

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИКИ КОНУСОВ АККУМУЛЯЦИИ ГОРНО-ЛЕДНИКОВОГО БАССЕЙНА Р. АКТРУ И ИХ СВЯЗЬ С СОВРЕМЕННЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ

*Кузнецов А.С.*

*Институт Мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск)*

kas.sgs@mail.ru

*На основе энергетического подхода анализируется динамика конусов аккумуляции горно-ледникового бассейна р. Актру (Горный Алтай), расположенных на склонах разных экспозиций, и взаимосвязь движения осыпного материала с мощностью деятельного слоя. По полученным данным, скорости движения материала, слагающего конус аккумуляции, зависят от накопленной энергии, поступающей в геоморфосистему из окружающей среды, и её трансформации в процессе денудации. Кроме этого данный подход позволяет рассчитать темпы денудации в различных природных комплексах, которые обеспечиваются одним или группой процессов, а также определить энергетическую устойчивость рельефа и его реакцию на современные климатические изменения.*

**Ключевые слова:** экзогенные процессы, энергия рельефа, динамика рельефа, энергетическая устойчивость.

Применение энергетического подхода к описанию динамики процессов в геоморфосистемах в настоящее время не получило должного развития, если не считать решения частных вопросов изменения энергетического баланса взаимодействующих сил в почво-грунтах на склонах [Симонов и Большов, 2002; Тимофеев, 1979]. В пособии по динамической геоморфологии [Ананьев с соавт., 1992] кратко характеризуется энергоперенос на поверхности Земли. К.С. Воскресенский [2001] рассматривал энергетический подход, основанный на расчете суммарной энергии рельефа, которая складывается из потенциальной энергии рельефа и той части потока тепла в грунт, которая расходуется на криогенные процессы. На особое значение рельефа в формировании энергетических отношений в геосистеме не раз указывали Воскресенский С.С., Поздняков А.В. [Воскресенский, 1971; Поздняков, 1988].

В настоящее время разработано достаточное количество методов и способов оценки современных процессов рельефообразования. В основном все эти методы сводятся к описанию морфометрических характеристик, скорости перемещения обломков горных пород вниз по склону, а некоторые – по объёму созданных ими форм.

Но, получив довольно полные количественные характеристики того или иного процесса, не всегда возможно, используя их, сравнивать не только темпы современного рельефообразования, но и работу, произведённую одним и тем же процессом, – например случай когда развитие большого числа форм может дать меньший суммарный результат, по сравнению с одной, но крупной формой. Сопоставление современных экзогенных процессов возможно при использовании одного “универсального” показателя, который позволяет комплексно оценивать эффективность рельефообразования и её связь с современным изменением климата.

Данный показатель характеризует суммарный объём материала перемещённого при развитии процесса или форму рельефа, созданного в результате его действия, а также определение удельной величины объёма вещества, переработанного процессом на единице площади территории. Кроме этого данный показатель позволяет рассчитать темпы денудации в различных природных комплексах, которые обеспечиваются одним или группой процессов, а также позволит определить энергетическую устойчивость рельефа и его реакцию на современные климатические изменения.

Под энергетической устойчивостью можно понимать “степень реализации рельефом своего энергетического потенциала на образование различных аккумулятивных форм”. Так как каждая конкретная форма рельефа представляет собой совокупность энергетических затрат, реализованных вследствие геоморфологического процесса, то устойчивость рельефа определяется соотношением аккумулярованного потенциала энергии и его реализацией в процессе денудации. Поэтому, применение энергетического подхода позволяет более качественно охарактеризовать устойчивость рельефа и динамику современных процессов рельефообразования.

Для оценки темпов современных процессов рельефообразования можно использовать данные по скоростям различных экзогенных процессов и объёмам создаваемыми ими форм рельефа.

Для того, чтобы рассчитать потенциальную энергию экзогенного рельефообразования ( $E$ ) и её преобразование в кинетическую, мы воспользуемся следующей формулой [Воскресенский, 2001: с. 183]<sup>1</sup>:

$$E_{y0} = \rho \cdot g \cdot \zeta \cdot 0,5 \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (1)$$

где  $\rho$  – средняя плотность пород слагающих конус аккумуляции ( $\text{кг/м}^3$ ),  $g$  – ускорение силы тяжести ( $\text{м/с}^2$ ),  $\zeta$  – мощность деятельного слоя ( $\text{м}$ ),  $S$  – площадь поверхности ( $\text{м}^2$ ),  $l$  – длина ( $\text{м}$ ),  $\alpha$  – угол наклона поверхности конуса аккумуляции ( $^\circ$ ) ( $0,5 \cdot l \cdot \sin \alpha$  – высота центра тяжести над нулевым уровнем).

<sup>1</sup> Эти формулы по своему существу являются общефизическими, и могут применяться как для равнинных, так и для горных территорий, к примеру, формулу (1) в кратком виде можно записать так:  $E = mgh$

Для сравнения энергетических возможностей различных геоморфологических систем удобно воспользоваться величиной удельного энергетического потенциала  $E_{y\partial}$ , равной энергетическому потенциалу, приходящемуся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности системы [Воскресенский, 2001, с. 183]:

$$E_{y\partial} = E/S = \rho \cdot g \cdot \zeta \cdot 0,5 \cdot l \cdot \sin(\alpha) / S \quad (2)$$

Эта зависимость выражает вклад различных природных факторов в энергетику геоморфосистем: параметры  $l$  (длина склона) и  $\alpha$  (угол наклона) учитывают морфометрию и морфологию системы, параметр  $\rho$  связан с вещественным составом пород деятельного слоя, параметр  $\zeta$  определяется совокупностью условий рельефа и климата в данном районе.

Естественно, энергия, накопленная конусом аккумуляции, расходуется в процессе движения деятельного слоя осыпи, и часть потенциальной энергии, которая трансформируется в кинетическую можно выразить через коэффициент реализации энергетического потенциала [Воскресенский, 2001, с. 184]:

$$K_p = V/l, \quad (3)$$

где  $V$  – скорость перемещения материала,  $l$  – длина склона. Поскольку, расход энергии во время действия процесса не может быть больше энергетического потенциала, то величина коэффициента реализации всегда меньше единицы.

Показателем энергетической эффективности процессов может служить максимальная полезная работа ( $A$ ), произведённая в процессе движения материала, слагающего осыпной аккумулятивный склон, и удельная работа ( $A_{y\partial}$ ), приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности осыпного тела. Данный показатель складывается из произведения величины накопленной потенциальной энергии ( $E$ ,  $E_{y\partial}$ ) и коэффициента ее реализации ( $K_p$ ) [Воскресенский, 2001, С. 185]:

$$A = EK_p \quad (4)$$

$$A_{y\partial} = E_{y\partial} K_p \quad (5)$$

Максимальная полезная удельная работа ( $A_{y\partial}$ ) является показателем, которым можно оценить энергетику любого процесса, протекающего в рассматриваемой геоморфосистеме. Величина этого показателя будет возрастать в зависимости от интенсивности протекающего процесса.

Объектом исследования являются осыпи склонов верховий бассейна р. Актру. Горно-ледниковый бассейн р. Актру практически полностью располагается в зоне высокогорного расчленения, с высотами выше 2300 м. Четвертичное оледенение оказало большое воздействие на выработку форм современного рельефа бассейна, здесь мы имеем “свежий”, сильно расчленённый альпийский рельеф высокогорного Алтая, где физическое выветривание горных пород протекает особенно интенсивно. В формировании современного рельефа данной территории наибольшее значение имеют быстро протекающие (мерзлотные, нивально-гляциальные и гравитационные) процессы. Примером их проявления могут служить склоны северной экспозиции с высотами более 2700 м., где доминирующими являются нивально-гляциальные процессы. Частые камнепады и обвалы ведут к накоплению обломочного материала различной размерности в виде конусов осыпей, у подножия крутых склонов [Титова и Петкевич, 1964, с. 115-143].

Одной из особенностей в морфометрии горно-ледникового бассейна р. Актру является хорошо выраженная асимметрия склонов, где северные склоны более крутые ( $55-60^\circ$ ), а южные, наоборот, более пологие ( $47-49^\circ$ ). Такая асимметричность бортов долины напрямую связана с развитием оледенения в прошлые эпохи, когда южные прогретые склоны в большей степени подвергались физическому выветриванию, чем северные, которые более равномерно попадали под “защиту” снежно-фирновых масс. Впоследствии, при деградации оледенения, более освещённые склоны южной экспозиции быстрее освободились от снега и процессы нивации возобновили своё разрушающее действие. В местах интенсивного развития конусов аккумуляций относительная высота бортов долины р. Актру достигает 1200-1400 м, здесь наблюдается большое количество снежников, а их таяние способствует значительному увлажнению правого склона. Крутизна конусов аккумуляции в долине р. Актру в среднем составляет  $27-30^\circ$ . Асимметричность бортов долины определяет и характеристики прихода солнечного тепла на поверхность склонов, и, как следствие, определяет и параметры оттаивания грунта осыпных аккумулятивных тел. Вследствие этого, характеристики удельной энергетической эффективности процессов денудации на склонах разной экспозиции будут отличными.

Одним из решающих факторов поступления энергии в геоморфосистему и её реализации при движении осыпного материала является радиационный баланс на поверхности конуса аккумуляции, именно от прихода солнечного тепла зависит мощность слоя, задействованная в процессе перемещения обломков горных пород, слагающих осыпное тело, так называемый деятельный слой. Его граница располагается на определённой глубине, где проходит изотерма  $0^\circ$  для середины июля. В долине р. Актру величина деятельного слоя колеблется от нескольких сантиметров в зоне ледников, до двух метров на более освещённых склонах и во внеледниковой зоне. Приход солнечной радиации на дневную поверхность конусов аккумуляции достигает в долине р. Актру  $1-1,3 \text{ ккал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$  (или  $4,1868-5,4428 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$ ). Суммарная солнечная радиация составляет  $99,26 \text{ ккал} / \text{см}^2$  в год

(или  $415,58 \text{ кДж/см}^2$  в год) [Тронов и др., 1965, с. 7-12]. Однако, общая загороженность горизонта в долинах снижает инсоляцию. К тому же она уменьшается из-за большой облачности во время дождей. Поэтому, для высокогорья характерно чередование дней с большими и малыми суммами радиации, а, следовательно, и дней с повышенными и пониженными температурами, что не может не сказываться на процессах движения деятельного слоя осыпи. Граница деятельного слоя в районе исследования располагается на определённой глубине, где проходит изотерма  $0^\circ$  для середины июля. В геосистеме бассейна р. Актру величина деятельного слоя колеблется от нескольких сантиметров в зоне ледников до двух метров на более освещенных склонах и во внеледниковой зоне.

Энергетические характеристики динамики осыпных аккумулятивных склонов рассматривались у осыпей, находящихся на склонах вершины Караташ (юго-западная экспозиция), Кызылташ (северо-западная экспозиция), хребта Передового (юго-восточная экспозиция). Данные аккумулятивные тела имеют примерно одинаковые морфометрические и морфологические характеристики и являются наиболее репрезентативными осыпями для своего склона. Движение материала осыпного аккумулятивного склона в основном наблюдается в тёплый период времени, поэтому динамика осыпей рассчитывается в сезонном цикле их развития.

По этому в ходе оценки рассматривается ряд факторов, которые влияют на приход энергии извне в систему. Эти факторы представлены:

- 1) характером растительного покрова деятельного слоя;
- 2) глубиной прохождения изотермы июля  $0^\circ$  и трением на этой границе;
- 3) величиной угла внутреннего трения и сцепление грунта [Поздняков, 1988, с.44-46];
- 4) воздействием внешних факторов по отношению к геоморфосистеме экзогенных агентов, влияющих на баланс вещества на его границах.

На основе данных, полученных в результате экспедиционных исследований динамики осыпных аккумулятивных склонов в горно-ледниковом бассейне р. Актру, по формулам 1-5 были определены энергетические характеристики осыпей, которые представлены в таблице.

**Таблица.** Энергетические характеристики динамики осыпных аккумулятивных склонов горно-ледникового бассейна р. Актру

№ осыпи	$E$ (кДж)	$E_{y\delta}$ (кДж/м <sup>2</sup> )	$K_p$	$A$ (кДж)	$A_{y\delta}$ (кДж/м <sup>2</sup> )
1 (осыпи склона г. Караташ)	$15,60 \cdot 10^6$	954,14	0.005	$78,0 \cdot 10^3$	4,771
2 (осыпи склона г. Кызылташ)	$22,60 \cdot 10^6$	1287,20	0.011	$248,60 \cdot 10^3$	14,160
3 (осыпи склона хр. Передовой)	$19,54 \cdot 10^6$	1058,0	0.016	$312,64 \cdot 10^3$	16,930

Полученные данные свидетельствуют о том, что наибольший запас  $E$  и  $E_{y\delta}$  соответствует осыпям №2, которые находятся на склоне северо-западной экспозиции, так как на них приходится более значительная доля теплового потока в течение дня, чем на склоны, которые в светлое время суток большую часть времени находятся в тени.

Основным параметром реализации  $E_{y\delta}$  служит движение материала осыпи. У осыпей № 1, располагающихся в зоне на склоне вершины Караташ, отмечается весьма незначительное движение обломков горных пород, до нескольких десятков сантиметров в год. На противоположном склоне № 2 (Кызылташ) скорость движения обломков составляет до нескольких метров в год. Причем максимальные скорости движения отмечаются на тех осыпях, которые сложены в основном мелкообломочным материалом, а иногда случаются достаточно сильные подвижки материала, которые принимают характер селевых потоков. Максимальные значения  $K_p$  характерные для осыпей № 3 хр. Передовой, у которых отмечаются более высокие скорости движения материала (2,5 м/год), слагающего осыпной аккумулятивный склон. Поэтому и  $A_{y\delta}$  отличается более высокими значениями, так как затраты энергии на преодоление внутренних сил (трение и сцепление) меньше, чем у осыпей противоположных склонов (№ 1 и № 2). У осыпного склона № 1 г. Караташ скорость движения и мощность слоя осыпного материала невелика, вследствие чего и значение  $A_{y\delta}$  самое минимальное из рассматриваемых геосистем.

Приведённая здесь методика описания энергетических характеристик осыпных аккумулятивных тел достаточно полно отражает взаимосвязь элементов системы между собой и окружающей средой. Так, при потеплении климата увеличивается поступление энергии в геоморфосистему конуса аккумуляции, а – это в свою очередь влечёт за собой увеличение мощности деятельного слоя, при одновременном снижении затрат на трение и сцепление, что ведёт к уменьшению и энергетических затрат на перемещение поверхностного слоя аккумулятивного тела. Вследствие этого, возрастают скорости движения материала, которые могут приобретать и катастрофический характер. Результаты расчётов энергетической эффективности для осыпей находящихся на склонах разных экспозиций, показывают, что каждому аккумулятивному телу соответствует определённое значение  $A_{y\delta}$ . Сравнивая значения  $A_{y\delta}$ , мы можем охарактеризовать степень реализации энергии, накопленной системой: чем больше значение этого показателя, при максимальном значении накопленной потенциальной энергии, тем, с позиции энергетического подхода, эффективнее протекает данный процесс. Данный показатель также характеризует энергетическую устойчивость рельефа. Под энергетической устойчивостью мы понимаем степень реализации геосистемой накопленного энергетического потенциала. Иными словами, чем выше значение  $A_{y\delta}$  при данном значении  $E_{y\delta}$ , тем система более устойчива, и наоборот, чем меньше значение  $A_{y\delta}$  при данном значении  $E_{y\delta}$ , тем система, в энергетическом плане, менее устойчива.

Применение предлагаемого подхода позволяет раскрыть динамику современных экзогенных процессов, прогнозировать поведение той или иной геоморфосистемы в настоящее время и оценить влияние потепления климата на развитие процессов современного рельефообразования.

В настоящее время продолжается работа по данной тематике, и ведётся энергетический анализ генетически неоднородных процессов, а также составляется карта геомодинамики данного района на основе энергетического подхода.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований СО РАН (Проект 7.10.1.3.).

#### Литература

- Ананьев Г.С., Симонов Ю.Г., Спиридонов А.И. (ред.). 1992. Динамическая геоморфология. М.: Изд-во МГУ. 448 с.  
Воскресенский К.С. 2001. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Изд-во МГУ, 262 с.  
Воскресенский С.С. 1971. Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М.: Изд-во МГУ. 230 с.  
Поздняков А.В. 1988. Динамическое равновесие в рельефообразовании. М.: Наука. 207 с.  
Симонов Ю.Г., Большов С.И. 2002. Методы геоморфологических исследований: Методология. М.: Аспект-Пресс. 190 с.  
Тимофеев Д.А. 1979. Поверхности выравнивания суши. М.: Наука. 270с.  
Титова З.А., Петкевич М.В. 1964. Наблюдения за конусами аккумуляции в долине реки Актру // Гляциология Алтая. Вып. 3. С. 115-143.  
Тронов М.В., Тронова Л.Б., Белова Н.И. 1965. Основные черты климата горно-ледникового бассейна Актру // Гляциология Алтая. Вып. 4. С. 7-12

### ENERGY ESTIMATION OF TALUSES CREEP SLOPES IN THE MOUNTAIN GLACIAL OF THE BASIN THE AKTRU RIVER HEADWATERS AND THEIRS CONNECTION WITH MODERN CLIMATE CHANGE

A. S. Kuznetsov

*Until the present time the sufficient amount of the methods and ways of the estimation of the modern processes of morphogenesis has been used. Basically, all these methods are reduced to describe the morphometric features, the velocities of the displacement of debris down the slope, or, for some of them, the volume created by their forms. Even if we can have full quantitative features dynamic, it's not always possible using them, to compare the modern morphogenesis rates, even if made by same process. The modern exogenic processes matching is possible when one "universal" factor is used, which allows to fully value the morphogenesis efficiency and define its relationship with modern climatic change. This factor characterizes the following: the total volume of the material moved at the time of development of the process; the relief form, created as a result of its actions; the determination of the specific value of the volume material, transformed by process on unit area territory. Furthermore, this factor allows calculating the denudation rates in different natural complex, which are provided one or group of the processes, as well as will allow defining energy stability of the relief and its response on modern climatic change. At present, the use of the energy approach to describe denudation processes in geomorphosystem has not got the proper development. However, the development of the scientific interest to this direction gave significant impulse for development of these methodologies of the energy analysis. It is shown by concrete facts that measurement of energy efficiency of geomorphological processes in quantitative units - a Joule - allows to reveal not only the main point of this process, but also enables to compare it with any others. Such approach enables the matching of efficiency of the operating the genetically different systems, as well as change in their dynamics, connected with fluctuations of the energy amount entering into the system from the environment.*

**Keywords:** exogenic processes, energy of the relief, relief dynamics, energy stability.

Поступила в редакцию: 25.11.2009  
Переработанный вариант: 15.12.2009