

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ОСЫПНЫХ АККУМУЛЯТИВНЫХ СКЛОНОВ ВЕРХОВИЙ ГОРНО-ЛЕДНИКОВОГО БАСЕЙНА р. АКТРУ

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

Рассматриваются особенности накопления энергетического потенциала и его реализация в динамике осыпного аккумулятивного склона. Данный подход позволяет рассчитать темпы денудации в различных природных комплексах, которые обеспечиваются одним или группой процессов, а также определить энергетическую устойчивость геоморфосистем и их реакцию на современные климатические изменения.

**Ключевые слова:** динамика экзогенных процессов; энергетическая устойчивость рельефа; аккумулятивные склоны.

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, иногда к описанию объёма созданных ими форм. Получив довольно полные количественные характеристики динамики того или иного объекта, не всегда возможно, используя их, сравнивать не только темпы современного рельефообразования, но и работу, произведённую одним и тем же процессом.

Сопоставление современных экзогенных процессов возможно при использовании одного «универсального» показателя, который позволяет комплексно оценивать эффективность рельефообразования и определить её связь с современными климатическими изменениями. Данный показатель характеризуется суммарным объёмом материала, перемещённого при развитии процесса, или формой рельефа, созданной в результате его действия, что позволяет определить также удельную величину 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 определить энергетическую устойчивость рельефа и его отклик на современные климатические изменения.

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 почвогрунтах на склонах [1–5]. В пособии по динамической геоморфологии [6] кратко характеризуется энергоперенос на поверхности Земли. К.С. Воскресенский [7] 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.

В настоящее время наблюдается значительный интерес к развитию методологии энергетического анализа. Так, показано на конкретных фактических материалах, что измерение энергетической эффективности рельефообразующих процессов в количественных единицах – Джоулях – позволяет раскрыть не только суть самого процесса, но и даёт возможность сравнивать его с любым другим [7]. Такой подход даёт возможность сопоставления эффективности функционирования генетически разных систем, а также проследить изменение их

динамики, связанной с колебаниями количества поступающей в систему энергии из окружающей среды.

### Объект исследования

Горно-ледниковый бассейн р. Актру находится в юго-восточной части Горного Алтая (Северо-Чуйский хребет). Геоморфосистема верховья бассейна 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 [8. 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°), а южные, наоборот, более пологие (47–49°). 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 осыпных аккумулятивных склонов в долине р. Актру в среднем составляет 27–30°.

Асимметричность бортов долины определяет характеристики прихода солнечного тепла на поверхность склонов и, как следствие, обуславливает и параметры оттаивания грунта осыпных аккумулятивных тел. Поэтому характеристики удельной энергетической эффективности процессов денудации на склонах разной экспозиции будут различаться.

Одним из решающих факторов поступления энергии в геосистему и её реализации при движении осыпного материала является радиационный баланс на поверхности осыпного аккумулятивного склона. Именно от прихода солнечного тепла зависит мощность слоя, задействованная в процессе перемещения обломков

горных пород, слагающих осыпное тело. Приход солнечной радиации на дневную поверхность осыпных аккумулятивных склонов достигает в долине р. Актру 1–1,3 ккал/см<sup>2</sup> мин (или 41,868–54,428 кДж/м<sup>2</sup> в мин). Суммарная солнечная радиация составляет 99,26 ккал/см<sup>2</sup> в год (или 4155,82·10<sup>3</sup> кДж/м<sup>2</sup> в год). 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° для середины июля. В геосистеме бассейна р. Актру величина деятельного слоя колеблется от нескольких сантиметров в зоне ледников до двух метров на более освещённых 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.

### Методика исследования

Для оценки энергетической эффективности процессов движения тела осыпей использовались методы, предложенные К.С. Воскресенским [7. С. 183]. Аккумулятивные тела в геосистеме горно-ледникового бассейна р. Актру рассматриваются как открытые системы, энергетические возможности которых определяются соотношением между энергетическим потенциалом и коэффициентом его реализации.

Для того чтобы рассчитать потенциальную энергию, накопленную конусом аккумуляции ( $E$ ), воспользуемся следующей формулой [7. С. 183]:

$$E = \rho g h S \cdot 0,5 l \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\rho$  – средняя плотность пород, слагающих осыпной аккумулятивный склон, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – мощность деятельного слоя, м;  $S$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина, м;  $\alpha$  – угол наклона

поверхности осыпного аккумулятивного склона, °;  $0,5 l \sin \alpha$  – высота центра тяжести над нулевым уровнем.

Для сравнения энергетических возможностей различных геоморфологических систем удобно воспользоваться величиной удельного энергетического потенциала  $E_{y\partial}$ , равной энергетическому потенциалу, приходящемуся на 1 м<sup>2</sup> поверхности системы [7. С. 183]:

$$E_{y\partial} = E/S. \quad (2)$$

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  $h$  определяется совокупностью условий рельефа и климата в данном районе.

Потенциальная энергия, накопленная конусом аккумуляции, расходуется в процессе движения деятельного слоя осыпи. Трансформацию потенциальной энергии в кинетическую можно выразить через коэффициент реализации энергетического потенциала ( $K_p$ ) [7. 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 максимально полезная работа ( $A$ ), произведённая в процессе движения материала, слагающего осыпной аккумулятивный склон, и удельная работа ( $A_{y\partial}$ ), приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> поверхности осыпного тела. Данный показатель складывается из произведения величины накопленной потенциальной энергии ( $E$ ,  $E_{y\partial}$ ) и коэффициента ее реализации ( $K_p$ ) [7. С. 185]:

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

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

Максимально 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.

### Результаты исследования

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.

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

№ осыпи	$E$ , кДж	$E_{y\partial}$ , кДж/м <sup>2</sup>	$K_p$	$A$ , кДж	$A_{y\partial}$ , кДж/м <sup>2</sup>
1	15,6·10 <sup>6</sup>	954,14	0,005	78·10 <sup>3</sup>	4,771
2	22,6·10 <sup>6</sup>	1287,2	0,011	248,6·10 <sup>3</sup>	14,16
3	19,54·10 <sup>6</sup>	1058	0,016	312,64·10 <sup>3</sup>	16,93

Примечание. № 1 – осыпи склона г. Караташ; № 2 – осыпи склона г. Кызылташ; № 3 – осыпи склона хр. Передовой.

В ходе оценки также рассматривался 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° и трением на этой границе;

3) величиной угла внутреннего трения и сцепления грунта [6. С. 44–46];

4) воздействием внешних факторов по отношению к геосистеме экзогенных агентов, влияющих на баланс вещества на его границах [7. С. 184].

Полученные данные свидетельствуют о том, что наибольший запас  $E$  и  $E_{y\partial}$  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  $E_{y\partial}$  служит движение материала осыпи. У осыпей № 1, расположенных 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  $A_{y\partial}$  отличается более высокими значениями, т.к. 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 невелики,

вследствие чего и значение  $A_{y\partial}$  самое минимальное из рассматриваемых геосистем.

Предложенная методика расчёта энергии динамики осыпных аккумулятивных склонов позволила количественно оценить работу, совершаемую в ходе движения материала по склону. Результаты расчётов энергетической эффективности для осыпей, находящихся на склонах разных экспозиций, показывают, что каждому аккумулятивному телу соответствует определённое значение  $A_{y\partial}$ . Сравнивая значения  $A_{y\partial}$ , 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  $A_{y\partial}$  при данном значении  $E_{y\partial}$ , тем система более устойчива, и наоборот, чем меньше значение  $A_{y\partial}$  при данном значении  $E_{y\partial}$ , 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 климатических колебаний на развитие процессов современного рельефообразования.

Автор выражает благодарность за помощь в проведении исследований Ю.К. Нарожному и С.Н. Суханову.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Симонов Ю.Г.* Анализ геоморфологических систем // Актуальные проблемы теоретической и прикладной геоморфологии. М.: Моск. фил. ВГО СССР, 1976. С. 69–93.
2. *Симонов Ю.Г., Большов С.И.* Методы геоморфологических исследований: Методология. М.: Аспект-Пресс, 2002. 190 с.
3. *Тимофеев Д.А.* Поверхности выравнивания суши. М.: Наука, 1979. 270 с.
4. *Тимофеев Д.А.* От Дэвиса до наших дней: чему учит история геоморфологии // Геоморфология. 2002. № 2. С. 3–9.
5. *Динамическая геоморфология* / Под ред. Г.С. Ананьева и др. М.: Изд-во МГУ, 1992. 448 с.
6. *Поздняков А.В.* Динамическое равновесие в рельефообразовании. М.: Наука, 1988. 207 с.
7. *Воскресенский К.С.* Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России / Науч. ред. и предисл. проф. Ю.Г. Симонов. М.: Изд-во МГУ, 2001. 262 с.
8. *Титова З.А., Петкевич М.В.* // Гляциология Алтая. 1964. Вып. 3. С. 115–143.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 27 ноября 2009 г.