

## РЕЦЕНЗИИ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД В ИЗУЧЕНИИ  
ФЛЮВИАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Усилиями трех англоязычных исследователей, два из которых (С. Шумм, В. Вивер) работают в США, один (М. Мосли) — в Новой Зеландии, выпущен фундаментальный труд о результатах многолетнего экспериментального исследования флювиальных процессов<sup>1</sup>. Наиболее известен из этих авторов С. А. Шумм, около 40 лет занимающийся изучением эрозийных процессов в США. В ходе исследований широко использовался полевой и лабораторный эксперимент.

Авторы отмечают, что в геоморфологии все подходы, в том числе наиболее строгие и точные, приводят ко многим условным допущениям и различным мнениям об эволюции рельефа. Большое значение в понимании крупных, сложных, медленно эволюционирующих геоморфологических систем может иметь изучение их аналогов — физических моделей. Экспериментальное изучение моделей в лаборатории логично сочетается с полевыми исследованиями небольших быстро развивающихся форм. Эксперимент не только подтверждает или отклоняет ранее сделанные заключения и предположения. Он генерирует новые идеи и гипотезы, которые ведут к лучшему пониманию форм и эволюции земной поверхности.

Экспериментальная геоморфология определяется авторами как область изучения физических моделей различных геоморфологических явлений при строго контролируемых условиях. Они различают два типа экспериментов — исследовательский (поисковый) и подтверждающий. Задача первого — установление новых связей между явлениями, второго — проверка гипотез и заключений.

Вслед за Чорли авторы выделяют три класса физических моделей: натуральные, масштабные и аналоговые. Последние репродуцируют лишь некоторые наиболее важные аспекты форм и функций природных явлений.

Примерами натуральных моделей служат стоковые площадки на склонах, а также отдельные небольшие бассейны, в которых регулярно ведутся наблюдения и измерения. Однако эти наблюдения могут рассматриваться как экспериментальные лишь в том случае, если исследователь сознательно манипулирует условиями и характеристиками таких моделей (растительный покров, сток, хозяйственная деятельность и т. д.). Это переходная градация между настоящим экспериментом и стандартным наблюдением и измерением геоморфологических процессов (т. е. стационарным наблюдением).

При использовании масштабных моделей главным требованием является соблюдение подобия между моделью и прототипом. Должны сохраняться три вида подобия: 1 — геометрическое, 2 — кинематическое, 3 — динамическое. Авторы приходят к выводу, что невозможно достичь строгого количественного подобия между моделью и прототипом. Особенно это относится к используемому в моделях материалу. Формально можно достичь гранулометрического подобия, но при этом неэквивалентно изменяется эрозийная и транспортирующая способность потока и т. д.

В книге обстоятельно рассматриваются благоприятные и неблагоприятные условия экспериментальных исследований. Эксперимент выглядит простым при изучении малых форм. Главная трудность заключается в трансформации результатов на более крупные формы. Справедливо заключение о том, что результаты экспериментов всегда должны сопоставляться с данными полевых исследований. Вместе с тем нельзя не согласиться и с выводом о том, что экспериментальные исследования способны обеспечить такое проникновение в эволюцию и динамику форм рельефа, которое не может быть достигнуто иным путем.

Рассматриваемая книга состоит из трех частей: 1 — морфология и динамика дренажного бассейна; 2 — реки; 3 — аккумулятивные формы и седиментология.

Дренажный бассейн рассматривается как основная геоморфологическая единица. Он характеризуется определенными типами дренажной сети, образующими последовательный ряд, крайними членами которого являются модель Хортон (параллельные борозды, перерасчленение и микрозахваты) и модель регрессивного развития речной сети, выдвинутая в 1971 г. Говардом, Смартом и др. Среди этих моделей выделяются модели стохастические и детерминистические. Проверка «законов» Хортон с использованием теории граф показала их стохастический (вероятностный) характер. Пионером количественной характеристики дренажной сети является Р. Хортон, идеи которого были развиты «колумбийской» школой Стралера. Обе школы имеют многочисленных

<sup>1</sup> Schumm S. A., Mosley M. P., Weaver W. E. Experimental fluvial geomorphology. New York; Chichester; Brisbane; Toronto; Singapore: John Wiley and Sons, 1987, 403 p.

последователей. Количественные методы открыли новый путь для изучения сложных геоморфологических систем.

В природных условиях изучение развития дренажной сети затруднено невозможностью наблюдения первичных (начальных) условий и малой скоростью процессов. Поэтому в этих исследованиях лабораторный эксперимент приобретает особенно большое значение. Эксперименты проводились на дождевальной установке размером  $15,2 \times 9,1 \times 1,8$  м, в качестве материала использовался илестый песок. Серия экспериментов показала большое влияние на развитие и конечную форму дренажной сети начальных условий. В зависимости от них формируются различные дендритовые модели русловой сети. При этом выделяются два способа развития дренажной сети: экспансивный, обусловленный регрессивной эрозией, и экстенсивный, связанный с удлинением (вниз по течению) русел низкого порядка. Второй способ ведет к формированию в большей степени древовидной русловой сети, у которой притоки впадают под более острым углом. Экспансивное развитие русел в периферической части бассейна может происходить одновременно с их редукцией во внутренней части. Эффект понижения базиса эрозии возрастает с увеличением крутизны склонов и высоты рельефа. Речные перехваты происходят нередко, но на крутых поверхностях и при ранних стадиях развития дренажной сети.

Эксперименты показывают, что развитие русловой сети представляет собой детерминированный процесс, определяемый в основном начальной топографией. Общий характер геометрии дренажной сети на разных стадиях развития согласуется с системами потоков в естественных условиях. Развитие русловой сети на ранее незродируемой площади может быть предсказано, если известна топография поверхности.

Интересные результаты были получены при изучении влияния морфологии дренажного бассейна на сток воды и наносов. Наибольшая величина стока характерна для средних значений коэффициента расчлененности рельефа (равного произведению высоты рельефа на густоту дренажной сети); дальнейшее возрастание расчлененности имеет лишь слабую гидрологическую реакцию. Новые циклы эрозии, обусловленные влиянием человека, экстремальными климатическими явлениями и понижением базиса, дают высокий сток наносов с быстро проходящим пиком. Однако и при постоянной величине дождевых осадков и жидкого стока концентрация наносов очень изменчива в результате обрушения берегов, подмыва склонов, размыва ранее отложенного аллювия, эпизодической аградации и деградации русловой сети.

Экспериментальное изучение формирования аллювиальных россыпей позволило установить ряд закономерностей в пространственном и временном распространении зерен тяжелых минералов, в качестве которых использован магнетит. Выявлена большая роль в транспорте и накоплении этих минералов переломов продольных профилей русел и склонов, охарактеризовано влияние расположения источников сноса.

Омоложение рельефа дренажного бассейна при понижении базиса эрозии выражается образованием порогов, мигрирующих вверх по русловой сети. В верхних звеньях русловой сети в связи с уменьшением объема стока происходит уменьшение скорости миграции порогов и их постепенная редукция. В начале миграции порогов сток наносов резко возрастает, дальнейшее их продвижение вверх сопровождается экспоненциальным уменьшением стока наносов. Приводятся результаты исследований по определению потенциальной возможности развития враждей сети в бассейне. Опираясь на пропорциональную взаимозависимость площади бассейна и величины жидкого стока рассчитывается «овражный потенциал», равный произведению константы  $C$  (одинаковой для данной враждей системы) на площадь бассейна в степени  $b$ . Показатель степени зависит от размеров водосбора, гидрологических параметров, типа почв, топографии, характера землепользования и степени освоенности земель. Наблюдения, проведенные на бедлендах одного из семиаридных районов Запада США и на лабораторной установке, позволили изучить режим наносов в бассейнах с крутыми склонами. Выявлено, что в каждой зоне бассейна фазы эрозии и аккумуляции чередуются во времени и смещаются вниз по течению.

В разделе «Реки» подробно рассматриваются результаты экспериментального изучения русловых процессов и изменений в морфологии русел рек: сложенных аллювием, врезанных в коренные породы, пересекающих пороги и участки с активной тектоникой. Предваряя изложение этих результатов, авторы отмечают, что в англоязычных странах очень слабо осведомлены о подобных разработках западноевропейских и советских исследователей и приводят данную  $C$ . Леявским много лет назад оценку американских экспериментов по моделированию меандрирования: «...за малым исключением все решения могли быть получены, причем меньшей ценой, при внимательном изучении литературы».

Основная часть описанных в монографии экспериментов проведена на лотках нескольких конструкций с максимальными размерами  $31 \times 7,5 \times 1$  м, заполненных песком, смесью песка и почвы, песка, алевроита и глины (медианный диаметр материала от 0,09 до 0,56 мм). Наиболее разнообразная серия экспериментов проведена на моделях аллювиальных русел. Моделирование было направлено на выявление роли факторов, влияние которых установлено при изучении естественных русел — это различные характеристики жидкого и твердого стока, тип наносов и уклон русла. Оно велось на 4 типах русел: прямых меандрирующих, разветвленных и переходных от меандрирующих к разветвленным (островным). Подтверждено, что сам тип русел зависит от соотношения меандров; извилистость русла, глубина и скорость врезания русел, намыв и размыв островов контролируются и в целом рядом гидрологических и гидрометрических условий — расходом воды, его изменением во времени, величиной входного угла меандра и др. Предпринята попытка описания эволюции продольного профиля реки уравнениями диффузионной математической модели, исходными данными для которой и базой для проверки выводов послужили результаты лаборатор-

ного моделирования. Большое внимание уделено формированию поперечных профилей в различных точках меандров. Установлено, что вид профиля в основном зависит от гидрологических характеристик потока в данном поперечном сечении русла.

Интересные результаты получены по эволюции плановой конфигурации русла, а в разветвленных руслах — и островов. Общая направленность эволюции заключается в появлении меандров и меандрового пояса, причем ширина пояса и длина меандров увеличиваются, их рисунок усложняется. Появление островов первоначально контролируется морфологией русла, а в дальнейшем, кроме того, зависит и от характера наносов и их величины. К сожалению, в этой серии экспериментов оценка результатов моделирования и их описание в большинстве случаев даются в виде простой констатации полученной картины без расчета количественных показателей и зависимостей. Практически не используются хотя бы основные положения теории подобия, лишь отмечается, что качественно и геометрически модели и результаты моделирования подобны их природным аналогам.

Эксперименты Оучи, Гарднера и др. показали, что различные по типу русла одинаково реагировали на изменение тектонических условий, однако в целом последствия тектонических подвижек наиболее ярко выражены на прямых руслах. Тектонические поднятия, имитируемые подъемом отдельных блоков в средней части песчано-гравийной модели, нашли отражение в изломах продольных профилей рек и в образовании локальных террас. Ниже этих участков, а также в зонах опусканий шла аккумуляция, у меандрирующих русел сопровождается увеличением извилистости. При этом меандрирующие реки реагируют на тектонические подвижки главным образом боковой эрозией и поперечными перемещениями русла, а другие типы — вертикальными. Однако при большой амплитуде тектонических движений вертикальные перемещения русла преобладают и у меандрирующих рек. При поднятии и глубинной эрозии выход устойчивых пород в русле реки вызывает деформации и сжатие меандров. Отмечается важное значение пороговых (критических) величин движений, до которых русловые деформации развиваются по типу предыдущего этапа эволюции, а после их достижения начинается качественная перестройка руслового процесса. Подобные перестройки определяются в основном амплитудой и интенсивностью тектонических движений.

В каждом из разделов этой части монографии результаты лабораторного моделирования сопоставляются с натурными наблюдениями. Однако глубина сопоставления, степень учета конкретных физико-географических условий в большинстве случаев уступают широко известным в СССР разработкам Н. И. Маккавеева и его учеников.

В третьей части монографии рассматриваются аккумулятивные формы рельефа, изученные в ходе лабораторных экспериментов. Основное внимание уделено детальному описанию методики и хода экспериментов по физическому моделированию образования конусов выноса. Эксперименты проводились на дождевальной установке, имитирующей эрозионный и аккумулятивный бассейны. Ход эксперимента фиксировался измерениями по контрольным точкам, отбором и анализом проб воды и наносов в лотке и на растущем конусе, фотографированием. Последовательные стадии роста конусов выноса находили отражение на компьютерных картах. Обращает внимание отсутствие расчетов, связанных с определением условий подобия лабораторных условий натурным, а также попыток аналитического выражения полученных закономерностей, несмотря на обилие количественных данных.

Анализируется последовательный ряд конусов выноса: аллювиальных, образованных грязевыми потоками, смешанного состава, дельтовых. Для каждого из этих конусов, полученных в ходе лабораторных экспериментов, приведены полные данные о динамике объема, площади, последовательном изменении микрорельефа, распределении эрозионных и аккумулятивных процессов, внутреннем строении, распределении гранулометрических характеристик и концентраций тяжелого минерала (магнетита) при постоянных и изменяемых внешних условиях. От первого к последнему члену ряда возрастает скорость роста объема и площади, крутизна поверхности и уменьшается степень отсортированности отложений.

Концептуальная модель основывается на цикличности эрозионных и аккумулятивных процессов, проявляющейся даже при неизменных внешних условиях. В вершинной части аллювиального конуса выноса в результате аккумуляции увеличивается крутизна до некоторой критической величины (геоморфологического порога), после чего происходит быстрое эрозионное врезание. Вершинные врезы концентрируют сток, что способствует перемыву ранее отложенного материала и его переотложению на нижележащей части поверхности конуса. В дальнейшем русловой врез в вершине конуса расширяется и заполняется осадками (причины и механизм перехода от эрозии к аккумуляции не рассматриваются); поток распластывается и вновь аккумулирует, что повышает крутизну и создает предпосылки для повторения цикла.

Наиболее подробно в книге рассмотрен эрозионно-аккумулятивный цикл, связанный с вершинным врезанием в аллювиальный конус выноса. Это является дальнейшей разработкой концепции геоморфологических порогов С. А. Шумма. Величина порога стабильности склона — функция главным образом климатических условий. Увеличение крутизны вершинной части конуса выноса приближает ее к порогу стабильности, однако на момент его достижения влияют также тектонические движения, особенности отдельных эпизодов стока и т. д. Когда крутизна склона близка к пороговой, врезание может начаться, например, под влиянием обычного паводка. Определение пороговых характеристик рельефа, с которыми связан переход количественных изменений в качественные, еще И. С. Щукин выдвигал как одну из важнейших задач геоморфологии. Рецензируемая работа — шаг вперед в данном направлении. Однако в ней, к сожалению, не содержится попыток практического, количественного определения пороговых величин.

Сопоставление результатов лабораторных экспериментов с полевыми наблюдениями выполнено в крайне ограниченном объеме. Авторы практически ограничиваются констатацией отдельных случаев совпадения некоторых характеристик и морфологических особенностей. При этом, однако, оказалось, что распределение гранулометрических характеристик осадков, слагающих экспериментальный аллювиальный конус выноса (укрупнение внизу), противоположно наблюдаемому в природе (с. 368). Авторы объясняют это особенностями условий эксперимента и высказывают предположение, что полученные в лабораторных условиях объекты аналогичны не целым конусам, а лишь их верхним и средним частям.

Рецензируемая книга — крупный вклад в развитие экспериментальной геоморфологии. Она обобщает результаты исследований не только трех авторов, но и многих других англоязычных геоморфологов-экспериментаторов. Наш краткий обзор показывает, что в ней много интересных и оригинальных идей, результатов и обобщений, дальнейшее развитие получили многие общие принципы физического моделирования геоморфологических явлений.

Главный недостаток книги — очень слабое использование работ неанглоязычных исследователей, прежде всего советских. Авторы понимают это, в связи с чем и приводят цитированное выше замечание С. Леявского, сделанное более 30 лет назад и актуальное и сегодня. Авторам книги неизвестны большие экспериментальные исследования, проводившиеся в Московском университете под общим руководством Н. И. Маккавеева и отраженные в трех выпусках «Экспериментальной геоморфологии» (1961, 1969, 1978). Основное внимание в этих советских исследованиях уделено флювиальным процессам, их тематика во многом аналогична тематике экспериментальных исследований в англоязычных странах. И в ряде проблем, частично отмеченным в рецензии, советским исследователям удалось получить более убедительные результаты. Вместе с тем следует признать, что и советская геоморфология несет заметные потери от слабого использования и плохой осведомленности о достижениях зарубежной науки. Преодоление языковых и других еще более высоких барьеров, разделяющих единую геоморфологическую науку, может послужить значительным ускорителем ее общего прогресса.

*Азизов З. К., Дедков А. П., Ермолаев О. П.,  
Мозжерин В. И., Стурман В. И., Тукаев Р. М.*

## КРИОПЛАНИЯ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЕВРОПЕ

Известный чехословацкий геоморфолог Тадеаш Чудек опубликовал две фундаментальные работы, подводящие итоги многолетнего изучения процессов и форм криогенного выравнивания рельефа в Восточной Сибири и в западной части Чехословакии.

Первая из них — небольшая монография<sup>1</sup> посвящена криопланационным террасам в современной области вечной мерзлоты. Она опирается на результаты собственных исследований в Восточной Сибири в 1969—1982 гг. Полевые наблюдения охватили бассейны рек Олекмы, Алдана, Яны и Индигирки. Термин «криопланационная терраса» сам Т. Чудек переводит на русский язык как «нагорная терраса». Таким образом, перед нами новая работа о нагорных террасах, выполненная с большой тщательностью.

Автор приводит обширный фактический материал, характеризующий морфометрию, рыхлые отложения и микроформы рельефа нагорных террас. Их ширина обычно составляет 20—80, как максимум 250 м, наклон плащадок 2—7°, мощность грубообломочного материала на площадках 0,5—1,5 м. Нередко нагорные террасы образуют лестницы, насчитывающие до десятка ступеней. Местами криопланация создает также плоские вершины гор. Монография содержит обстоятельный анализ геологического строения, особенностей климата, вечной мерзлоты и растительности нагорных террас.

Т. Чудек рассматривает две известные теории образования нагорных террас: теорию отступления крутых уступов С. Г. Боча и И. И. Краснова и теорию снижения и выполаживания склонов умеренной крутизны (Г. М. Икин, С. В. Обручев, В. Л. Суходровский). Автор полагает, что обе теории имеют свои позитивные и негативные аспекты, но в целом он отдает предпочтение первой из них. По его мнению, нагорные террасы образуются главным образом вследствие отступления более крутых участков склона; снижение и выполаживание поверхностей террас играет важную, но все же второстепенную роль. В формировании террас участвуют процессы криогенного выветривания, нивации, гравитации, гelifлюкции, суффозии, плоскостного смыва и криогенной сортировки. В этом комплексе автор подчеркивает особенно большую роль нивации. Вечная мерзлота, по его мнению, не является необходимым для образования нагорных террас фактором. Террасы могут образовываться также в холодных областях с глубоким сезонным промерзанием грунта. Поэтому он полагает, что в плейстоценовых перигляциальных областях нагорные террасы, не сопровождаемые другими перигляциальными явлениями (криогенными текстурами, псевдоморфозами

<sup>1</sup> Czudek T. Kzyoplanationsterrassen im rezenten Dauerfrostboden // Prirodovedne Prace ustavu Ceskoslovenske Akademie Ved v Brne. 1989. V. 23 (8). Nova ser. 41 s.