное подтверждается и тем, что после обильных летних снегопадов, когда альбедо всей поверхности ледника становится практически одинаковым, отражательная способность ледниковой поверхности за считанные сутки восстанавливается.

Для объяснения обсуждаемого феномена целесообразно более подробно остановиться на описании механизмов поверхностной абляции, составляющими которой являются таяние и испарение. Как известно, под таянием понимается фазовый переход льда из твердого состояния в жидкое, происходящий под давлением  $10^3$  гПа при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Удельная теплота плавления льда - 333,6 Дж/г. Под испарением (возгонкой) льда понимается фазовый переход льда из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое состояние. Удельная теплота возгонки льда - 2834 Дж/г. Скорость испарения может быть вычислена с помощью уравнения [2]

$$V = K \frac{D (p_s - p)}{h (p_0 + \alpha)}$$

где  $K$  - константа,  $(p_s - p)$  - дефицит влажности,  $D$  - коэффициент диффузии,  $h$  - толщина диффузионного слоя, в котором давление пара над испаряющимся телом падает от наибольшего значения  $p_s$  до значения  $p$  в окружающей среде,  $\alpha$  - некоторая константа, определяющая максимальное испарение, достигаемое в вакууме при  $p_0 = 0$ .

Испарение имеет место до тех пор, пока пространство над испаряющимся телом не будет заполнено насыщенным паром. При возгонке льда и снега в парообразное состояние переходят наиболее "горячие" молекулы воды, обладающие относительно большими скоростями движения. Вследствие этого температура испаряющихся тел уменьшается. Превращение твердых тел в жидкое состояние имеет

место лишь в том случае, если приток тепла к испаряющемуся телу превышает таковое, теряющееся в ходе испарения. При высокой сухости воздуха и низком атмосферном давлении лед не тает даже при относительно высокой температуре воздуха. Так, в Андах отмечены случаи [7], когда лед не таял при температуре воздуха плюс 15 °С; большие потери энергии льдом в ходе возгонки не позволяли ему нагреться до температуры, при которой лед обретает способность плавиться.

Сказанное выше позволяет объяснить, каким образом незначительное изменение температуры воздуха определяет величину абляции ледников. В зимний период из-за низкой высоты солнца над горизонтом, малой продолжительности облучения солнцем поверхности ледников северного склона Заилийского Алатау за день, относительно низкой температуры воздуха ледники покрыты снежным покровом, имеющим большое альbedo, значение которого мало изменяется от концов языков до областей питания. Энергия, поступающая к ледниковой поверхности, в основном затрачивается на компенсацию энергии, теряющейся при испарении снега и льда. К середине июня поток радиации к поверхности ледника становится близким к максимальному, однако из-за высокого альbedo снежной поверхности около 90 % лучистой энергии рассеивается. К этому времени воздушные массы в полуденные часы способны отдавать поверхности ледника энергию, соизмеримую и даже превышающую по величине энергию солнечной радиации, поглощенную ледником. Однако этой суммарной энергии может еще не хватать для полной компенсации энергии, потребляемой в ходе испарения льда и снега. Наконец возникает ситуация, при которой на конце языка ледника температура воздуха, пусть на короткий период времени, становится такой, что энергия, поглощается ледником, становится больше энергии, затрачиваемой на испарение. К этому времени температура снега устанавливается близкой к 0 °С.

Избыточная энергия затрачивается уже не на энергоемкий процесс - испарения, а на таяние; альbedo тающего снега уменьшается, как это следует из таблицы [3], до 0,7. Все это приводит к почти

20 раз! Начинается бурное снеготаяние. В течение короткого периода времени снег стает полностью и начинается таяние льда. По-



наблюдаться на высотах менее 3000 м и на леднике еще продолжается зима, то 9 августа лето на леднике в полном разгаре и языки ледников лишены снежного покрова.

Зона активной абляции на леднике жестко контролируется температурой воздуха. Об этом наглядно свидетельствуют данные, полученные П. А. Черкасовым в Джунгарском Алатау [8]. Если на языке ледника значения радиационного баланса велики (рис.1б) и имеет место интенсивная абляция, то в зоне питания радиационный баланс энергии может иметь даже отрицательные значения; и это несмотря на то, что под прямой солнечной радиацией порой имеет противоположную структуру (рис. 1а).

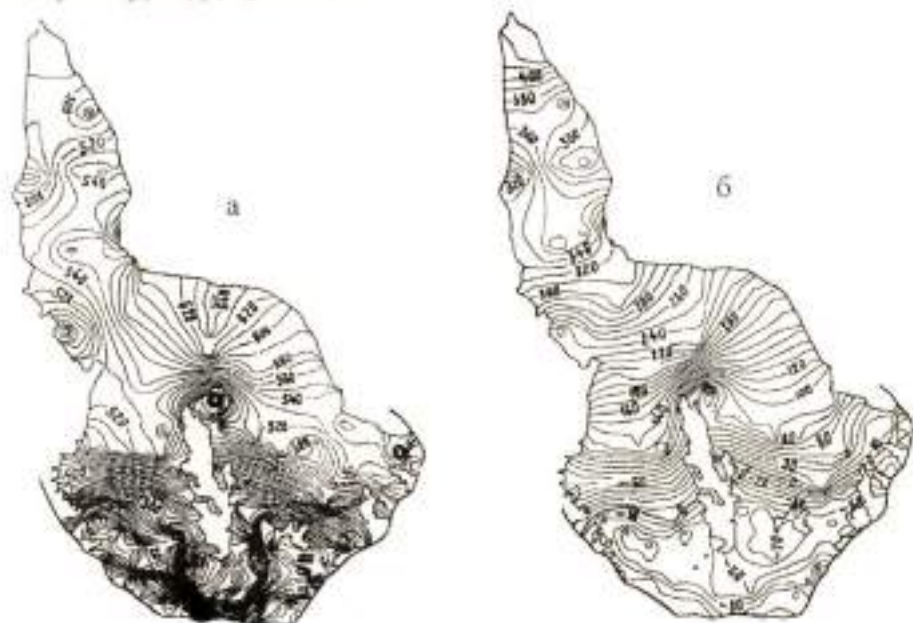


Рис.1. Поля солнечной радиации на физической поверхности ледника Шумского 8 августа в ясную погоду:  
а - прямая солнечная радиация; б - радиационный баланс.

Лишь в очень редких случаях таяние охватывает всю зону абляции, причем интенсивность таяния в верхней части языка ледника может превышать таковую у его конца. Происходит это в тех случаях, когда над всей поверхностью ледника температура воздуха устанавливается настолько высокой, что влияние температурного градиента с лихвой компенсируется более высоким фоном радиации, обуслов-

ленным увеличением прозрачности атмосферы с высотой местности. Значительное уменьшение испарения и, следовательно, увеличение таяния могут наблюдаться в отсутствие ветра или при высокой относительной влажности воздуха. Благоприятные условия для таяния в дневное время могут создаваться в результате горно-долинной циркуляции, когда теплые массы воздуха по долинам рек поднимаются к ледникам. В результате подъема температура воздушных масс несколько уменьшается, однако относительная влажность воздуха может достигать предельных значений, что приводит к ослаблению и даже прекращению испарения. Механизм абляции (испарение или таяние) может существенным образом сказаться на величине абляции ледников. На рис. 2 [4] показаны измеренное и гипотетическое таяние, которое наблюдалось бы в том случае, если вся энергия, затраченная на испарение, была бы израсходована на дополнительное таяние. Анализ данных по леду Хинтеррайсфернер (Альпы), выполненный Г. Касером, показал, что если бы все тепло, расходуемое на испарение, было целиком затрачено на таяние льда и снега, то за период с 1953 г. по 1982 г. общее изменение абляции по сравнению с действительной -  $773 \text{ г/см}^2$  - возросло бы до  $1898 \text{ г/см}^2$ . Подчеркивая энергетическую важность испарения в условиях Центральных Альп, Г. Касер указывает, что для засушливых областей этот эффект должен быть еще больше.

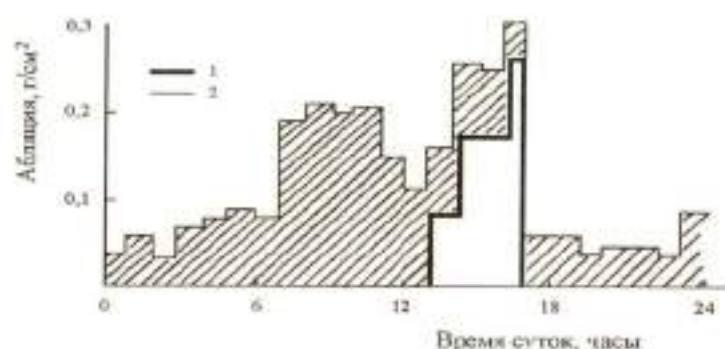


Рис. 2. Абляция льда ледника Хинтеррайсфернер на высоте 2500 м 25 августа 1980 г.:

1 - измеренная; 2 - гипотетическая.



По данным П. И. Пальгова испарение с поверхности льда Центральный Туускуйский составляет 125 мм/год. Если бы тепло, затрачиваемое на испарение, использовалось на таяние, то это привело бы к практическому удвоению абляции.

Понимание ключевой роли температуры в механизме абляции в условиях континентального ледникового климата позволяет объяснить, каким образом незначительное изменение глобального климата Земли оказывает радикальное влияние на характер оледенения горных стран.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсюк Г. А. Температурное состояние ледников // Изв. АН СССР. Сер. геогр. - 1955. - № 1. - С. 14 - 31.
2. БСЭ. - М.: Большая советская энциклопедия. - Т.18. - С. 596.
3. Гляциологический словарь. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - С. 41.
4. Касер Г. Роль испарения с поверхности снега и льда в балансе массы ледника // Материалы гляциологических исследований. - 1986. - Вып. 57. - С. 59 - 63.
5. Пальгов Н. Н. Современное оледенение в Заилийском Алатау. - Алма-Ата: Наука, 1958. - 313 с.
6. Токмагамбетов Г. А. Ледники Заилийского Алатау. - Алма-Ата: Наука, 1976. - 367 с.
7. Тронов М. В. Ледники и климат. - Л.: Гидрометеиздат, 1966. - 407 с.
8. Черкасов П. А. Радиационный баланс физической поверхности горного ледника в период абляции. - Алма-Ата: Наука, 1980. - 144 с.

Казахский научно-исследовательский институт  
мониторинга окружающей среды и климата

## СЕҢГІР МҮЗ КОНТИНЕНТАЛЬДІК КЛИМАТ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ АБЛЯЦИЯ ПРОЦЕССИНДЕГІ ТЕМПЕРАТУРАНЫҢ МАҢЫЗДЫ РОЛІ ТУРАЛЫ

Техн. ғ. канд.  
Геогр. ғ. канд.

Б. С. Степанов  
Р. К. Яфязова

Сеңгір мұз континенталдық климат жағдайында өтіп жатқан абляция процессінде сеңгір мұздардың еруіне қолайлы жағдай тудыратын себеп ретінде ауаның оң температурасы деп саналады. Бірақ бұл жағдай, жер шарының температурасының аз өзгеру тұрғысынан таулы елдердің мұз басу көлемдерін осы күнге дейін түсіндіре алмай келеді. Сеңгір мұз континенталдық климат жағдайында, сеңгір мұз беткейлерінің жылу баланстарын талдау температураның күн радиация энергиясының абляция құрамаларына таралуында маңызды роль атқаратынын көрсетті.