

16. Скублова Н. В. Структурно-геоморфологические методы в прогнозно-металлогенических исследованиях. Л.: Недра, 1987. 177 с.
17. Анализ космических снимков при тектономагматических исследованиях. М.: Наука, 1979. 164 с.
18. Кутейникова Н. С., Кутейников Е. С. Выявление покровных структур на дистанционных снимках и их роль в металлогении//Принципы и методика дистанционных исследований при прогнозировании твердых полезных ископаемых. СПб.: Недра, 1992. С. 32—37.
19. Бергер В. И., Мурина П. А. Новые данные о возрасте ртутного оруднения Байкальского пояса//Докл. АН СССР. 1972. Т. 203. № 3. С. 647—649.
20. Кутейникова Н. С. Шарьяжи Корякского нагорья и прилегающих территорий по космическим снимкам//Космогеологические методы исследований в Арктике. Л.: Недра, 1984. С. 38—48.
21. Скублова Н. В. Геоморфологический анализ при прогнозно-металлогенических исследованиях. Л.: Недра, 1991. 192 с.

Кафедра геоморфологии СПбГУ

Поступила в редакцию
15.11.94

RELIEF, PLATE TECTONICS AND FORECAST OF MINERAL DEPOSITS

N. V. SKUBLOVA

Summary

The paper deals with geomorphological methods and aerial-space imagery applied to mineral deposits forecasting in the context of the plate tectonics. On the basis of space images interpretation morphostructural maps have been compiled showing collision orogens with characteristic frontal overthrusts, nappes, various fault zones, and landforms resulting from intense compression.

Geomorphological (morphostructural) prognostic models of Central Kazakhstan and Oimyakon-Kolyma regions have been developed with consideration for the principal geomorphic factors controlling the mineralization (layer removed by erosion and structural control).

УДК 551.435.13

© 1995 г. Р. С. ЧАЛОВ

ВЫРАБОТАННЫЙ ПРОДОЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ И НАПРАВЛЕННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

Одна из ведущих составных частей учения Н. И. Маккавеева о едином эрозионно-аккумулятивном процессе — разработанная им теория выработанного продольного профиля; сердцевину этой теории составляет закон автоматического выравнивания транспортирующей способности потока, раскрывающий физическую сущность и механизм непрерывных направленных изменений продольного профиля реки благодаря постоянно происходящим процессам эрозии, транспорта (перемещения) и аккумуляции наносов [1].

По средним и большим рекам, пересекающим несколько природных зон и интегрирующим в себе влияние многих факторов, перенос твердого вещества, развитие процессов врезания и аккумуляции осуществляются в очень сложной форме, с неоднократным чередованием и временной изменчивостью. Строго говоря, это относится и к малым рекам, впадающим в море, но на «микроуровне». Чем больше река, тем масштабнее пространственно-временные флуктуации стока наносов и чередование условий перемещения твердого вещества.

В наиболее общей форме интенсивность и направленность эрозионно-аккумулятивных процессов (вертикальных деформаций) определяются самой формой продольного профиля реки и ее соответствием условию выровненной по длине реки транспортирующей способности потока. Продольный профиль, имеющий сравнительно стабильную форму, соответствующую выровненной транспортирующей способности потока и установившимся определенным соотношениям между ней и уклоном, Н. И. Маккавеев предложил назвать выработанным.

Механизм образования выработанного продольного профиля реки зависит от ее водоносности, крупности руслообразующих наносов (аллювия) и их изменений по длине реки благодаря пересечению различных гидролого-географических зон и геолого-геоморфологических областей. Поэтому форма выработанного профиля может быть различной: например, она в целом вогнутая у рек с постоянной нарастающей по длине реки водностью и соответственно увеличивающейся транспортирующей способностью потока; она — выпуклая, если сток воды вниз по течению убывает (аридные условия) и соответственно снижается транспортирующая способность потока; ступенчатая форма профиля характерна для рек, пересекающих хребты и внутригорные впадины в горах, возвышенности и низменности на равнинах, что сопровождается изменением количества и крупности поступающего в них твердого материала и т. п.

Стабильность формы выработанного продольного профиля относительна. Даже при постоянстве элементов географической среды он медленно, но непрерывно изменяется. Длина реки увеличивается из-за выдвигания ее дельты в море, что приводит к устьевому удлинению реки, потере напора и развитию регрессивной аккумуляции, охватывающей при малых уклонах практически все нижние течения рек (на больших реках это тысячи километров). Напротив, эрозия водосборов сопровождается постепенным уполаживанием склонов долины, снижением отметок водоразделов и убыванием количества поступающего в реку твердого материала. Это вызывает врезание реки, что в свою очередь способствует увеличению глубины расчленения рельефа и активизации эрозионных и денудационных процессов; в итоге вновь увеличивается поступление наносов в реки и замедляется глубинная эрозия [2]. Постоянно происходящие изменения климата и растительности, тектонические движения и антропогенная деятельность вызывают общие или местные отклонения транспортирующей способности от «нормы» (выровненности), что вызывает по длине реки смену знака направленности эрозионно-аккумулятивных процессов, активизацию врезания на одних и аккумуляцию наносов на других участках рек.

Модель выработанного продольного профиля, предложенная Н. И. Маккавеевым [1], основывается на анализе уравнения

$$I = \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}}. \quad (1)$$

При этом Н. И. Маккавеев принимает три допущения: 1) в условиях выработанного продольного профиля скорость течения по длине реки приблизительно равна; 2) по длине реки коэффициент шероховатости постоянен; 3) подобие по длине реки живых сечений русла. В результате для полученного итогового выражения

$$I = KQ^{-2/3} \quad (2)$$

сам Н. И. Маккавеев ограничивает область его применения равнинными реками. С другой стороны, коэффициент K оказывается зависимым от шероховатости русла и формы его живого сечения. Последнее имеет смысл только при сравнении продольных профилей разных рек, но не позволяет применить формулу (2) к анализу перекатов или ступенчатости профиля данной реки. Отсюда происходит бытующее в литературе отнесение продольных профилей, форма которых откло-

няется от правильной вогнутой, к категории невыработанных, хотя еще Н. И. Маккавеев предупреждал об ошибочности подобного формального подхода.

Признавая ограниченность полученной формулы (2), Н. И. Маккавеев в дальнейших построениях, связанных с определением положения точки максимального прогиба вогнутого продольного профиля, вновь возвращается к выражению зависимости его формы от шероховатости и поперечного сечения русла:

$$L_1 = \frac{V^2 n^2 A_2}{K_2^{4/3} A_1^{2/3} I}, \quad (3)$$

где L_1 — расстояние от истока до точки наибольшего прогиба (максимума врезания реки), V — средняя скорость течения при формирующем расходе воды; n — коэффициент шероховатости, по Маннингу; K_2 — коэффициент в уравнении связи глубины и расхода воды; A_2 — коэффициент в уравнении связи длины русла и площади бассейна; A_1 — коэффициент интенсивности стока; I — средний уклон реки. Это выражение, к сожалению, очень редко применяющееся в геоморфологических построениях (сам Н. И. Маккавеев, кроме своей известной монографии, больше нигде его не пропагандировал и не включал даже в учебные пособия), тем не менее справедливо лишь для сравнения профилей разных рек; более того, оно применимо только для гумидных условий, т. е. условий нарастания водности реки вниз по течению.

В реальной природной обстановке формирование речных русел таково, что по длине реки происходит чередование свободных и ограниченных условий развития русловых деформаций, горные русла в верховьях сменяются полугорными и равнинными [3, 4] и т. д. Все это сопровождается изменением живого сечения потока, скоростей течения и крупности руслообразующего аллювия (от песка до валунов). Чтобы учесть эти обстоятельства, уравнение выработанного продольного профиля можно получить путем совместного решения уравнений Шези-Маннинга (1) и уравнения неразрывности для установившегося потока

$$Q = \omega V = bhV; \quad V = \frac{Q}{bh}, \quad (4)$$

где I — уклон, V — средняя скорость течения, h — средняя глубина потока, b — его ширина, Q — средний расход воды, n — коэффициент шероховатости русла, ω — площадь живого сечения. Путем подстановки (4) в (1) получаем

$$I = \frac{n^2 Q^2}{b^2 h^{10/3}}. \quad (5)$$

Принимая, по К. В. Гришанину [5], для устойчивых плесовых участков рек

$$\frac{h(gb)^{1/4}}{Q^{1/2}} = M = \text{const}; \quad h = \frac{MQ^{1/2}}{(gb)^{1/4}} \quad (6)$$

и объединяя все построения, получаем

$$I = Kn^2 Q^{1/3} b^{-7/6}. \quad (7)$$

Если принять, что ширина русла, по С. Т. Алтунину [6],

$$b = A \frac{Q^{1/2}}{I^{1/4}}, \quad (8)$$

где A — коэффициент, зависящий от характера русла, то, продолжая обобщать постоянные,

$$I \cong K'' \frac{n^3}{Q^{1/2}}. \quad (9)$$

Заменяя величину n , по Чангу-Штриклеру,

$$n = K^{11} d^{1/6}, \quad (10)$$

где d — средний диаметр наносов, получаем

$$IQ^{1/2} d^{-1/2} = \text{const.} \quad (11)$$

Отсюда следует, что при прочих равных условиях увеличение расхода воды вниз по течению соответствует уменьшению продольного уклона. Наоборот, уменьшение водности должно сопровождаться увеличением уклона, что отражает развитие аккумулятивных перекатов. С другой стороны, увеличение или уменьшение крупности аллювия отражает рост или снижение уклонов; действительно, увеличение крупности руслообразующих наносов обычно сопровождается увеличением уклонов. Например, песчаное русло нижнего Немана сменяется галечно-валунным в среднем течении, где река пересекает Гродненскую моренную возвышенность; уклоны русла здесь возрастают более чем в 1,5 раза: от 0,15—0,16 до 0,26—0,26‰, а продольный профиль приобретает выпуклую форму [7].

В равнинных условиях на реках с песчаным аллювием ($d_{cp} < 1$ мм), при его колебаниях на участках протяженностью в сотни и тысячи километров в пределах 0,2—0,6 мм, крупностью наносов как фактором, определяющим шероховатость русла, можно пренебречь. Зависимость при этом приобретает вид

$$IQ^m = \text{const.}, \quad (12)$$

что соответствует формулам, предложенным Н. И. Маккавеевым, О. П. Чижовым, С. И. Рыбкиным, в которых показатель степени m колеблется в пределах 0,3—2/3 (максимальные значения в формуле Н. И. Маккавеева).

Учитывая, что показатели степени в формуле (11) могут иметь региональный смысл, а величина n в формуле (10), согласно исследованиям В. Ф. Талмазы [8], зависит от соотношения глубины потока и крупности наносов (например, при соизмеримости этих величин, что особенно характерно для горных рек, величина $n = 1/3$, если $2 < h/d < 10$), ее целесообразно записать в более общем виде

$$IQ^n I^{-n} = \text{const.} \quad (13)$$

Близкий результат можно получить, заменяя в выражении (1) скорость ее критическим значением из числа Фруда:

$$Fr = 1 = \frac{V^2}{gh}; \quad V^2 = gh, \quad (14)$$

что позволяет полученную формулу применять для анализа продольных профилей горных рек, характеризующихся бурным потоком и приведенным выше соотношением его глубины и размеров аллювия:

$$IQ^{5/12} d^{-1/3} g^{-1} = \text{const.} \quad (15)$$

Таким образом, реки с одинаковой водоносностью, но с разной крупностью наносов имеют различные продольные уклоны. В частности, реки Восточной Сибири, имеющие галечно-валунный аллювий, характеризуются в 2—3 раза большими уклонами, чем такие же реки Западной Сибири или Восточно-Европейской равнины (соответственно 0,30—0,50 и 0,10—0,15‰).

Вывоженной по длине реки транспортирующей способности потока, как свидетельству выработанности продольного профиля, должно соответствовать, по Н. И. Маккавееву, постоянство мутности воды по длине системы:

$$\bar{S} = AQ^n I. \quad (16)$$

На этом обстоятельстве основывается второй (наряду с аналитическим выводом)

подход Н. И. Маккавеева [1] к получению формулы (12) выработанного продольного профиля реки.

Если условие выровненности транспортирующей способности потока не соблюдается, то продольный профиль находится в стадии трансформации и по длине реки происходят существенные колебания среднегодовой мутности воды. Такие профили следует называть невыработанными. Наиболее отчетливо это проявляется в условиях восходящего развития рельефа, когда врезание реки в целом отстает от тектонического поднятия территории. В таких случаях при общей вогнутости продольного профиля точка его прогиба отвечает наибольшей мутности потока, что, в свою очередь, соответствует участку реки с максимальным по интенсивности врезанием [9, 10]. В палеогеографическом аспекте это приводит к формированию в процессе врезания террас хордового типа.

В приведенных ссылках реки берут начало в высокогорной зоне Большого Кавказа — компактной горной страны со сравнительно простым геоморфологическим строением. Аналогичные результаты были получены рядом других исследователей по Кубани, Тереку и другим рекам, что свидетельствует об общности данного явления для Кавказа. В то же время даже здесь возникают условия, определяющие ступенчатость продольного профиля некоторых рек. Они связаны с долинными озерами, образованными горными обвалами (Рица, Амткали и др.), с чередованием вдоль konsekventных рек ущелий при пересечении передовых хребтов, что сопровождается увеличением крупности аллювия, и межгорных впадин. Озера перехватывают полностью сток руслообразующих наносов (галечно-валунных). По подсчетам Н. Н. Виноградовой [11], исследовавшей процесс заполнения наносами водохранилища Сухуми ГЭС на Восточной Гумисте (аналог завального озера), общий объем наносов, отложившихся в нем за 16 лет (1948—1964), составил 52 тыс. м³, а средний объем отложений за год — 1,2 тыс. м³, образовав слой песчано-галечных наносов мощностью от 1,5 до 6,0 м. При заполнении аллювием озер образуются ступени в продольном профиле реки, непосредственно выше которых преобладают процессы аккумуляции наносов.

В более сложно построенных горных странах (Алтай, Памир, Тянь-Шань, Саяны и др.) ступенчатость продольного профиля рек и высокая интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов обоих знаков являются характерной чертой руслоформирующей деятельности рек. На Алтае в системе Катунь — Чуи пересечение реками крупных внутригорных котловин «степей», высокогорных долин, заполненных моренами и пролювием, и интенсивно воздымающихся хребтов обуславливает сложный характер изменения крупности аллювия по длине рек на фоне четкой зависимости $d_{cp} \sim I$ и общего врезания рек [12]. На Западном Тянь-Шане С. К. Хакимовым [13] установлена скорость врезания горных рек при пересечении хребтов в 1—7 см/год. При крупных перестройках рельефа, в результате перепиливания реками трудноразмываемых пластов горных пород и врезания в подстилающие относительно легкоразмываемые, по мере ликвидация перегиба (ступени) продольного профиля скорости глубинной эрозии могут возрастать до 30 см/год (р. Алабуга, Центральный Тянь-Шань) [14]. Однако в основном скорость врезания рек в antecedentных долинах, рассекающих воздымающиеся хребты, не меньше или не намного уступает скоростям поднятия. Поэтому пересечение реками систем горных хребтов и разделяющих их впадин часто не сказывается в направленности и даже интенсивности вертикальных деформаций, но отражается в перегибах продольного профиля благодаря местному поступлению со склонов гор более крупного обломочного материала.

Невыработанность продольного профиля рек горных регионов проявляется также в наличии участков с преобладающей аккумуляцией наносов. Например, такая крупная река, как Енисей, аккумулирует наносы в пределах Минусинской впадины (сообщение А. В. Чернова). Этот процесс был прерван сооружением Саяно-Шушенской ГЭС из-за прекращения поступления наносов на минусинский участок Енисея. Однако аккумулятивные процессы в горных условиях в чистом

виде — явление довольно редкое (за исключением упомянутых выше участков рек, расположенных выше горных обвалов и озер).

Таким образом, невыработанные продольные профили горных рек характерны для условий восходящего развития рельефа, когда скорости общего поднятия горной страны больше, чем скорости врезания рек. В противном случае в результате глубинной эрозии профиль становится выработанным, среднегодовая мутность по длине реки выравнивается, а скорость вертикальных деформаций становится минимальной, определяясь общими особенностями денудации гор и понижения отметок водоразделов. Это тем не менее не связано с наличием или отсутствием ступенчатости продольного профиля, которая определяется крупностью наносов, имеющих местное происхождение.

В равнинных условиях продольные профили рек обычно являются выработанными, хотя из-за непрерывности процессов выравнивания транспортирующей способности (благодаря тектоническим движениям, в том числе локальным поднятиям и опусканиям, изменениям климатических условий, в том числе многолетних и вековых колебаний водности рек, и т. д.) на разных участках реки врезаются или аккумулируют, причем эти процессы могут сменяться во времени. Чем длиннее река, тем больше вероятность изменений направленности вертикальных деформаций по ее длине.

В общем случае река, пересекающая равнинно-платформенную область, медленно (доли миллиметра — миллиметры в год) врезается, и лишь в нижнем течении происходит аккумуляция наносов как результат выдвигения дельты и устьевого удлинения реки, на которые часто накладывается тектоническое погружение приморской низменности. Такая схема изменения направленности вертикальных деформаций по длине реки недавно была рассмотрена на примере Немана [7]. Благодаря этому формируется лестница террас, а поймы рек имеют ступенчатый поперечный профиль. В низовьях, там, где реки аккумулируют наносы, формируются обширные аллювиально-дельтовые равнины, а поймы рек либо одноярусны, либо характеризуются отчетливым превышением приустьевых частей над тыловыми, вплоть до того, что отметки последних могут быть ниже, чем отметки меженного русла (нижний Амур, Амударья, Или, Терек).

Например, на Немане в естественных условиях русло в верхнем и среднем течении реки врезается, в нижнем — аккумулирует наносы [7]. Интенсивность врезания изменяется по длине реки от 1 см/год в верховьях (здесь они, правда, за время, охваченное измерениями, были интенсифицированы под влиянием мелиорации в бассейне реки) до 3 мм/год в среднем течении, где этот процесс ограничивается геолого-геоморфологическими факторами (пересечения Гродненской возвышенности, Южно-Литовской гряды и др.). На нижнем Немане отметки дна вследствие аккумуляции повышались со скоростью 0,5—1,2 см/год, пока антропогенное вмешательство (строительство Каунасской ГЭС, сплошное выправление русла и разработки карьеров) не изменило знак направленности деформации.

На фоне медленного врезания рек при выработанном продольном профиле в верхнем и среднем течении и аккумуляции наносов в нижнем течении происходят пространственно-временные изменения направленности деформаций под влиянием климатических факторов, сказывающихся в колебаниях водности рек. Особенно отчетливо это проявляется по длине крупнейших рек — Оби, Енисея, Северной Двины и др. В верхнем и среднем течении Оби [15] эти изменения увязываются с 1800-летними периодами колебания увлажненности климата Северного полушария. При ее увеличении и повышении водности рек в верхнем течении (ниже слияния Бии и Катунь), которое приходится на степную зону, активизируются процессы врезания, скорость которых достигает 0,8 мм/год (это соответствует ежегодному объему выноса за пределы участка 800 тыс. м³ твердого вещества). Ниже по течению, в лесной и таежной зонах, где в условиях избыточного увлажнения повышение водности реки не столь заметно, происходит аккумуляция наносов — продуктов врезания, поступивших с вышележащих участков

реки. Зона аккумуляции более растянута по длине реки (и, по-видимому, смыкается с зоной аккумуляции в нижнем течении), а скорость повышения отметок дна оценивается в 0,5 мм/год (ежегодный объем аккумуляции между г. Новосибирском и устьем Томи — 700 тыс. м³). В периоды, когда водность реки снижается, в пределах первой зоны (верхнее течение) глубинная эрозия затухает и может даже сменяться некоторой аккумуляцией наносов. В то же время в среднем течении, где река остается достаточно многоводной, возникает дефицит наносов, и аккумулятивные процессы сменяются врезанием, которое трансгрессивно распространяется вниз вплоть до зоны приустьевой аккумуляции наносов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 348 с.
2. Борсук О. А., Чалов Р. С. О механизме формирования речных террас и их поймы. М.: МФ ГО СССР, 1978. С. 13—18.
3. Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
4. Маккавеев Н. И., Чалов Р. С. Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 264 с.
5. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 144 с.
6. Алтунин С. Т. Регулирование русел. М.: Сельхозиздат, 1962. 352 с.
7. Дарбутас А. А., Чалов Р. С. Вертикальные деформации русла Немана и влияние на них антропогенных факторов // Геоморфология. 1993. № 3. С. 49—58.
8. Талмаза В. Ф., Кройкин А. Н. Гидроморфологические характеристики горных рек. Фрунзе: Кыргызстан, 1968. 204 с.
9. Маккавеев Н. И., Мандыч А. Ф., Чалов Р. С. Влияние восходящего развития рельефа на глубинную эрозию и твердый сток рек Западной Грузии // Вестн. МГУ. Сер. V. География. 1968. № 4. С. 52—58.
10. Гаджиева З. Х. Денудационные процессы в Сланцевом и Известняковом Дагестане. Автореф. дис... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1982. 26 с.
11. Виноградова Н. Н. О точности прогноза заиливания водохранилищ // Гидротехн. стр-во. 1966. № 9. С. 38—40.
12. Демин А. Г., Лодина Р. В., Рулева С. Н., Чалов Р. С. Роль геоморфологических факторов в изменении типов русла и состава руслообразующего аллювия на больших горных реках (на примере Катунь и Чуи) // Геоморфология. 1991. № 4. С. 73—81.
13. Хакимов С. К. Русловые процессы на горных реках Западного Тянь-Шаня. Автореф. дис... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1992. 28 с.
14. Панин А. В., Сидорчук А. Ю., Чалов Р. С. Катастрофические скорости формирования флювиального рельефа // Геоморфология. 1990. № 2. С. 3—11.
15. Маккавеев Н. И., Чалов Р. С. Некоторые особенности дна долин больших рек, связанные с периодическими изменениями нормы стока // Вопр. географии. Сб. 79. М.: Мысль, 1970. С. 156—167.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
22.02.94

GRADED LONG PROFILE AND PROGRESSIVE VERTICAL DEFORMATIONS OF RIVER CHANNELS

N. S. CHALOV

Summary

The paper considers the equation of a river long profile, as suggested by N. I. Makkaveev, and introduces a new version which takes into account the alluvium size. Varieties in the shape of the graded profile are discussed together with its changes (progressive vertical deformations) resulting from evolution of environments. Indicators of non-equilibrium (not graded) profile are high rate of river downcutting (or alluviation) together with considerable changes in the flow turbidity along the river.