

characterized with high density of fractures. Neotectonic faults are mainly upthrusts, strike-slip faults and tear faults. There were established three types of neotectonic rejuvenation of ancient faults: direct rejuvenation, dispersion and shift. In case of direct rejuvenation the neotectonic movements take place directly along the ancient fault plane, in case of dispersion a zone of neotectonic fractures develops instead of a single fault, while in case of shift the most active neotectonic movements take place aside of the ancient tectonic suture.

The method of geomorphological lineaments applied to disjunctive dislocations can be useful for regional and detailed geological studies and ore prospecting including those in ore regions and within ore fields.

УДК 551.4.042 : 519.2

КАДЕТОВ О. К.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОДОЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ РЕК ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МОРФОСТРУКТУР

Продольный профиль реки представляет собой сложную кривую, в форме которой отражено влияние целого ряда факторов, важнейшие из них — распределение расходов по длине реки, строение ложа (литология), положение базиса эрозии, дифференцированные тектонические движения (Марков, 1948; Маккавеев, 1955, 1971; Мещеряков, 1965, и др.) Выделить и оценить роль тектонических движений можно, исключив влияние остальных факторов. Если это удастся сделать, то анализ продольных профилей получает важное значение при морфоструктурных исследованиях, в особенности для слабоизученных районов, где приходится пользоваться главным образом данными морфометрии.

Один из наиболее доступных и объективных приемов структурно-геоморфологических исследований — статистический. Он позволяет обнаружить «геоморфологические аномалии, которые представляют собой резкие отличия величин изучаемых свойств на каком-либо участке от средних, «фоновых» значений, характерных для всего объекта в целом» (Воробьев и др., 1971).

В основу предлагаемого способа анализа положена зависимость между морфометрическими характеристиками продольного профиля и площадью водосбора реки. В качестве главного критерия оценки формы кривой профиля принят показатель «относительной глубины» эрозионного расчленения в данном створе Z (рис. 1, а). Он определяется как разность высот условного уровня H_a , соответствующего отметке некоторого пункта в верховьях реки, и данной точки продольного профиля h_n :

$$Z_n = H_a - h_n. \quad (1)$$

Распределение величин показателя Z по длине реки характеризует форму продольного профиля и наряду с этим тесно связано с изменяющимися по длине водотока уклонами i — основным показателем, используемым при изучении продольных профилей. Однако при измерении уклонов возможны ошибки, так как уклоны значительно меняются на небольших расстояниях в зависимости от местных условий. Измеренная вели-

чина уклона во многом зависит от степени осреднения, т. е. от расстояния (вверх и вниз от заданной точки), на котором проводилось измерение падения (рис. 1, б). Из-за подобных ошибок не всегда удастся выявить аномалии, анализируя только уклоны. Использование показателя относительной глубины расчленения упрощает измерения координат кривой профиля, повышает их надежность, т. е. дает возможность проводить более строгий анализ. Современные крупномасштабные карты обеспечивают достаточную точность измерения высоты точки на профиле.

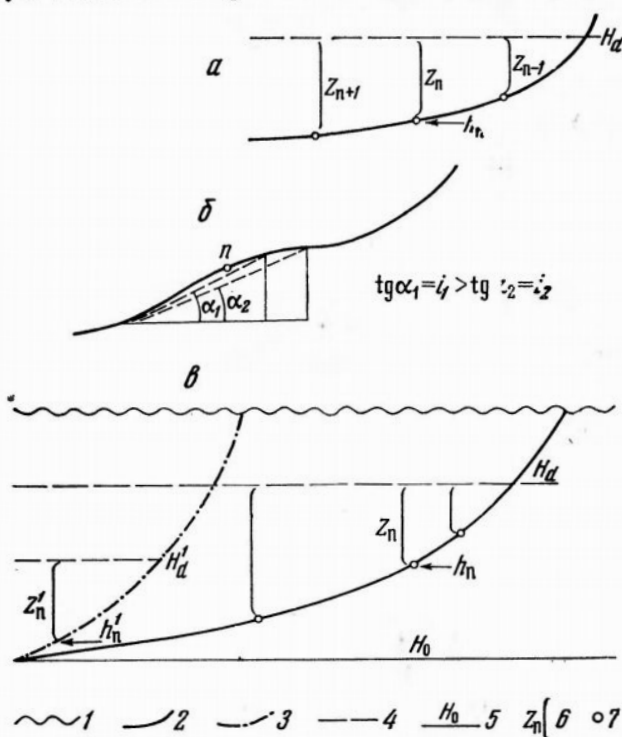


Рис. 1. Определение показателей, характеризующих форму продольного профиля (см. объяснения в тексте)

1 — реальная поверхность (уровень водораздела), 2, 3 — линии продольных профилей водотоков с разной длиной и площадью водосбора, 4 — условные уровни H_d и H'_d , 5 — уровень общего базиса эрозии, 6 — величина относительной глубины эрозионного расчленения в данной точке, 7 — положение анализируемых точек

Остановимся на определении физического смысла выбранного показателя и оценке факторов, влияющих на его изменения по длине реки. Величина Z , как указывалось выше, характеризует глубину вреза днища долины в данной точке по отношению к условному уровню H_d . Для выработанного продольного профиля¹, в случае однородного геологического строения ложа реки, эта величина должна закономерно возрастать от истока к устью (с увеличением расходов в том же направлении). При этом темпы возрастания Z постепенно убывают.

Эрозионное расчленение происходит в результате работы по выносу из долины некоторого количества твердого материала. Величина этой

¹ Под выработанным профилем понимается кривая, выработанная водным потоком в течение геологически длительного времени в относительно стабильных условиях, с уклонами, не искаженными недавними дифференцированными тектоническими движениями. Это определение (С. С. Воскресенский, К. С. Воскресенский, 1975) не противоречит предложенному Н. И. Маккавеевым (1971). Форма такого профиля соответствует выровненной удельной транспортирующей способности потока по длине реки.

работы находится в определенной зависимости от мощности потока N и времени его действия t . Кроме того, на результат работы оказывает влияние еще целый ряд других факторов, например интенсивность поступления продуктов денудации со склонов долины и междуречий, относительная высота базиса эрозии и др. Тем не менее при прочих равных условиях, чем больше мощность потока, тем большую глубину эрозионного расчленения (глубину вреза в данной точке) способен он обеспечить за одно и то же время. В этом смысле

$$Z=f(N). \quad (2)$$

Используя широко применяемые как при практических гидрологических расчетах, так и при теоретических построениях формулы (Справочник..., 1972; Караушев, 1969), можно показать, что мощность потока пропорциональна произведению уклона i на расход Q :

$$N=\gamma QiL, \quad (3)$$

где γ — объемный вес воды, L — расстояние между створами, ограничивающими рассматриваемый участок долины.

Многие исследователи отмечают, что между уклонами и расходами воды в свою очередь существует обратная зависимость, так как обычно по длине реки прослеживается убывание уклона по мере роста расходов. Н. И. Маккавеев (1955) вывел следующую «иллюстративную» (по определению автора) формулу:

$$i=K_0/Q^r, \quad (4)$$

где Q — формирующий расход воды, i — уклон, K_0 — коэффициент, отражающий геологические и гидрологические условия формирования продольного профиля. Если в формулу (4), согласно закону неразрывности, ввести в явном виде скорость течения, то ее можно представить так:

$$iQ^r=V^a K^n n^e, \quad (5)$$

где V — скорость течения, K — коэффициент, зависящий от литологии дна долины, n — коэффициент шероховатости Маннинга.

Процесс выравнивания удельной транспортирующей способности потока (Маккавеев, 1955, 1971) приводит к закономерному распределению скоростей течения по длине реки. Обычно у равнинных рек с выработанным продольным профилем и однородным геологическим строением дна долины при прохождении формирующих расходов воды скорость течения приблизительно одинакова от истоков до устья. Это явление обнаружено Н. И. Маккавеевым при анализе данных о скорости течения в половодье на крупных реках Русской равнины. Ту же «удивительную закономерность» отметили С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель (1952). Итак, при выработанном продольном профиле и в случае однородной литологии и морфологии ложа потока произведение iQ^r близко к постоянной величине. Значение показателя r меняется в зависимости от того, какая эмпирическая формула будет использована при выводе выражения (5). Использование формулы В. Г. Глушкова (1925) дает $r \approx 0,44$; формулы Лэси и Пэтиса (Маккавеев, 1955) соответственно $r \approx 0,55$ и $r \approx 0,53$. В порядке первого приближения принимаем $i\sqrt{Q} \sim \text{const}$. Для малых рек с площадью водосбора F менее 1000 км^2 , у которых модуль стока практически не меняется по всему бассейну, расход воды можно заменить площадью водосбора:

$$i\sqrt{F} \sim \text{const}. \quad (6)$$

С. С. Воскресенский и К. С. Воскресенский (1975) в результате анализа продольных профилей многих рек показали, что зависимость (6) при измерениях уклонов по оси долины прослеживается в разных геоморфологических провинциях. Тот же результат получили, анализируя данные по ряду рек, В. Н. Орлянкин (1970) для «нормального» (по Ю. А. Мещерякову) профиля, а также Л. Н. Былинская (1974), используя данные по рекам Среднерусской возвышенности.

Таким образом, зависимость между уклоном и площадью водосбора можно записать следующим образом:

$$i = \delta / F^r, \quad (7)$$

где величина r , по нашим данным, близка к 0,5, а δ постоянна по длине реки в случае выработанного профиля и однородной литологии.

Все сказанное выше позволяет представить выражение (2) в следующем виде:

$$Z = f(\gamma MFL\delta / F^r) = f(\gamma ML\delta F^{1-r}), \quad (8)$$

где M модуль стока.

Примем L за величину постоянную. Допустив, что постоянство мутности является признаком выравнивания транспортирующей способности потока (Маккавеев, 1955), для выработанного профиля можно принять также $\gamma = \text{const}$. Исключив все постоянные, получим

$$Z = f(F^{1-r}). \quad (9)$$

Раскрыв функцию и выровнив эмпирические ряды, можно рассчитать параметры уравнения, характеризующего связь между глубиной относительного расчленения и площадью водосбора. Сделать это можно для каждой реки в отдельности, выбирая отметку, определяющую высоту условного уровня H_a (рис. 1, а), произвольно. Но проводя расчеты для группы рек, приходится учитывать положение анализируемых точек относительно базиса эрозии. Представим себе два водотока, врезанные в однородную поверхность, например аккумулятивную террасу крупной реки. Оба водотока привязаны к единому базису эрозии, сформировали выработанные продольные профили, но имеют разную длину и разную площадь бассейна, что довольно часто встречается в реальных условиях. Очевидно, вблизи устья при разных значениях F глубина вреза обоих водотоков по отношению к поверхности террасы практически одинакова. И, наоборот, в точках h_n и h_n^1 с равной площадью водосбора (рис. 1, в) глубина расчленения исходной поверхности различна потому только, что они находятся на разном расстоянии от базиса эрозии (все остальные условия одинаковы). Пример наглядно показывает, что оценивать глубину расчленения, созданную различными водотоками, по отношению к реальным отметкам водоразделов или по отношению к единому условному уровню нельзя, если мы хотим сравнить полученные величины. Поэтому следует определять высоту условного уровня H_a для каждой реки в отдельности. На любом продольном профиле может быть выбрана точка с площадью водосбора F_a (единая для всех рек величина). Отметка этой точки соответствует высоте условного уровня (на рис. 1, в — H_a и H_a^1). Условие $Z = f(F^{1-r})$ соблюдается для значений Z по отношению к уровню H_a , а для значений Z^1 — по отношению к уровню H_a^1 ; и если $F_n = F_n^1$, то $Z_n = Z_n^1$. Таким образом, вводится поправка на положение относительно базиса эрозии, что позволяет перейти к обработке натурных измерений.

Чтобы определить вид уравнения, раскрывающего связь $Z = f(F^{1-r})$, для нескольких рек были построены графики изменений значений Z в зависимости от площади водосбора. Все они приближенно описываются

уравнением степенной функции вида

$$Z = AF^b - c. \quad (10)$$

Свободный член c корректирует положение условного уровня H_a , выше которого деятельность потока уже не определяет код реальных процессов, так как мощность потока слишком мала. Величина c отрицательная (Z становится равным 0 при некотором $F > 0$).

Для упрощения расчетов принималось

$$Z = aF^b, \quad (11)$$

так как отрицательная область значений Z физического смысла не имеет, и поэтому она не учитывалась. График функции $Z = aF^b$ тот же, что и функции $Z = AF^b - c$ (при $a = A$ и $b = B$), но смещенный относительно оси ординат на величину c . В результате упрощения при определении параметров a и b возникает ошибка. Однако эта ошибка, как показал опыт, существенного влияния не оказывает: рассчитанные по формулам (10) и (11) теоретические значения Z в данной точке отличаются на незначительную величину, которая совершенно не искажает общую ситуацию.

Определив параметр b для каждой точки, можно подсчитать реальное значение $Z_n/F_n^b = m_n$. Назовем этот показатель «приведенной относительной глубины расчленения». Он учитывает площадь водосбора K в данной точке. При помощи этого показателя вводятся поправки на возрастающие по длине реки расходы, что позволяет сравнивать глубину относительного эрозионного расчленения у рек с разной водностью. Теоретически при постоянных значениях всех коэффициентов, входящих в формулу (8), величина m должна быть строго постоянной ($m = a = \text{const}$), что возможно лишь при выработанных продольных профилях рек, находящихся в абсолютно одинаковых условиях. В природе такое встречается редко. Поэтому параметр a (коэффициент в уравнении $Z = aF^b$) является лишь средней фоновой характеристикой, отклонения от которой ($m_n - a$) неизбежны. При большом объеме выборки показатель a характеризует обобщенные, осредненные условия формирования продольных профилей, которые и являются «нормальными» для рассматриваемой территории.

Возникает вопрос: не будет ли влияние факторов, не поддающихся морфометрической оценке, столь велико, что отклонения окажутся неупорядоченными, иными словами, не будет ли разброс истинных значений m слишком большим и физический смысл среднего значения a как фоновой «нормальной» характеристики потеряется? Ответ на этот вопрос дал анализ фактического материала. Были проведены измерения относительной глубины расчленения Z_n для 601 точки, расположенных в бассейне р. Буринды (верхнее Приамурье) на площади около 3,5 тыс. км². Обработка данных измерений проводилась на ЭВЦМ географического факультета МГУ по программе, составленной В. И. Кленовым. Все анализируемые точки были разбиты на массивы в зависимости от твердости подстилающих пород². Для каждого массива в отдельности и для всей совокупности точек в целом были определены параметры a и b , значения приведенной относительной глубины расчленения в каждой точке m_n и отклонения $m_n - a$. Расчеты показали, что значения параметра b для разных массивов колеблются в интервале от 0,20 до 0,73 при среднем значении 0,38, а параметра a — в интервале от 10,05 до 50,2 при среднем значении 22,72. Максимальные отклонения $m_n - a$ составили 25—30 единиц.

Полученный результат позволяет говорить о том, что показатель a является реально характеризующей нормальные условия величиной, к которой тяготеет абсолютное большинство значений m . В качестве при-

² Тем самым вводится поправка на литологию.

мера приведем график изменений значений $m_n - a$ для точек, расположенных на участках распространения юрских осадочных отложений (рис. 2). Для массива этих точек средняя квадратическая ошибка аппроксимации составила наибольшую среди всех проанализированных массивов величину — 35,14. Тем не менее на графике видно, что при среднем значении $a = 28,5$ более 70% точек имеют очень небольшие отклонения (всего несколько единиц) от среднего уровня. Остальные точки значительно отклоняются, что указывает на аномалии. Возникновение послед-

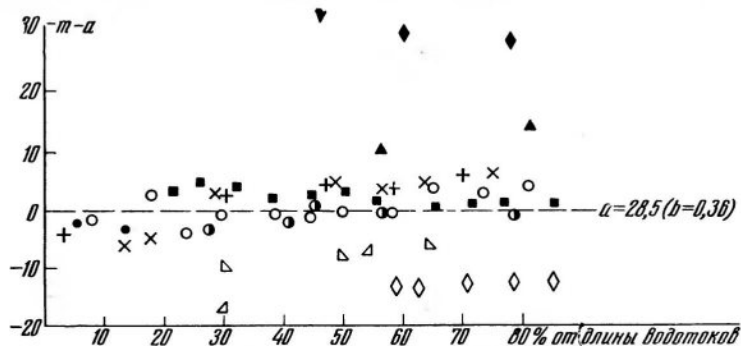


Рис. 2. График распределения значений $m_n - a$

Одинаковым значком отмечены точки, расположенные на одном продольном профиле

них может быть связано с дифференцированными тектоническими движениями, так как поправки на остальные важнейшие факторы (водность, литология, положение базиса эрозии) учтены и решающего влияния на величину отклонения $m_n - a$ оказать не могут.

Полученные отклонения $m_n - a$ можно вынести на схему. Исключив из рассмотрения локальные, не прослеживающиеся по смежным водотокам аномалии, можно интерпретировать эту схему с морфоструктурных позиций.

ЛИТЕРАТУРА

- Былинская Л. Н. Изучение современных тектонических движений геоморфологическими и статистическими методами. М., «Наука», 1974.
- Воробьев В. Я., Наумов А. Ф., Аристотелева Г. Ф. Статистический метод выделения геоморфологических аномалий. В сб. «Математические методы в географии». Казань, Изд-во Казанск. ун-та, 1971.
- Воскресенский С. С., Воскресенский К. С. Выработанный продольный профиль реки. «Геоморфология», № 1, 1975.
- Глушков В. Г. Морфология речного русла. «I Всероссийский гидрологический съезд. Труды». Л., 1925.
- Караушев А. В. Речная гидравлика. Л., ГИМИЗ, 1969.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Л., ГИМИЗ, 1952.
- Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., Изд-во АН СССР, 1955.
- Маккавеев Н. И. Сток и русловые процессы. «Тезисы лекций для геоморфологов». М., Изд-во МГУ, 1971.
- Марков К. К. Основные проблемы геоморфологии. М., Географгиз, 1948.
- Мещеряков Ю. А. Структурная геоморфология равнинных стран. М., «Наука», 1965.
- Орлянкин В. Н. Новый метод построения нормального профиля рек в целях морфоструктурного анализа. В сб. «Структурно-геоморфологические исследования в Сибири», вып. 1. Новосибирск, 1970.
- Справочник по гидравлическим расчетам, ред. Киселев П. Г. М., «Энергия», 1972.