

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕДНИКОВ*

© 1999 г. Ш. А. Даниелян

Ереванский государственный университет, географический ф-т, РА
375025 Ереван ул.А.Манукяна, 1, Республика Армения

Поступила в редакцию 04.05.95

Расчеты показывают, что энергетические возможности ледников и мощных ледниковых покровов очень ограничены. Механизм движения ледника с учетом физических и реологических свойств льда доказывает, что все ледниковые образования находятся в крепко примерзшем с ложем состоянии, на границе с которым образуется неподвижный тонкий слой льда – "пограничный слой", вследствие чего вся энергия и мощность ледника затрачиваются на преодоление внутреннего трения (вязкости) льда. Все это свидетельствует о том, что ледники не скользят по ложу, а, следовательно, и не могут производить работы эрозионного характера.

Идея о существовании древних оледенений Земли возникла более полутора века тому назад. И, как это ни странно, возникла она не у специалистов – геологов и географов, а у альпиниста Жан-Пьера Парродена, который поделился этой идеей с инженером-дорожником И.Венцом. Поддержав эту идею, он в 1821 и 1829гг. выступил с докладами в Швейцарском обществе естествоиспытателей.

Спустя несколько лет (1834г.) там же, с изложением основ ледниковой гипотезы выступил Жан де Шарпантье. Присутствовавший на докладе Жан Луи Рудольф Агассис скептически отнесся к этой гипотезе, завязав спор с ее автором. Жаркий спор закончился тем, что стороны решили более детально разобраться у самого ледника. В результате посещения Ронского ледника Агассис признал свою ошибку и с этого дня активно взялся за исследование ледников, став ярким апологетом этой гипотезы. С результатами своих исследований Агассис в 1837г. выступил на заседании общества, где впервые произнес фразу "Великий ледниковый период", а в 1840 г. вышла в свет его книга "Исследование ледников". Благодаря упорному труду Агассиса, ледниковая теория получила право гражданства в Англии, США, позже в Германии (1875г.) и в России (1876г.) с выходом в свет книги П.А.Кропоткина "Исследование о ледниковом периоде".

Ледниковая теория одержала победу во всем мире и заняла господствующее положение в науках о Земле.

Как ни странно, ледниковая теория заняла это положение будучи в стадии гипотезы, тогда как еще не был должным образом исследован ни один из ледниковых покровов Земли, не говоря уже о том, что еще не были исследованы энергетические возможности ледников, а также физико-реологические свойства льда. Об этом Агассис в книге "Геологические очерки" самокритично писал: "Я не имею намерения излагать в этих кратких очерках общую теорию ледников на основании физических и механических начал. Я несколько занимался ледниками просто как любитель..., но все, что я говорю о механической стороне ледников в связи с их строением, выражено не языком специалиста, а просто любителя, без всякой попытки вдаваться в подробности физических рассуждений. Я не

* Печатается в порядке дискуссии (ред.)

удивлюсь, впрочем, что в отношении физических и механических начал, связанных с их строением и движением, находят мою теорию весьма недостаточной" [1].

О несовершенстве ледниковой теории говорил и П.А.Кропоткин: "Пока мы не будем иметь такой работы, которая даст нам возможность каждое из известных ныне явлений в геологии поверхностных образований отнести к строго научно-ближайшей его физико-географической причине, до тех пор все наши попытки решать вопросы о ледниковом периоде сохраняют тот характер случайности и произвола, который они до сих пор имеют" [3].

С тех пор как были написаны эти слова прошло более 120 лет и, если тогда еще не был исследован ни один ледниковый покров, то теперь, когда все ледники и ледниковые покровы изучены достаточно подробно, с применением новейших технических средств и методов геофизических, химических и микробиологических исследований, по-прежнему сохраняется тот же характер случайности и произвола в ледниковой теории, и нет пока ни одной работы, которая строго бы доказывала правильность ледниковой концепции, всесторонне научно обосновав и подкрепив эту теорию введением элементов математического и физического анализа.

Как известно, с воздействием ледниковых покровов многие исследователи связывают образование четвертичных отложений и рельефа северных областей Европы, Азии и Северной Америки, общая площадь которых достигала 45 млн. кв. км [4]. Чтобы считать эти представления правильными, нужно доказать, что приписываемая ледникам колоссальная осадко- и рельефообразующая работа соответствует их энергетическим возможностям. В противном случае при объяснении причины образования так называемых ледниковых отложений и форм рельефа указанных областей от ледникового фактора следует отказаться.

При движении ледник обладает определенной *кинетической энергией*, величина которой выражается через массу M и скорость движения V по известной формуле:

$$W = \frac{MV^2}{2}.$$

Однако подсчитать этот вид энергии в ледниках очень трудно, т.к. отсутствуют конкретные данные о средних скоростях движения всей массы современных ледников и, тем более, древних ледниковых покровов Земли. Для многих ледников и некоторых частей ледниковых покровов к настоящему времени имеются сведения о скоростях движения в определенных точках и преимущественно по приповерхностным слоям. Однако этих данных недостаточно, чтобы определить средние скорости движения всей массы ледника.

В настоящей статье при определении кинетической энергии использованы данные по одному из наиболее полно изученных — леднику Федченко, длина которого превышает 70 км, средняя ширина составляет около двух километров и мощность (толщина) льда местами достигает 1000 м. Сведения о скоростях движения в нижних слоях этого ледника отсутствуют и вычислены путем экстраполяции, основываясь на закономерностях изменения скоростей в вертикальном сечении ледников.

В осевой зоне поверхностного слоя скорость движения ледника Федченко составляет 130 м/год или $4 \cdot 10^{-6}$ м/сек. Поскольку средняя скорость движения этого ледника неизвестна, она рассчитана, исходя из поверхностной скорости в осевой части ледника, которая постепенно уменьшается как к бортам долины, так и вглубь, и на контакте с ложем

снижается до значений, близких к нулю. Она составляет около $1,3 \cdot 10^{-6}$ м/сек или около 43 м/год.

Учитывая массу (M) ледника Федченко, которая составляет около $9 \cdot 10^{16}$ г, и указанную выше среднюю скорость, получим кинетическую энергию всего тела ледника по формуле

$$W = \frac{MV^2}{2} = \frac{9 \cdot 10^{16} \cdot 1,3^2 \cdot 10^{-12}}{2} = 7,6 \cdot 10^5 \text{ эрг} = 0,76 \text{ Дж}.$$

Таким образом, кинетическая энергия одного из наиболее крупных горно-долинных ледников мира составляет всего лишь 0,76 Дж. Эта энергия настолько мала, что ее недостаточно даже для того, чтобы сдвинуть с места небольшую гальку, т.к. она распределена по всей массе ледника и не может быть сосредоточена в одной точке.

Основываясь на этом примере, можно уверенно говорить о том, что кинетическая энергия ледников не может выполнить заметной работы эрозионного или транспортного характера. Только в исключительных случаях она может достигать значительных величин. К ним относятся так называемые катастрофические подвижки горно-долинных ледников, например, ледника Медвежьего на Памире в 1976 г., когда скорости движения льда очень резко возрастают. В таких случаях огромные ледяные глыбы, оторвавшись от основной массы ледника, движутся путем скольжения по его поверхности или по ложу, разрушая все на своем пути. Подобная форма движения ничего общего не имеет с движением ледников, носящим характер вязкого течения, сходного по своим законам с течением жидкостей, и эти два вида движения ледников нельзя смешивать друг с другом.

Поскольку величина кинетической энергии зависит, в первую очередь, от скорости движения, то в леднике она распределяется в соответствии с законом распределения скоростей: наибольшие ее значения наблюдаются в верхних слоях, имеющих самые большие скорости движения, а наименьшие, до минимальных значений, — в придонных слоях, непосредственно примыкающих к ложу ледника. Изменение кинетической энергии ледника от его поверхности к ложу происходит пропорционально квадрату разности скоростей в соседних слоях ледника. Также закономерно кинетическая энергия ледника изменяется и в горизонтальных сечениях: максимальные ее значения наблюдаются в осевой зоне, а у бортов долины сокращаются до минимума.

У ледников покровного типа минимальные значения кинетической энергии наблюдаются в центре оледенения, постепенно возрастая в радиальном направлении, достигая максимума в периферийной зоне. Закономерность распределения энергии по вертикали в теле покровного ледника такая же, как и у горно-долинного ледника.

Таким образом, кинетическая энергия и горно-долинных, и покровных ледников настолько мала, что она не в состоянии производить заметной механической работы.

Потенциальная энергия является единственной из всех видов энергий ледника, которая не только имеет огромные запасы, но и способна путем превращения в другие виды энергии совершать работу механического характера. Автором произведен подсчет запасов этого вида энергии для ледника Федченко.

Из механики известно, что величина потенциальной энергии тела U зависит от величины его массы M и абсолютной высоты нахождения тела (в пределах гравитационного поля Земли) H и выражается форму-

лой $U = MgH$, где g — ускорение силы тяжести Земли. Средняя абсолютная высота (центра тяжести) ледника Федченко составляет около 3950 м, поэтому его рассчитанная потенциальная энергия составляет:

$$U = MgH = 9 \cdot 10^{16} \text{ г} \cdot 981 \text{ см/с}^2 \cdot 395 \cdot 10^3 \text{ см} = 35 \cdot 10^{24} \text{ эрг} = 35 \cdot 10^{17} \text{ Дж.}$$

Для ледникового покрова Антарктиды рассчитанный нами запас потенциальной энергии составляет:

$$U = 255 \cdot 10^{21} \cdot 981 \cdot 204 \cdot 10^3 \text{ см} \approx 5 \cdot 10^{30} \text{ эрг} = 5 \cdot 10^{23} \text{ Дж.}$$

Таким образом, запасы потенциальной энергии горно-долинного ледника Федченко и Антарктического ледникового покрова очень велики. Однако эта колоссальная энергия за короткий промежуток времени не может перейти в другие виды энергии, следовательно, она не может совершить механической работы. Она будет сохраняться до тех пор, пока ледники не начнут двигаться. Другими словами, потенциальная энергия ледника может произвести механическую работу только тогда, когда ледник теряет абсолютную высоту своего залегания.

Энергетическая мощность ледника

Скорость перехода потенциальной энергии в другие виды энергии зависит от энергетической мощности ледника. В дальнейшем изложении энергетическая мощность ледника будет именоваться просто мощностью. Во избежание путаницы, в настоящей статье принятый в геологии термин "мощность", обозначающий толщину слоя, заменен термином "толщина льда".

Мощность ледника определяется его массой и средней скоростью перемещения вниз по склону (потеря высоты). Предположим, что ледник с массой M расположен на средней высоте над уровнем моря H . Через некоторое время t , в результате движения по наклонной поверхности ложа, он переместится до высоты H_1 , т.е. его высота уменьшится на величину $h = H - H_1$.

Разность потенциальной энергии на высотах H и H_1 составляет:

$$\Delta U = U - U_1 = Mg(H - H_1) = Mgh. \quad (1)$$

Согласно закону сохранения и преобразования энергии эта разность энергии ΔU не теряется, а преобразуется в другие виды энергии (кинетическую, тепловую и др.). Только поэтому потенциальная энергия и может совершать работу механического характера. Так, для того же ледника Федченко, при опускании его массы на величину $h = 20$ м, изменение потенциальной энергии составит:

$$\Delta U = 9 \cdot 10^{16} \cdot 981 \cdot 2000 \approx 177 \cdot 10^{21} \text{ эрг} = 177 \cdot 10^{14} \text{ Дж.}$$

Поскольку мощность N представляет собой изменение энергии ΔU за единицу времени, что равносильно совершению работы A за то же время, то она запишется в виде

$$N = \frac{\Delta U}{t} = \frac{A}{t} = \frac{Mgh}{t}. \quad (2)$$

Так как отношение h/t представляет собой среднюю скорость опускания массы ледника на высоту h , то, заменив отношение h/t на V_h в (2),

получим:

$$N = MgV_h. \quad (3)$$

При натуральных наблюдениях замеряются скорости движения ледников по наклонной поверхности ложа V , тогда как скорость их вертикального перемещения (опускания) V_h замерить практически нельзя. Поэтому последнюю получим путем расчета по формуле:

$$V_h = V \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

где α — угол среднего наклона ледника к горизонту (угол падения ледника). Как известно, в поперечном сечении скорости движения ледника сильно изменяются: от минимальных значений на контакте с ложем до максимальных в области, близкой к средней зоне поверхностного слоя. Для расчета же средней мощности необходимо оперировать средними значениями скорости V_{cp} в его поперечном сечении.

Тогда получим:

$$N = MgV_{cp} \cdot \sin \alpha. \quad (5)$$

Рассчитанная при этих условиях средняя скорость перемещения ледника Федченко по вертикали равна $1,3 \cdot 10^{-4}$ см/с; средний угол наклона поверхности ледника составляет около 2 градусов, соответственно $\sin \alpha$ равен 0,035. Подставив эти значения в формулу (5), получим:

$$N = 9 \cdot 10^{16} \cdot 981 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,035 \approx 4 \cdot 10^{14} \text{ эрг/с} \quad 4 \cdot 10^4 \text{ кВт.}$$

Таким образом, мощность одного из величайших горно-долинных ледников мира, составляющая 40 тыс. кВт, не превышает мощности небольшой горной речки с расходом воды не более $5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Как следует из формулы (5), мощность ледника зависит от средней скорости перемещения центра его массы вниз. Однако, средняя скорость не дает четкого понятия о том, какая часть этой мощности ледника расходуется на совершение им эрозионной работы. Последнюю в леднике могут производить только те его слои, которые непосредственно примыкают к ложу, поэтому только за счет расходования энергии этих слоев может быть совершена эрозионная работа ледника. Если же учесть, что распределение мощности в вертикальном сечении ледника пропорционально распределению скоростей движения в нем, то из той же формулы (5) вытекает, что основная доля мощности горно-долинного ледника приходится на зоны с максимальными скоростями. В слоях же, непосредственно примыкающих к ложу и входящих в непосредственный контакт с последним, эта мощность имеет очень малую величину, тогда как для совершения механической, в частности, экзарационной работы эти слои должны обладать наибольшей мощностью.

Вопросы удельной мощности и интенсивности экзарации ледников являются узловыми в современной гляциологии, так как обоснованность ледниковой теории в конечном счете зависит от того, способны ли ледники производить экзарационную работу.

Наиболее полное представление об эрозионной способности ледников может дать величина их удельной мощности, т.е. величина мощности, приходящейся на единицу площади поверхности контакта ледника с ложем.

Величина удельной мощности N_s для ледника Федченко рассчитана, исходя из значения средней мощности N , равной $4 \cdot 10^4$ кВт, и площади контакта льда с ложем S , равной 187 км^2 .

$$N_s = \frac{N}{S} = \frac{4 \cdot 10^7 \text{ Вт}}{187 \cdot 10^{10} \text{ с м}^2} \approx 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/см}^2.$$

При этом удельная мощность ледника оказалась в несколько тысяч раз меньше удельной мощности той реки, которая возникла бы при полном таянии этого ледника, при условии, что расход этой предполагаемой реки будет равен современному расходу льда в этом леднике (в пересчете на воду) [2].

Как известно, лед обладает очень большой вязкостью, коэффициент которой превышает $5 \cdot 10^{17}$ пуаз. Вследствие этого, почти вся мощность ледника расходуется на преодоление сил вязкости (внутреннего трения льда), в результате чего его удельная мощность, имеющая итак очень малые значения, оказывается еще меньше. Если силы трения между ледником и ложем (силы внешнего трения) меньше сил внутреннего трения льда, то под воздействием тангенциального напряжения движение льда будет происходить путем его скольжения по ложу. При преобладании же сил внешнего трения над внутренним трением это движение будет осуществляться путем деформации льда, в условиях преодоления его внутреннего трения.

Из проведенных расчетов следует, что практически вся энергия ледников расходуется на преодоление внутреннего трения, а для преодоления внешнего трения (т.е. для эрозионной работы) у ледника не остается энергии.

Закключение

Путем лабораторных исследований доказано, что в зоне контакта ледника с горными породами ложа возникают тангенциальные напряжения, в десять раз превосходящие предел текучести льда. С этим строго согласуется введенное нами понятие "пограничного" слоя льда, с наличием которого внешнее трение ледника заменяется внутренним трением, а энергия ледника затрачивается на преодоление вязкости льда, тем самым обеспечивая самодвижение ледника с минимальным расходом энергии. Этот вывод находится в полном соответствии с законом динамического воздействия тел и жидкостей [5].

Сказанное служит бесспорным доказательством того, что ледниковые покровы находятся в крепко примороженном состоянии с ложем.

ՍԱՌՑԱԴԱՇՏԵՐԻ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՄՈԴԵԼԸ

Շ. Ա. Դանիելյան

Ա մ փ ո փ ու մ

Սառցադաշտերի էներգետիկ կարողությունների (էներգիայի հզորությունների) հաշվառման միջոցով պարզվում է, որ սառցադաշտերի և նույնիսկ սառցային հզոր ծածկույթների էներգետիկ կարողությունները խիստ սահմանափակ են, իսկ շարժման մեխանիզմը էներգետիկ կարողությունների, ինչպես նաև սառույցի ֆիզիկական ու ռեոլոգիական հատկությունների հաշվառմամբ ապացուցում է, որ դրանց միջև գոյանում է մի շատ բարակ անշարժ սառույցի շերտ՝ «սահմանային շերտ», որի հետևանքով սառցադաշտի ամբողջ էներգիան ու հզորությունը ծախսվում է սառույցի ներքին շփման (մածուցիկություն) հաղթահարման վրա: Այդ բոլորը վկայում է, որ սառցադաշտերը հատուկի հետ չեն շփվում, հետևաբար և էրոզիոն բնույթի աշխատանքներ կատարել չեն կարող:

AN ENERGY MODEL OF GLACIERS

Sh. A. Danielyan

Abstract

The calculations show that energy potential of glaciers thick glacial covers is very limited. Glacier's motion mechanism together with physical and rheological properties of ice proves that all glacier formations are firmly frozen to beds on the interfaces with which immobile thin ice layer so called boundary layer – is formed. Due to this fact the whole energy of glacier is spent to overcome internal friction (viscosity) of ice. This evidences that glaciers do not glide on beds, and hence cannot cause erosion.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агассис Ж.Л.Р. Геологические очерки. СПб. 1867.
2. Вольдштедт П. Проблема террасообразования. – В кн.: Вопросы геологии четвертичного периода. М.: Изд.ИЛ, 1955.
3. Кропоткин П.А. Исследование о ледниковом периоде. СПб. 1876.
4. Марков К.К. Антигляциализм. – Изв.АН СССР, сер.геогр., 1955, №1.
5. Милович А.Я. Теория динамического воздействия тел и жидкостей. М.: 1955.