

УДК 551.4.04(235.222)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ

Кузнецов А.С.

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Российская Федерация (634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3) kuzgeo@gmail.com

Любая форма рельефа, созданная как природными процессами, так и в результате антропогенной деятельности, обладает энергетическим потенциалом. В естественных условиях основным поставщиками энергии являются эндогенные силы, которые ведут к разнонаправленным движениям в земной коре. Другим важным фактором, является приход солнечной энергии, за счет которой обеспечиваются в основном экзогенные процессы, нивелирующие первичные неровности рельефа, т.е. расходуют энергетический потенциал. Таким образом, большинство гетерогенных геоморфологических процессов, протекающих на поверхности Земли можно характеризовать в единых энергетических единицах (Джоулях). Картографическое отображение энергии рельефа позволяет наглядно представить участки рельефа с разной степенью плотности энергетического потенциала и определить наиболее устойчивые участки земной поверхности, так и менее устойчивые площади в энергетическом плане.

Ключевые слова: Геоморфосистема, энергия рельефа, энергетическая плотность.

AN ENERGY APPROACH FOR GEOMORPHOLOGICAL MAPPING

Kuznetsov A.S.

FSBAS Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russian Federation (634055, Tomsk, 10/3, Academicheskyy avenue) kuzgeo@gmail.com

Any form of relief created both by natural processes and by human activities has an energy potential. Under natural conditions, the main energy providers are endogenous forces that lead to multi-directional movements in the earth's crust. An another important factor is the influx of solar energy, which is provided at the expense of mostly exogenous processes, leveling topographic inequality, i.e. expend the energy potential. Thus the most heterogeneous geomorphologic processes on the earth's surface can be characterized by unified energy units (Joules). Cartographic mapping of relief's energy allows to visualize the surface topography with varying degrees of density of energy potential and to determine the most stable and less stable areas of the earth's surface according to energy.

Keywords: geomorphosystem, energy of topography, energy potential.

Принципы картографирования энергии рельефа. Традиционные методы, применяемые для характеристики природных процессов, в силу их гетерогенности и значительных различий по характерным временам развития, существенно затрудняют количественную оценку динамики процессов в их взаимодействии. Вызывают затруднения и сравнение динамики геоморфологических процессов, обусловливаемых эндогенным и экзогенным действием сил. Это противоречие можно преодолеть, если динамику систем характеризовать в энергетических единицах измерения, нормируя всю энергию через солнечную энергию [2].

Вопрос об энергии рельефа и энергетических характеристиках современных процессов экзогенного рельефообразования периодически возникал на протяжении практически всего XX в. Первые расчёты запасённой энергии рельефом и её картографическое отображение были проведены немецкими учёными для районов Южной и Западной Германии. На основе теории предложенной А. Пенком [11], разрабатывается

методическая основа определения *энергии рельефа* (нем. “*Reliefenergie*”). Основой данной методики является понятие *энергии рельефа*, как о высотное отношение подножия какого-либо блока земной поверхности к его вершине. Как правило, данное отношение определяется в метрах - перепад высот на единицу площади (обычно на км²). В последующих работах немецких геоморфологов развивалось данное понятие “энергии рельефа”. Например, в диссертационной работе немецкого геоморфолога С. Расеманна приводятся классификации территорий, по степени энергии рельефа. Так, для высокогорных районов энергия рельефа соответствует показателю >500 м/км², а для холмистой местности <50 м/км² [12].

Особенностью данного подхода является то, что в самом понятии “энергии рельефа” отсутствует сама энергия, как физическая величина. Это отражается в понятии, которое приводит нам А.И. Спиридонов [4]: *Энергия рельефа – Размах рельефа, степень расчлененности рельефа, морфометрический показатель потенциальной интенсивности или возможного проявления тех или иных рельефообразующих процессов, учитывающий расстояние по вертикали между высшими и низшими точками рельефа данного региона и его горизонтальную расчлененность*. Подобная трактовка данного термина встречается и в Географическом пятиязычном словаре издательства Elsevier's [9].

Подобные исследования проводились и мексиканскими учеными, основные исследования которых опубликованы в “Атласе стихийных бедствий региона Тетела де Окампо” [5]. Составленная карта энергии рельефа (превышений на местности) основывается на геологической карте, где установленные максимальные значения энергии рельефа соответствуют основным направлениям разломов. Основным выводом исследований служит то, что высокие значения энергии рельефа соответствуют зонам тектонической активности.

В географической школе Великобритании вопрос энергии рельефа рассматривается с работ У.М. Девиса [7]. Основная направленность исследования заключается в решении задач связанных с накоплением энергии рельефом и её дальнейшая трансформация в ходе различных геоморфологических процессов или циклов. Особенно возрос интерес к данному направлению в геоморфологии после выхода монографии английского географа, геоморфолога Чорли Р.Дж. “Геоморфология и общая теория систем” в 1962 г. [7]. В данной работе Р.Дж. Чорли рассматривает геоморфологические системы, как открытые системы, которые нуждаются в поступлении энергии для поддержания своего существования. Тем не менее, в данной работе, как и в статье “Физическая география: Системный подход”, опубликованной совместно с Б. Кеннеди [8], не приводятся какие-либо конкретные данные по условиям накопления или последующей трансформации энергетического потенциала при функционировании геоморфологической системы. Впоследствии, многочисленные работы, рассматривающие применение системного анализа в геоморфологии, использовали понятие

энергии и её присутствия в системах лишь как данность, без проведения исследований по накоплению и трансформации энергетического потенциала в системах различной природы и ранга.

Обоснования, проводимые в рамках теоретических и обобщающих работ по применению системного анализа в географии, в дальнейшем получили свое развитие и в практических исследованиях, которые проводили как британские, так и приемники – исследователи из США и некоторых европейских стран.

А. Чин в статье “Геоморфологическая значимость ступенчатых бассейнов горных ручьев” [6], рассматривает диссипацию (рассеивание) энергетического потенциала водного потока в ступенчатых бассейнах горных ручьев. Основным выводом в работе сводится к тому, что благодаря вертикальному падению, ступенчатые бассейны снижают энергию, которая в противном случае может усиливать донную и боковую (береговую) эрозию водного потока.

В статье немецких исследователей [10], оценивается скорость и геоморфологическая работа при отступании стенки скального склона. Они используют изменения значения потенциальной энергии как показателя геоморфологической работы при оценке скорости выветривания скальных склонов известняковых массивов Рейнских Альп. Одним из основных выводов исследований является установление соотношений скоростей физического и химического выветриваний и производимой при этом геоморфологической работы в высокогорных условиях.

Нами энергия рельефа рассматривается как физическая величина, которая выражается в физических величинах – Джоулях (Дж). Анализ энергии рельефа проводился на конкретном примере – горноледниковом бассейне Актру (Горный Алтай). Авторы рассматривают данный бассейн как геоморфологическую систему (геоморфосистему) с набором функциональных отношений (в том числе и энергетических) между её элементами [1, 2]. Согласно современным представлениям, *геоморфологическая система – это часть земной поверхности, элементы которой находятся в устойчивом отношении (в том числе и в энергетическом), морфологически представляющем единое целое, способное определённым образом реагировать на изменения активности эндогенных и экзогенных процессов* [1, 2].

Энергетический потенциал и его расход при формировании рельефа.
Потенциальная энергия, произведенная эндогенными процессами. Рельеф территории, частью которого является геоморфосистема Актру, был создан дифференцированными сводово-глыбовыми тектоническими деформациями земной коры. Вся совокупность процессов пространственного перераспределения продуктов выветривания в этом районе осуществляется за счет расходов потенциальной гравитационной энергии, накопленной эндогенными процессами. Дать точную количественную характеристику этой энергии

затруднительно. Тем не менее, средние её значения вполне определимы. С этой целью необходимо определить поверхности сравнения, относительно которых изменяются численные показатели расходов потенциальной энергии и условия формирования рельефа.

Потенциальная энергия, применительно к процессам рельефообразования, – это энергия, создаваемая гравитационными силами поднятого над поверхностью сравнения геологического тела. Работа гравитационных сил, т.е. затраты энергии на перемещение вещества, зависит только от начального и конечного положения тела (оно не зависит от формы поверхности). В данном случае поверхностью сравнения обоснованно считается базисная поверхность. Другой поверхностью сравнения является вершинная поверхность в тех же границах.

Таким образом, можно определить объем V геологического тела, его массу m и высоту h центра тяжести поднятого тектоническими процессами блока земной коры по формуле:

$$E = \rho Vgh/2, \quad (1)$$

где ρ – плотность (в среднем 2700 кг/м^3) и (V) объём горных пород, среднее превышение над базисной поверхностью h , g – ускорение силы тяжести. Абсолютная высота базисной поверхности в границах рассматриваемой территории составляет 2000 м , вершинная поверхность, в пределах которой сохранились фрагменты меловой поверхности выравнивания, составляет в среднем 3500 м . В таком случае потенциальная энергия E , созданная эндогенными силами, составляет $12,50 \cdot 10^{11} \text{ МДж}$. Это энергетический потенциал слаборасчленённого блока земной коры, выведенного в сферу эрозионного преобразования.

Таким образом, энергетический потенциал территории является энергией, запасённой в формах рельефа, которая используется в дальнейшем для развития и обеспечения динамики процессов (в данном случае экзогенного рельефообразования).

Расход потенциальной энергии на перемещение продуктов денудации. Формирование рельефа горноледникового бассейна Актру осуществлялось совокупным действием процессов селективного выветривания, эрозионного расчленения, ледниковой экзарации, химического растворения данного объема геологического тела и пространственного перераспределения образующегося при этом вещества. Скорость протекания процессов полностью определялась устойчивостью горных пород к перечисленным агентам рельефообразования. Суммарный энергопотенциал современной геоморфосистемы Актру составляет $5,23 \cdot 10^{11} \text{ МДж}$ или $11,10 \cdot 10^3 \text{ МДж/м}^2$.

При формировании рельефа геоморфосистемы Актру энергия, затраченная на перенос объема вещества (около 19 км^3), составляет $7,27 \cdot 10^5 \text{ МДж}$, за счёт чего и образованы все отрицательные формы рельефа.

По нашим данным [1, 2], на зандровую поверхность ежегодно в среднем поступает до 107145,2 м³ материала. В свою очередь, через замыкающий створ геоморфосистемы Актру водным потоком выносятся до 84000 м³/год частиц во взвешенном состоянии. Следовательно, современная денудация всей площади поверхности рельефа геоморфосистемы Актру составляет 2–3 мм/год. С учетом данных обстоятельств, нами принято определять расходы E_p во времени, за которое удаляется слой продуктов выветривания толщиной в h (мм/год) со всей площади (S_0) поверхности рельефа Актру. Тогда суммарный объем удаляющегося материала по весу T_c будет определяться следующим простым выражением:

$$T_c = S_0 p / \cos \alpha, \quad (2)$$

где $p = h\rho g$, ρ – плотность пород г/см³, g – ускорение свободного падения [1]. Отсюда суммарный расход гравитационной потенциальной энергии будет определяться по формуле:

$$E_p = T_c h, \quad (3)$$

где E_p расход энергии на перемещение вещества со всей площади от вершинной поверхности до базисной [1]. Учитывая скорость современной денудации рельефа горноледникового бассейна Актру, E_p составляет 5,0 МДж/год

Это представляет общий расход энергетического потенциала в течение года, но определённая его часть остаётся в геоморфосистеме Актру, так как значительная доля взвешенных наносов (около 22,5%) аккумулируется в пределах долинного зандра. О наличии пойменной аккумуляции также свидетельствуют образование внутренней дельты на зандре Актру и занесение прикорневых частей деревьев, произрастающих в пойме реки. Повышение поверхности поймы составляет 3–4 мм/год [2].

Согласно (3), ежегодно на пойменную аккумуляцию расходуется около 0,2 МДж. Следовательно, расход гравитационного энергетического потенциала на выходе из геоморфосистемы Актру составляет 4,80 МДж/год, что обеспечивает динамику рельефообразующих процессов в геоморфосистеме Актру по всей площади от вершинной поверхности до базисной.

Для наглядного представления распределения энергетического потенциала в пределах границ геоморфосистемы Актру были выделены участки, где господствующим является определённый геоморфологический процесс. Для каждого из участков определены относительная высота (H) над базисной поверхностью, площадь (S). При вычислении массы горных пород была взята средняя плотность 2700 кг/м³. Для осыпей и моренных участков средняя плотность составляет 1800 кг/м³. На основании полученных данных была составлена карта распределения удельного энергетического потенциала ($E_{y0} = E_p/S$) в пределах геоморфосистемы Актру (рисунок 1).

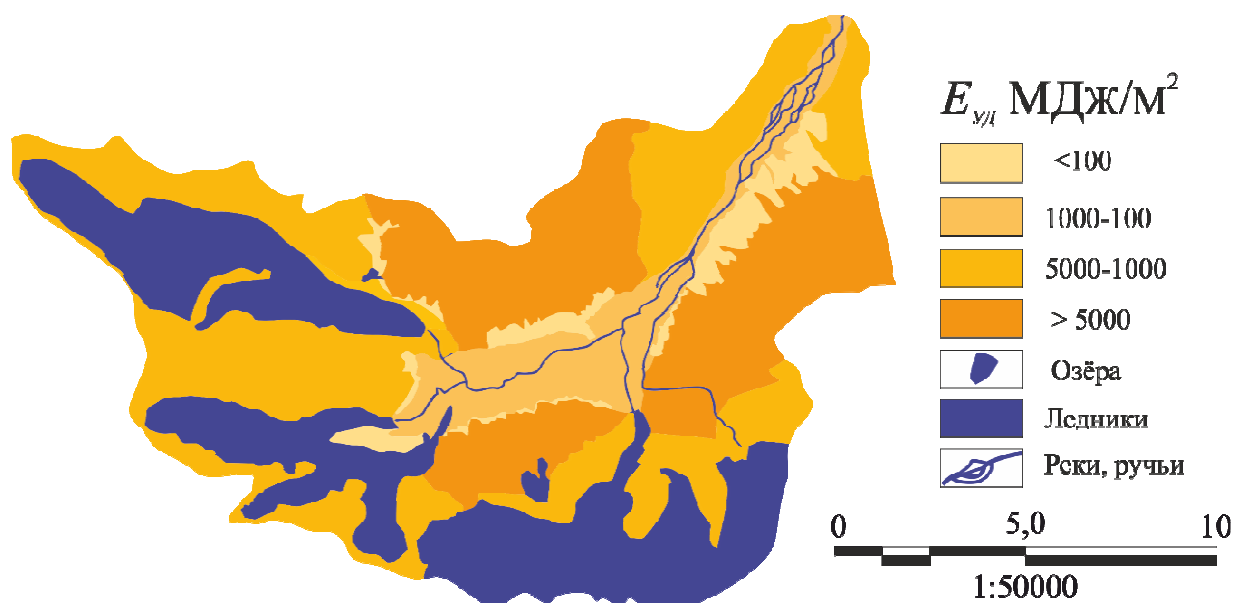


Рисунок 1. Карта-схема плотности энергетического потенциала ($E_{уд}$) горноледникового бассейна Актру (пояснения в тексте)

Карта-схема составлена на топографической основе масштаба 1:25000, морфометрические характеристики форм рельефа были получены в ходе полевых экспедиционных исследований, обработка статистической информации и составление тематических баз данных осуществлялась с использованием ГИС-программного обеспечения “ArcGIS 10.2”. Карта составлена по способу картограммы в следующей градации: $E_{уд} > 5000$ МДж – высокое значение (участки с интенсивным развитием экзогенных процессов. Расход энергетического потенциала выражается в частых камнепадах, обвалов горных пород и снежно-ледовых масс); 5000–1000 – умеренное (участки с достаточно интенсивным протеканием экзогенных процессов, с периодическими обвалами горных пород и снежных масс, а также интенсивным развитием солифлюкции); 1000–100 – низкое (участки с интенсивным развитием солифлюкции, селевых и оползневых процессов, приурочены в основном к местам распространения аккумулятивных тел); <100 – очень низкое (районы с менее интенсивным развитием экзогенных процессов, это, в основном, морены, выровненные водораздельные поверхности, долинный зандр).

Другим важным показателем при картографировании энергии рельефа, является приход солнечного тепла в геоморфологическую систему, которая определяется интенсивностью солнечной радиации. Приход солнечной радиации на дневную поверхность в геоморфосистеме Актру составляет 1,0–1,3 ккал/см² в мин. (или 4,2–5,4 Дж/см² в мин.). Суммарная солнечная радиация составляет 99,3 ккал/см² в год (или 415,6 кДж/см² в год) [3]. От величины поступающего тепла, а также от количества выпадающих осадков будут зависеть условия физического выветривания. Основными факторами выветривания в

горноледниковом бассейне Актру являются колебания температур (температурное выветривание) и морозное выветривание, происходящее в результате расширения воды, неоднократно замерзающей и оттаивающей в трещинах и порах скальных пород. Поэтому скорость выветривания пропорциональна сумме суточных амплитуд температуры и количеству ее переходов через точку замерзания воды.

Таким образом, можно сказать, что поступающая в геоморфосистемы энергия в виде солнечного пепла, в значительной своей степени расходуется на обеспечение деятельности процессов выветривания и развития криогенных процессов.

Скорость выветривания горных пород в пределах верховья горноледникового бассейна р. Актру составляет 6–8 мм/год, причём с набором высоты преобладает морозное выветривание, а на более низких участках – температурное. Общая денудация в горноледниковом бассейне, по нашим данным, составляет 2-3 мм/год [2]. Анализ факторов прихода солнечной радиации, её влияние на скорость денудации горных склонов, а также картографическое отображение – работа дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках проекта VIII.77.1.4. «Быстро развивающиеся геоморфологические процессы в ледниковой и внеледниковой зонах юга Западной Сибири, обусловленные природно-климатическими изменениями».

Список литературы

1. Кузнецов А.С. Системно-энергетический анализ динамики рельефообразующих процессов (на примере горноледникового бассейна Актру, Горный Алтай), дисс. канд. географ. Наук. – Томск, 2012. – 152 с.
2. Кузнецов А.С., Поздняков А.В. Динамика развития геоморфосистем как бинарных структур, функционирующих с насыщением (на примере горноледникового бассейна Актру) // Современные проблемы науки и образования. – 2012. № 2; URL: <http://www.science-education.ru/102-5901> (дата обращения: 06.04.2012).
3. Севастьянов В.В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. – Томск: изд-во Томского ун-та, 1998. – 202 с.
4. Спиридонов А.И. Геоморфологическое картографирование. 2-е изд., – М.: Недра, 1985. – 184 с.
5. Atlas de Riesgos Naturales Tetela de Ocampo Desarrollo de Proyectos de Gobernabilidad / S. C. Av del Parque Nápoles. México DF. 2012. - 89 p.
6. Chin A. The geomorphic significance of step-pools in mountain streams, *Geomorphology*. 2003. Vol. 55, - P. 125-137

7. Chorley R.J. Geomorphology and General Systems theory // U.S. Geological Survey: Professional Paper. 1962. Vol. 10, – 500 p.
8. Chorley R. J., Kennedy B. A. Physical Geography: A systems approach. London: Prentice-Hall International. 1971. – 370 p.
9. Kotlyakov V., Komarova A. Elsevier's Dictionary of Geography. English-Russian-French-Spanish-German. Elsevier, Amsterdam, 2007. - P. 1048.
10. Krautblattera M., Moserb M. and all. Significance of rockfall magnitude and carbonate dissolution for rock slope erosion, Geomorphology. 2012. Vol. 167–168, – P. 21–34
11. Penck A. Morphologie der Erdoberfläche. Engelhorn, Stuttgart 1894. - 245 p.
12. Rasemann S. Geomorphometrische Struktur eines mesoskaligen alpinen Geosystems. Dissertation Rheinische Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn. Bonn 2003. - 78 p.

Рецензенты:

Дюкарев А.Г., д.г.н., заведующий отделением экологических исследований ФГБУН Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, г.Томск;

Евсеева Н.С., д.г.н., заведующая Кафедрой географии, Геолого-географического факультета, Национального исследовательского Томского государственного университета, г.Томск.