

УДК 551.34

ШВЕЦОВ П. Ф., КОРЕЙША М. М.

ОБ ЭКЗОГЕННОМ ПРОЦЕССЕ, НАЗЫВАЕМОМ НИВАЦИЕЙ

Дано определение нивации как термогенного процесса разрушения горных пород. Показаны основные термодинамические факторы, определяющие этот процесс на границе снежника и оголенных горных пород. Отмечено активное воздействие солнечной энергии и пассивное — охлажденных горных пород и приснежникового воздуха на развитие процесса нивации.

Широко распространенный процесс — нивация не имеет четкого определения. Э. Мартонн назвал нивацией «совокупность явлений, видоизменяющих поверхность земли в тех районах, где большую роль играет снежный покров, но не вечные снега — область ледниковых процессов» [1, с. 857]. В Энциклопедическом словаре географических терминов [2] и БСЭ [3] понятие, обозначаемое термином «нивация», определено точнее: «Нивация (от латинск. *nivis* — снег) — рельефообразующий процесс, протекающий под действием снега главным образом в полярных, субполярных и высокогорных районах. Необходимым условием нивации служит колебание температуры воздуха около точки замерзания воды и поступление воды от тающих снежников. Под влиянием этих условий горные породы разрушаются и мелкие частицы уносятся водой. Более крупные обломки выносятся из-под снежников вместе с грязью, насыщенной водой» [3, с. 556]. Такое или сходные определения понятия «нивация» содержатся в большинстве монографий и учебных пособий по общей и региональной геоморфологии. В них указываются два непеременимых условия интенсивного развития этого рельефообразующего процесса — наличие кромки снежника и периодическое изменение (колебание) температуры приземного воздуха с переходом через точку замерзания воды — таяния льда. Мало или совсем не говорится о самом процессе разрушения и физической роли снежника как «разрушителя» горных пород, слагающих борта и дно нивальной ниши, кара, заполненных зимой снегом. Что представляет собой край тающего снега — силу, источник или сток энергии? И о какой энергии может идти речь в данном случае?

Ответы на эти вопросы необходимы, поскольку любое разрушение горных пород, особенно скальных, немыслимо без затраты энергии. Понятие силы очень мало или совсем ничего не дает в анализе исследуемого процесса, как и во множестве других случаев. «Во всяком отдельном случае можно убедиться, — полагал В. Оствальд, — что гораздо целесообразнее ставить первый вопрос не о силах, а о работах или вообще энергиях и, определив их, приступить к дальнейшим вычислениям» [4, с. 125].

Для деформирования горной породы (совершения работы деформации) до предела прочности ее на растяжение, сдвиг и изгиб необходим источник потенциальной энергии. Он должен быть достаточным, чтобы массив или монолит породы разрушился и в нем образовались новые поверхности разрыва (трещины). Необходимая потенциальная энергия может быть частью общей внутренней энергии самой породы. Но откуда

она берется, где ее источник в сезоны наиболее интенсивного деформирования и разрушения оголенной породы, граничащей с кромкой тающего снежника? В геоморфологических обобщениях нам не удалось найти ответа на этот физико-геологический вопрос, поставленный уже в начале XX в. [5]. Лишь в труде И. С. Щукина [6] рассмотрена рельефообразующая роль навейных снежников с зимними сезонами без оттепелей.

Много таких снежников, сохраняющихся все или почти все лето ниже местной снеговой границы, авторы наблюдали на склонах гор Северо-Востока СССР; широко распространены снежники во всех высокогорных районах. Толщина снежников невелика, они неподвижны относительно каменистого ложа. Этим они отличаются от ледников, распространенных в горах Сунтар-Хаята, горной системе Черского и в других горных районах СССР [7].

Снежники весьма существенно проявляют себя как рельефообразующий фактор, отмечает И. С. Щукин. «Их роль в этом отношении состоит в том, что при таянии они увлажняют подстилающую породу и при суточных колебаниях температуры около точки нуля способствуют ее морозному выветриванию. Последнее протекает особенно энергично по краям снежника, тогда как в его средней части более мощная толща снега предохраняет грунт от резких колебаний температуры» [6, с. 535]. Более подробно этот и другие сопутствующие ему процессы описаны Н. А. Солнцевым [8]. К сожалению, единство нивации как процесса доказывается этим исследователем главным образом на основе сходства самих форм рельефа (нивальных ниш, каров), вне зависимости от энергии процесса и свойств подстилающих пород, что не всегда правильно [7, 9]. В качественных описаниях рельефообразующей деятельности снежников И. С. Щукин и Н. А. Солнцев подчеркивали действенную роль их краев, смежных с оголенным дном или бортом нивальной ниши, кара. Но дальше такого объяснения роли снежника в процессе, названном нивацией, геоморфологи и специалисты по физическому выветриванию скальных горных пород не пошли. Для этого нужна помощь термодинамики, вскрывающей источник и возможность проявления потенциальной энергии, необходимой для выполнения значительной работы. Речь идет о механической работе, немислимой без теплообменной физико-геологической системы: оголенная горная порода — снег и воздух. Процесс нивации — одно из ярких проявлений термогенной потенциальной энергии оголенной породы в приснежниковой полосе [10]. Ни снег, ни мороз не могут быть источниками энергии, необходимой для экзогенного процесса, называемого нивацией. Известно, что второе начало термодинамики исключает возможность самопроизвольного перехода тепла (внутренней энергии) от холодного тела системы к теплему телу или от холодной части одного тела к теплой его части.

Тепло к рассматриваемой системе может поступить в первой половине цикла нагревания — охлаждения (утром и днем или весной и летом) только от Солнца. Само собой разумеется, что солнечная радиация (прямая и рассеянная) аккумулируется главным образом в оголенной породе — скалистом деятельном слое (ДС). Снеговой деятельный слой отражает 85—90% лучистой энергии и даже в самый жаркий день не нагревается больше, чем до температуры 273,16 К (0° С). Температура подснежной горной породы, как правило, ниже этой точки и мало изменяется в суточном теплообменном цикле. Порода, покрытая снегом высотой более 0,25 м, находится в состоянии термомеханического равновесия.

Чтобы понять и объяснить интенсивность физического выветривания оголенной скалистой породы в приснежниковой полосе нивальной ниши, кара или цирка, целесообразно воспользоваться моделью тепловой машины [11]. Роль нагревателя в ней играет солнце, роль теплоприемника (резервуара солнечного тепла) — деятельный слой оголенной породы,

рабочим телом служит сильно нагреваемая днем порода, а роль холодильника играют снежник и приснежный воздух. Для простоты дальнейших рассуждений представим, что нагреваемая днем оголенная порода играет роль теплоприемника и рабочего тела в рассматриваемой природной машине Солнце — грунт — снежник и воздух.

Происходящий в нагреваемой оголенной породе (НОП) термодинамический процесс, отличный от цикла Карно идеальной тепловой машины, четко делится на две части. Первая, соответствующая нагреванию оголенной породы солнечными лучами (в первой половине дня), описывается уравнением, выражающим принцип сохранения энергии (первый закон термодинамики):

$$Q_1 = U_2 - U_1 + P\Delta V, \quad (1)$$

где Q_1 — тепло, полученное оголенной породой от ДС при облучении его Солнцем (утром и днем); U_1 — внутренняя энергия оголенной породы перед нагреванием ДС; U_2 — внутренняя энергия ее в конце нагревания (начала охлаждения) ДС; P — внешнее давление на монолит породы; ΔV — увеличение объема монолита нагреваемой оголенной породы.

Обозначив положительную работу $P\Delta V$, выполненную нагреваемой породой, через A_1 , получим соотношение (1) в еще более простой форме:

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1. \quad (2)$$

Результат второй части цикла, т. е. охлаждения оголенной горной породы в вечернее и ночное время вследствие отдачи ею тепла снегу и воздуху, выразится соотношением

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2, \quad (3)$$

где Q_2 — тепло, отданное оголенной горной породой снегу и холодному приснежному воздуху; A_2 — работа, совершенная монолитом оголенной породы при быстром ее остывании (вечером и ночью). Сложение (2) и (3) дает

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2.$$

Это соотношение показывает, что некоторое количество тепла $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ пошло на производство работы $A_1 - A_2$, причем A_2 имеет отрицательный знак. Значит, два вида работы, совершенные тепловой машиной в рассмотренном цикле, складываются. Отношение

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (4)$$

называется коэффициентом полезного действия тепловой машины.

Суточный цикл нагревания и охлаждения оголенной скалистой породы необратим. Единственная характеристика процесса, имеющая термодинамическое значение, заключается в том, что система произвела некоторое количество работы. Единственным видом работы, совершенной оголенным монолитом при его охлаждении, следует считать работу по образованию новых поверхностей (трещин), выполненную за счет некоторой части внутренней энергии. Последняя соответствует так называемой свободной энергии Гиббса. С учетом сказанного механический эффект второй стадии термодинамического процесса в оголенной горной породе выражается следующим соотношением:

$$\sigma dF = \Delta Q - dU - PdV, \quad (5)$$

где σ — поверхностное натяжение новых поверхностей раздела (трещин); F — площадь новых поверхностей.

Коэффициент полезного действия (КПД) рассматриваемой тепловой машины по (4) определяется разностью температуры рабочего тела

(оголенной породы) и холодильника (воздуха и снега):

$$\eta = \frac{T_{\text{оп}} - T_{\text{в}}}{T_{\text{в}}},$$

где $T_{\text{оп}}$ — температура нагретой оголенной породы; $T_{\text{в}}$ — температура приземного или приснежного воздуха.

Значит, чем больше разница $T_{\text{оп}} - T_{\text{в}}$, тем выше коэффициент полезного действия теплообменной геосистемы оголенная порода — приземный или приснежный воздух. Температура последнего может быть около 0° (не выше 5°C), в то время как температура оголенной породы может достигать $30-50^{\circ}$. При этом условии КПД тепловой машины ДС — оголенная порода — воздух близок к 0,03, т. е. значительно меньше КПД паровоза.

На слегка наклонных участках Гиссарского хребта с абс. отметками более 2500 м температура оголенного грунта поднималась к середине июньского дня до 56° , а приснежного воздуха — только до 5°C . Суточная амплитуда температуры первого достигала 58° , второго не превосходила 10° . Даже в удалении от снежника температура приземного воздуха изменялась в течение суток только на 18° . На Кавказе вблизи конца Марухского ледника на высоте 2500 м даже средняя суточная температура оголенной поверхности в летнее время колеблется от близкой к 0° до $20-22^{\circ}$, причем последняя почти всегда в 2 раза и более выше температуры воздуха (на высоте 2 м). На Алтае также вблизи концов ледников (Актру) на высоте 2150 м средняя суточная летняя температура поверхности достигает $20-30^{\circ}\text{C}$, с тем же отношением к температуре воздуха, что и на Кавказе [12].

В гораздо более суровых климатических условиях в горах Сунтар-Хаята на высоте около 2000 м вблизи ледников, в зоне массового развития перелетывающих снежников отмечалась неоднократно температура оголенной поверхности до $25-30^{\circ}$ с почти ежедневными заморозками в ночное время, тогда как максимумы температуры воздуха здесь же не превышали $17-18^{\circ}$, а средняя температура воздуха июня, июля и августа достигала в различные годы всего $0-7^{\circ}$ [9].

В подснежном скалистом грунте нивальных ниш, каров и цирков такой термодинамический цикл едва уловим в весенне-летние теплообменные циклы. Термомеханические эффекты их близки к нулю. Одним словом, сам по себе снег защищает подстилающее ложе. Он выступает в роли лишь пассивного условия интенсивного разрушения приснежной оголенной породы или почвы. В этом легко убедиться, рассмотрев экстенсивные факторы, определяющие термомеханические напряжения и энергию разрушения монолитов. Последние протекают почти периодически, и поэтому их можно представить как следствия колебаний температуры в циклах нагревание — охлаждение оголенной породы за многие сутки или годы. Полная энергия множества колебаний термомеханического состояния почвенно-грунтового комплекса (ПГК) близка, видимо, к величине

$$E = 2\pi^2 C_0 \alpha^2 \nu^2, \quad (6)$$

где C_0 — эффективная теплоемкость породы, включающая тепловые эффекты фазовых превращений воды; α — амплитуда колебаний температуры ПГК и ν — частота их.

Поскольку амплитуда суточных колебаний температуры снежника мала, а породы под снежником — близка к нулю весной и летом, ложе снежника почти равновесно и неподвижно. Оно закреплено, как одна половина шарнира. Другая, подвижная его часть, представлена оголенной породой. Поверхность ее нагревается утром и днем до $20-30^{\circ}$ выше средней суточной температуры и поднимается вследствие теплового расширения на целые миллиметры. Соединение обеих — подвижной и не-

подвижной — частей системы проходит по узкой полосе, пограничной между снежником и оголенным ложем ниши, кара. В этой полосе летом в середине дня горизонтальный температурный градиент достигает $12\text{--}15^\circ$ на 1 м даже в таких высоких широтах, как окрестности Норильска.

Таким образом, очевидно, что термомеханические напряжения в сплошной породе, слагающей полупространство приснежниковой полосы, могут быть очень большими. Они пропорциональны коэффициенту теплового расширения и перепаду (градиенту) температуры породы в этой полосе. Коэффициент теплового расширения гранитов и песчаников близок к $8 \cdot 10^{-6}$, а известняков — 10^{-5} , т. е. почти в 10 раз больше, чем кварцевого стекла.

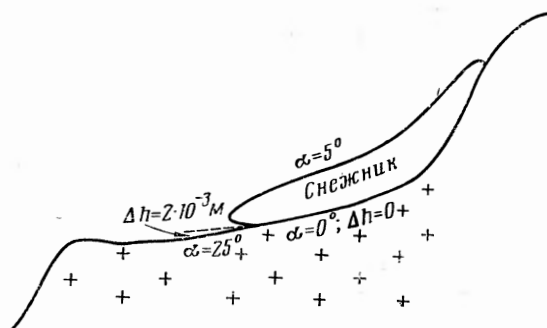


Рис. 1. Разрез гранитного ложа кара с тающим снежником

α — амплитуда температуры, Δh — деформация породы

Сложные напряжения оголенной породы в приснежниковой полосе (одновременно изгиб, растяжение и сдвиг) столь велики, что большой монолит ее испытывает сильное дробление в течение весенне-летнего сезона, особенно в горах низких широт. Один из авторов убедился в этом при изучении теплообмена в системах гранитный ПГК — атмосфера и гранит — снежник — атмосфера (рис. 1) [10].

Те же в принципе процессы будут идти и на контакте льда с горными породами у края ледников, сезонных и многолетних наледей (тарынов). Следует заметить, что снежники в летнее время тоже далеко не всегда состоят только из снега. Льдообразование в снежниках протекает точно так же, как в ближайшей зоне на ледниках. Эта зона непосредственно выше снеговой границы на ледниках в условиях континентального климата (Северо-Восток СССР, Тянь-Шань, Восточный Памир и другие районы) характеризуется ледяным питанием (инфильтрационно-конгеляционная, по П. А. Шумскому). Переход снега в лед происходит в течение одного-двух лет. Таким образом, здесь и снежники в летнее время состоят из льда, прикрытого или неприкрытого слоем фирна и снега [7, 9]. Оценивая распространенность нивации на территории СССР, следует учитывать не только собственно аккумулятивные снежники, но и контакты обнаженных крутых склонов, снега и льда в областях питания ледников, упомянутые выше тарыны и другие виды наземных льдов.

Снежники характерны и для равнин, низменностей, в особенности в высоких широтах. При сходной энергетике процесса нивации результаты ее при условии, что снежник подстигается дисперсными до промерзания породами, будут отличаться от рассмотренных выше случаев. Растрескивание мерзлых, но рыхлых до промерзания пород у кромки снежника приводит к пересыщению их водой, нарушению устойчивости. Этому



Рис. 2. Снежник на п-ове Гыдан, август 1971 г.
(фото М. М. Корейша)

процессу способствует также угнетение и гибель растительности под снежником. Наряду с эрозионным выносом частиц породы талыми водами, что характерно и для скальных пород, нивация сопровождается течением грунта, солифлюкцией, провоцируется рост оврагов (рис. 2).

ВЫВОДЫ

1. Нивацией называется интенсивный термогенный процесс механического разрушения горных пород в приснежниковой полосе в весеннее и летнее время.

2. Такое термогенное разрушение горных пород широко распространено по периферии не только снежников, но и ледников, а также таринов.

3. Ни сильный мороз, ни тем более суровый климат высокогорного пояса, высоких и средних широт в центральных частях континентов сами по себе не являются рельефообразующими факторами. Они лишь условия наиболее эффективного проявления солнечной энергии в полосах и слоях, пограничных между оголенным почвенно-грунтовым комплексом и снегом и льдом.

4. Снежный покров сам по себе непосредственно препятствует процессам денудации в обычном их понимании, предохраняя почвенно-грунтовой комплекс от термомеханического разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Martonne E.* Traite de Geographie Physique, Paris, 1952, v. 2, p. 560.
2. Энциклопедический словарь географических терминов. М.: Советская энциклопедия, 1968, 436 с.
3. Большая Советская энциклопедия. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1974, т. 17. 615 с.
4. *Оствальд В.* Популярные лекции по физике. СПб., 1903. 210 с.

5. *Мушкетов И. В.* Физическая геология. СПб, 1903, т. 2, ч. 1. 370 с.
6. *Шукин И. С.* Общая геоморфология. Т. 1. М.: Изд-во МГУ, 1960, 616 с.
7. *Корейша М. М.* Снежники в хребте Сунтар-Хаята.— В кн.: Сибирский географический сборник. Иркутск: Изд-во АН СССР, 1962, № 1, с. 177.
8. *Солнцев Н. А.* Снежники как геоморфологический фактор. М.: Географгиз, 1949, 92 с.
9. *Корейша М. М.* Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 168 с.
10. *Швецов П. Ф., Бобов Н. Г. и др.* Закономерности развития криогенных геоморфологических процессов.— В сб.: Современные экзогенные процессы рельефообразования. М.: Наука, 1970, с. 160.
11. *Швецов П. Ф.* К термодинамическим основам теории физического выветривания скальных пород.— В сб.: Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания. М.: Изд-во МГУ, 1971, с. 26.
12. Материалы наблюдений на горноледниковых бассейнах Международного гидрологического десятилетия в Советском Союзе. Вып. 1. 1965—1969. Л.: Гидрометеониздат, 1980, 235 с.

ПНИИИС
Госстроя СССР

Поступила в редакцию
17.III.1981

ON THE EXOGENOUS PROCESS CALLED NIVATION

SHVETSOV P. F., KOREISHA M. M.

Summary

Nivation is an intensive thermogenous process of rocks' destruction which acts near snow banks in spring and summer; it is widespread in mountains and high latitudes. The nivation results from the solar energy which causes sharp contrast in temperatures of bare rock surface near the snow, surface under the snow and air near the surface. The intensity of nivation, the rate of rocks' destruction is controlled by amplitude and frequency of the temperatures fluctuations within the active layer near the snow's boundary, effective heat capacity and coefficient of thermal expansion. Being a thermogenous process the nivation acts not only near the snow banks but glaciers and icings as well.