

**МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 551.4.012

**В. В. БРОНГУЛЕЕВ, В. М. МУРАТОВ****ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ДЕНУДАЦИИ  
В ГОРАХ МОРФОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

Предлагается метод определения величины тотальной денудации в горах путем вычисления объема, заключенного между реконструированной доэрозионной поверхностью, с момента начала расчленения которой отсчитывается денудация, и современной поверхностью Земли. Применение метода продемонстрировано на одном из участков Северо-Западного Кавказа, для которого вычислены объем денудации, величина денудационного среза и средняя скорость денудации.

Определение объемов денудации и глубины эрозионного среза за разные отрезки геологической истории — одна из важнейших задач геоморфологического анализа. Ее решение необходимо как для определения возраста рельефа, так и в чисто прикладных целях. В частности, учет глубины денудационного среза (т. е. объема денудации, отнесенного к площади) весьма важен для прогноза поисков месторождений рудных полезных ископаемых.

Обычно для определения объема денудации прибегают к различным косвенным методам. Наиболее распространенные из них — метод подсчета объема коррелятных отложений в предгорьях и метод восстановления денудированного разреза в осевых частях антиклиналей путем реконструкции воздушных складок, которые протягиваются сюда из смежных синклиналей, где сохранились более полные разрезы. Этот последний прием широко использован, например, в недавно вышедшей монографии В. А. Растворовой (1973). В последние годы о минимальных величинах денудационного среза стало возможным судить и непосредственно — по интрузиям, срезанным денудационными поверхностями выравнивания на водоразделах. При этом учитывается предположительная первоначальная глубина застывания интрузии (Криволуцкий, 1971; Растворова, 1973; Масуренков, 1961, и др.). Наконец, делались попытки определения объема денудации путем экстраполяции в геологическое прошлое данных о современном твердом стоке рек, дренирующих горную территорию.

К сожалению, каждый из указанных методов имеет довольно ограниченную сферу применения, причем отнюдь не всегда можно рассчитывать на сколько-нибудь надежные результаты. При подсчете объема коррелятных отложений основная трудность интерпретации результатов обычно заключается в том, что в пределах изучаемой территории сохраняется лишь часть осадков и, таким образом, цифры оказываются существенно заниженными. Много трудностей встречается при восстановлении удаленного денудацией разреза. Например, в случае конседи-

ментационной складчатости, при мощном накоплении осадков в синклиналях, в осевых частях антиклиналей таковое может вообще не происходить. При определении абсолютного возраста интрузий, срезанных водораздельными поверхностями выравнивания, существует опасность радиометрического омоложения; в некоторых случаях интрузии могут испытывать самостоятельное тектоническое поднятие на фоне окружающей территории. Недостаточно надежны и попытки экстраполировать в геологическое прошлое данные о современном твердом стоке из-за частой и резкой изменчивости климата Земли (во всяком случае, в областях умеренного климата). По-видимому, на практике необходимо сочетать различные подходы для взаимного контроля и коррекции полученных результатов, а также искать новые методы. Один из них авторы и предлагают в данной работе.

Есть основания утверждать, что рельеф многих горных территорий был создан благодаря поднятию и расчленению некой исходной поверхности. Естественно, что в этих случаях весь материал, снесенный с данной территории, первоначально располагался между современной поверхностью Земли и исходной поверхностью, позднее подвергшейся денудации. Для большинства территорий за эту поверхность естественно принять доорогенную поверхность выравнивания. Если она может быть реконструирована по сохранившимся фрагментам, то существует возможность высчитать объем пространства, заключенный между ней и современной поверхностью Земли, т. е. тем самым вычислить объем денудации. Исходная поверхность, конечно, могла быть деформирована тектоническими движениями. При вертикальных движениях дневная и исходная поверхности должны были деформироваться практически параллельно, т. е. объем, заключенный между ними, не должен был существенно меняться. Однако при горизонтальных смещениях внутри исследуемой территории (в особенности типа надвигов) могло происходить весьма сильное искажение этого объема. Поскольку учет горизонтальных деформаций в этом смысле крайне затруднен, если вообще возможен, то в таких случаях можно поступать следующим образом: вначале выбирать «эталонные» участки — жесткие блоки, в пределах которых значительные горизонтальные смещения заведомо не происходили, затем результаты вычислений по таким участкам экстраполировать на территории с более сложной геологической структурой, но обладающие сходным типом расчленения.

Величина объема денудации на некоторой территории, очевидно, равна средней мощности удаленных пород, умноженной на площадь этой территории. Средняя мощность в свою очередь равна разности средних высот исходной и современной поверхностей, т. е.

$$V = (\varphi - f) S, \quad (1)$$

где  $V$  — объем денудации,  $\varphi$  — средняя высота реконструированной поверхности,  $f$  — средняя высота современного рельефа,  $S$  — площадь исследуемой территории (горизонтальная проекция). Простой геоморфологический смысл выражения (1) делает совершенно очевидным принципиальное ограничение точности подсчетов  $V$ . В самом деле, если величину  $f$  можно вычислить практически с любой точностью, то не так обстоит дело с  $\varphi$ . Точность этой величины определяется совокупностью данных о сохранившихся фрагментах поверхности выравнивания, т. е. надежностью ее реконструкции. Ошибка величины  $\varphi$  оценивается в основном из качественных соображений.

Ошибка средней мощности удаленных денудаций пород определяется следующим образом:

$$\Delta(\varphi - f) = \Delta\varphi + \Delta f, \quad (2)$$

где  $\Delta$  означает абсолютную ошибку соответствующей величины. Если

$\Delta\varphi$  каким-то образом оценена, то  $\Delta f$  разумно ограничить условием, например  $\Delta f < \frac{1}{2} \Delta\varphi$ , или, по крайней мере,  $\Delta f < \Delta\varphi$ . Эти условия произвольны, но ясно, что если, например,  $\Delta\varphi = 100-200$  м, то в общем случае нецелесообразно доводить точность  $f$  до 1-10 м. При вычислении самого объема денудации  $V$  величина ошибки определяется как

$$\Delta V = S\Delta(\varphi - f) + (\varphi - f)\Delta S \quad (3)$$

(см., например, Иверонова, 1956). Здесь точно так же в зависимости от величин  $\varphi - f$  и  $S\Delta(\varphi - f)$  следует уменьшать  $\Delta S$  до таких пределов, чтобы второе слагаемое в правой части не сильно увеличивало общую

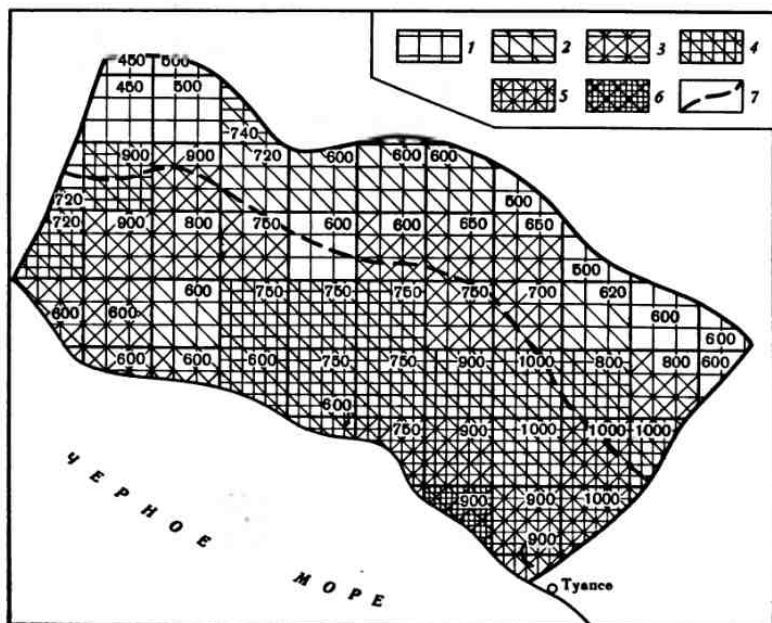


Рис. 1. Схема распределения денудационного среза

Величины денудационного среза (в м): 1 — 200—300, 2 — 300—400, 3 — 400—500, 4 — 500—600, 5 — 600—700, 6 — более 700, 7 — линия современного водораздела. Цифрами показаны высоты реконструированной исходной поверхности (в м)

сумму. При практической работе с картами площадь  $S$  обычно легко может быть определена с ошибкой, достаточно малой для того, чтобы этим слагаемым вообще можно было бы пренебречь.

Эти общие соображения мы использовали для вычисления объема денудации на конкретной территории — одном из участков низкогогорного (менее 1000 м абс.) рельефа площадью около 4000 км<sup>2</sup>, располагающимся в срединной части Северо-Западного Кавказа. На южном склоне он захватывает побережье между Туапсе и Солнцедаром, на севере его граница проходит у северного подножия передовой куэсты (между Хадженском и Ахштырском). В целом выбранный участок отвечает Джубгинской и Геленджикской тектоническим ступеням (Хаин, Муратов, 1962). Район со всех сторон ограничивается крупными дизъюнктивными нарушениями: с юга — Черноморским разломом, с востока — Туапсинским, с севера и запада — крупными безымянными разломами. Примечательной особенностью района, послужившей решающим фактором при его выборе, явилось то обстоятельство, что здесь очень широко распространены вершинный геоморфологический уровень с прекрасно выдержанными на больших протяжениях высотами (рис. 1). Последние, естественно, снижаются на ареалах распространения неустойчивых к

размыву литологических комплексов. Кроме того, существенное снижение высот отмечается в северной предгорной полосе и в приморских районах. Уровень является вершинным, т. е. представлен выложенными площадками вершин и узкими полосками водоразделов наиболее высоких хребтов. Это — остатки основной региональной поверхности выравнивания, длительно формировавшейся здесь вплоть до начала активных поднятий. Поверхность, вероятно, датируется поздним миоценом, так как, судя по коррелятным отложениям, до этого времени здесь не происходило формирования моласс. Вместе с тем эта поверхность древнее понта, так как понтическая поверхность выравнивания к ней приклонена (Хаин, Муратов, 1962).

Таким образом можно предполагать, что на новейшем этапе весь район (за исключением северной и южной периферических зон) поднимался как единое целое. Дифференцированные движения небольшой амплитуды здесь, разумеется, происходили (рис. 1). Отмечается, в частности, постепенное снижение территории с востока на запад вслед за общим погружением мегантиклинория Большого Кавказа в этом направлении, а также снижение высот от осевой части к северу и югу. Этот общий фон закономерного изменения высот осложняется субмеридиональным поперечным поднятием в восточной части участка. Максимальные амплитуды дифференцированных движений достигают 550 м. Неравномерность поднятий была учтена нами при реконструкции исходной поверхности.

Подсчеты денудационного среза и объема денудации проводились по среднемасштабным топографическим картам. В процессе работы соблюдались следующая последовательность действий.

1. Определение средней высоты исходной поверхности. Так как поверхность не является строго одновысотной в пределах данного региона, то вся территория была разбита на серию квадратов со стороной 10 км (на карте — 5 см), и каждому из них было приписано некое значение высоты этой поверхности. Эти значения определялись высотой сохранившихся фрагментов, входящих в данный квадрат. В тех случаях, когда остаточные высоты не сохранились (на полях развития малоустойчивых пород), соответствующие значения определялись интерполяцией данных с соседних участков. Средняя высота исходной поверхности была вычислена как средневзвешенная для всех квадратов. Она оказалась равной 740 м. Абсолютная ошибка высоты была принята равной 50 м. Эта ошибка не является случайной ошибкой измерений; она связана с неопределенностью нашей реконструкции — с возможными неучтенными неровностями исходной поверхности. Нами не принималось во внимание, однако, возможное, но на сегодняшний день, не поддающееся оценке общее снижение водоразделов (например, за счет химической денудации)<sup>1</sup>. Таким образом, получаемые далее оценки объема денудации, возможно, являются лишь минимальными. Рассчитываемые ошибки результатов характеризуют точность метода и не включают в себя указанную неопределенность в высотном положении исходной поверхности. В тех случаях, когда общим снижением поверхности заведомо можно пренебречь, приводимые формулы могут быть использованы без оговорок<sup>2</sup>.

2. Определение средней высоты современной поверхности. Она вычислялась известным методом как среднее арифметическое множество точечных измерений, по формуле

<sup>1</sup> Хотелось бы подчеркнуть, что хотя такой процесс теоретически возможен, в литературе нет никаких данных о его сколько-нибудь значительных проявлениях в умеренном поясе.

<sup>2</sup> Для рассматриваемой территории такое общее снижение поверхности, строго говоря, не исключено, однако нас в первую очередь интересовала методическая сторона дела.

$$\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i, \quad (4)$$

где  $f_i$  — результат единичного измерения,  $N$  — полное число измерений (Бочаров, Николаев, 1957). С этой целью на карту накладывалась ортогональная сетка со стороной квадрата 2 см, в узлах которой снимались отметки высот рельефа. В нашем случае  $N=260$ . Ошибка величины  $\bar{f}$  при таком способе измерений может быть оценена следующим образом:  $\Delta f = \pm m/\sqrt{N}$ , где  $m$  — ошибка одного измерения. Эта последняя складывается из возможного отклонения истинной средней высоты в данном квадрате от значения, измеренного в одной его точке, и из ошибки карты, которая в условиях горного рельефа может быть принята равной удвоенному заложению горизонталей (Бочаров, Николаев, 1957). Величина  $\bar{f}$  оказалась равной  $257 \pm 36$  м. Возможная ошибка одного отсчета была принята равной 580 м (заложение горизонталей — 40 м). Было также проведено контрольное вычисление  $\bar{f}$  для той же территории по сетке со стороной квадрата 1 см ( $N=1038$ ), давшее следующий результат:  $\bar{f} = 264 \pm 12$  м. Величина  $m$  была принята равной 380 м. Как видно, разница результатов незначительна, т. е. для вычисления средней высоты районов подобного типа вполне достаточно густоты точек, использованной в первом случае.

Таким образом, средняя мощность удаленных денудацией пород  $\varphi - \bar{f} = 483 \pm 86$  м.

3. Вычисление объема денудации. Он подсчитывался по формуле (1). Площадь всего района составляет  $4150 \text{ км}^2$ . Неточностью в ее определении мы пренебрегли, и при вычислении ошибки  $\Delta V$  по формуле (3) второе слагаемое в ее правой части отбросили. В результате получено значение (округленное до трех значащих цифр):  $V = 2000 \pm 360 \text{ км}^3$ .

Найденные числовые характеристики позволяют, как нам кажется, несколько по-новому подойти к геоморфологическому анализу территории. Как известно, существуют различные морфометрические характеристики рельефа: глубина расчленения, густота расчленения и т. д., которые тем или иным образом косвенно отражают «стадии его относи-

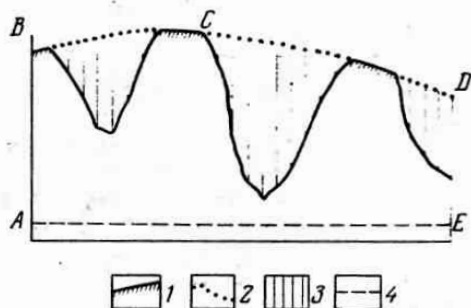


Рис. 2. К определению коэффициента денудации  
1 — сохранившиеся фрагменты исходной поверхности, 2 — реконструированные участки исходной поверхности, 3 — объем денудации, ABCDE — полный объем ( $V_n$ ), 4 — базис эрозии (AE)

тельной зрелости». С той же целью мы предлагаем ввести «коэффициент денудации» (к. д.), определяемый как отношение объема пород, фактически удаленных денудацией (объема «пустоты»), ко всему объему, который потенциально может быть удален с данной территории при фиксированном положении базиса эрозии (рис. 2). Или, в буквенной записи:

$$K_d = V/V_n, \quad (5)$$

где  $K_d$  — коэффициент денудации,  $V$  — объем денудации,  $V_n$  — полный объем пород, который может быть удален. Очевидно, в момент начала денудации,  $K_d=0$ , а при полной завершенности процесса  $K_d=1$ . Таким образом, в отличие от многих других морфометрических показателей

коэффициент денудации непосредственно характеризует «степень завершенности денудационного цикла».

Легко видеть, что поскольку величины объемов, входящие в формулу (5), относятся к одной и той же площади, их отношение можно заменить отношением соответствующих мощностей: в числителе должна стоять  $\varphi - \bar{f}$  — средняя мощность удаленных пород, в знаменателе —  $\varphi'$  — средняя высота исходной реконструированной поверхности над базисом эрозии<sup>3</sup>. Выбор базиса эрозии ( $AE$  на рис. 2) зависит от геоморфологической позиции территории, взятой для анализа. В одних случаях он будет совпадать с уровнем моря, в других с уровнем подгорных равнин или днищ межгорных впадин или, наконец, с уровнем прилегающих платформенных территорий. Вместе с тем очевидно, что выбор базиса эрозии в свою очередь определяет масштабы объектов для анализа.

Для рассматриваемой территории мы вычислили к. д., приняв за базис эрозии уровень моря. К. д. оказался равным  $0,65 \pm 0,12$ . Это означает, что на рассматриваемом участке денудацией снесено уже более половины полного объема массива. По-видимому, как одно из морфологических проявлений столь глубокого среза можно рассматривать серию денудационно-литологических депрессий (Дефановская, Шебшинская и др.). Было бы чрезвычайно интересно сравнить полученный к. д. с таковым для других типов низкогорного рельефа. Априори представляется вероятным существование связи между к. д. и относительной площадью, занимаемой в рельефе денудационно-литологическими депрессиями. В тех случаях, когда подобная связь подтвердится, можно будет утверждать, что разрушение низкогорного рельефа происходит главным образом «сбоку», путем расширения межгорных депрессий.

Определение средней глубины денудации дает возможность рассчитать среднюю скорость снижения рельефа. Принимая время начала денудации 10 млн. лет тому назад (Геол. словарь, 1973), получаем скорость, равную  $0,05 \text{ мм/год}$ . Средняя скорость поднятия за тот же период —  $0,07 \text{ мм/год}$ .

Интересно сопоставить эти данные со значениями современных скоростей поднятия —  $1-3 \text{ мм/год}$  (Лилиенберг и др., 1969) и денудации. Мы смогли оценить скорость современной тотальной денудации только для северного склона выбранного участка (суммарная площадь водосборов —  $1824 \text{ км}^2$ ), пользуясь данными М. Я. Прытковой (1969) по твердому стоку рек Псекупс, Афипис, Убинь-су, Шебш. Эти данные получены на основании девятилетних (в среднем) наблюдений. Усреднив эти данные с учетом площади водосборов отдельных рек, мы получили модуль твердого стока для всего северного склона рассматриваемой территории —  $175 \text{ т/км}^2$ . Из этого следует, что с данной территории в среднем ежегодно сносится слой породы в  $0,07 \text{ мм}$  (при плотности  $2,5 \text{ г/см}^3$ ). С одной стороны, полученная величина несколько занижена, так как при определении не учитывался химический сток, хотя, судя по немногочисленным данным, имеющимся в литературе, для внекарстовых территорий при общем большом объеме твердого стока (как в данном примере) участие химического стока незначительно и не превышает первых процентов. С другой стороны, существенная часть территории подверглась хозяйственному освоению (вырубка лесов, распашка), в результате чего величина современной денудации несколько превышает «естественную». Таким образом можно допустить, что полученная оценка  $0,07 \text{ мм/год}$  приближается к истинной.

Итак, скорость современной денудации оказалась одного порядка со средней скоростью денудации за 10 млн. лет и на порядок меньше скорости современных поднятий.

<sup>3</sup> Величина  $\varphi'$  может и не совпадать с абс. высотой  $\varphi$ , когда базис эрозии не совпадает с уровнем моря.

Вообще говоря, скорость денудации по мере поднятия территории при неизменных климатических условиях должна была бы увеличиваться от 0 до современных значений. Отсюда напрашивается вывод, что в какие-то периоды времени климатические условия должны были быть существенно иными, чем современные, способствуя значительно более интенсивной денудации.

\* \* \*

Предложенный метод, как нам кажется, интересен прежде всего тем, что позволяет определить глубину денудационного среза независимо от других существующих методов. Правда, он отнюдь не универсален и применим только в тех случаях, когда возможна реконструкция исходной поверхности. Однако область его применения достаточно широка, так как подобные случаи встречаются часто. Вместе с тем метод не трудоемок и позволяет быстро получать численные характеристики денудации для значительных территорий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бочаров М. К., Николаев С. А. Математико-статистические методы в картографии. М., Геодезиздат, 1957.  
Геологический словарь. М., «Недра», 1973.  
Иверонова В. И. Общий физический практикум. М., Физматгиз, 1956.  
Кривошукский А. Е. Жизнь земной поверхности. М., «Мысль», 1971.  
Лилиенберг Д. А., Матцкова В. А., Горелов С. К., Думитрашко Н. В., Муратов В. М. Карта современных вертикальных движений и морфоструктуры Кавказа. В сб. «Проблемы современных движений земной коры». М., 1969.  
Масуренков Ю. П. Кайнозойский вулканизм Эльбрусской вулканической области. Тр. ГИН АН СССР, вып. 51, М., 1961.  
Прыткова М. Я. Природные условия и сток наносов рек и малых водотоков Предкавказья. В сб. «Затопление малых водохранилищ Предкавказья». Л., Изд-во ЛГУ, 1969.  
Растворова В. А. Формирование рельефа гор. М., «Наука», 1973.  
Хашин В. Е., Муратов В. М. О поперечной ступенчатости в рельефе С-З Кавказа. В кн. «Сборник материалов Комплексной южной геологической экспедиции (КЮГЭ)», вып. 7. Л., 1962.

Институт географии  
АН СССР

Поступила в редакцию  
29.V.1975

---

#### AN EXPERIENCE OF MORPHOMETRIC ESTIMATION OF DENUDATION VALUE AT MOUNTAINS

V. V. BRONGULEYEV, V. M. MURATOV

#### Summary

A method is introduced for estimation of total denudation at mountains by calculating of the volume between the present earth surface and reconstructed pre-orogenic surface; the denudation is calculated for time interval since the beginning of the pre-orogenic surface dissection. The technique application is illustrated by a site at the North-West Caucasus, denudation volume, denudation cut-off value and average rate of denudation being calculated.

---