

problems of morpholithogenesis, of conformity and disconformity between relief and geological formations, studies of relief-forming processes mechanism; problems of dynamic geomorphology are tackled by applying a large array of methods, including experiments and stationary observations.

A series of manuals and textbooks have been published on both branches of geomorphology, and special courses of lectures are read for students, post-graduates etc.

УДК 551.4.012

© 1994 г. Н. В. ХМЕЛЕВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ

Рождение экспериментальной геоморфологии и входящего в нее лабораторного эксперимента относится к 50—60-м годам. В это время в ряде стран были созданы технически оснащенные лаборатории: во Франции в Каннах (1964), Бельгии в Лувенском университете (1970) и позднее — в США [1, 2]. Планомерное использование лабораторного эксперимента в нашей стране связано с созданием в 1954 г. лаборатории экспериментальной геоморфологии на географическом факультете Московского университета и с именем профессора Н. И. Маккавеева. Им были заложены принципиальные основы нового направления, сформулированы его цели и задачи. К их числу относится использование эксперимента в разработке фундаментальных проблем геоморфологии при одновременном решении практических вопросов. Большое внимание уделял Н. И. Маккавеев совершенствованию технической базы лаборатории.

Первые эксперименты осуществлялись на русловом лотке под открытым небом, на котором были поставлены опыты по формированию продольного профиля реки. Введение в эксплуатацию в 1961 г. гидрокорпуса МГУ, где в одном из лабораторных залов были оборудованы дождевальная установка, долинный и волновой лотки, позволило расширить круг моделируемых процессов. В дальнейшем лаборатория пополнилась специально оборудованными установками (низкотемпературной, подъемными механизмами разных типов, минирусовым лотком и т. п.). Обогащение лаборатории различными установками и их конструктивные особенности обеспечили большие возможности для моделирования экзогенных процессов.

В зависимости от решаемых методологических вопросов при постановке экспериментов применялись три условно выделяемых типа моделей: динамическая, эволюционная и пространственно-эволюционная. На динамической модели изучался механизм процесса в зависимости от внутренних факторов, образующих его структуру. Опыты включали отдельные серии, в каждой из которых изменялся только один фактор при постоянстве других. На моделях эволюционного типа изучалось изменение во времени отдельных явлений, что позволяло устанавливать их переход к равновесному состоянию и определять длительность различных стадий развития. На пространственно-эволюционных моделях воспроизводился комплекс процессов, действующих в системах, охватывающих относительно большие территории. Во втором и третьем типах моделей при введении в действие внешнего фактора (климата, тектоники) в опытах изучался процесс взаимодействия, осуществлялось воспроизведение модели С. Шумма [3] «действие-отклик», позволяющей устанавливать количественные пороги, время релаксации и т. п.

На моделях первых двух типов процессы воспроизводились в относительно крупном масштабе, вплоть до 1 : 1. На модели третьего типа масштаб сильно уменьшался, и результаты носили качественный характер.

Использование опытных данных, их пересчет на натуру базируются на ус-

ловии соблюдения принципов теории подобия, что создает ряд трудностей. Возможности их частичного устранения путем разных приемов — специальная тема. Отметим здесь только, что были найдены некоторые приемы, позволяющие подбирать условия опытов, обеспечивающие достаточную достоверность их результатов. К числу таких приемов относится правило: проводить моделирование с одновременным изучением процесса в натуре.

Теоретической предпосылкой экспериментов служила концепция Н. И. Макавеева о едином эрозионно-аккумулятивном процессе и тех его механизмов, которые протекают в отдельных звеньях гидросети, способствуя транспорту по ним потока вещества. Эксперименты, с одной стороны, имели целью проверку отдельных положений этой концепции, с другой — способствовали более глубокому изучению механизмов отдельных процессов. В последнем случае устанавливались наиболее информативные признаки, которые использовались в качестве диагностических при полевых исследованиях.

В соответствии с учением Н. И. Макавеева [4] экспериментальные исследования выполняли по следующим разделам: 1) изучение механизма некоторых склоновых процессов; 2) оврагообразование; 3) формирование продольного профиля реки и террас речной долины; 4) механизм формирования россыпей разных полезных ископаемых и особенностей дифференциации частиц полезного компонента; 5) изучение взаимодействия нескольких процессов. Ниже дается обзор выполненных исследований.

Изучение склоновых процессов не было самоцелью, а являлось составной частью выявления механизма формирования россыпей. Изучали те из них, которые широко распространены в областях развития россыпей и играют большую роль в транспорте материала по склонам, а именно солифлюкция и курумообразование. Их моделирование производили на низкотемпературной установке, имевшей форму лотка с плоским дном, размером 75×30 см, заключенного в кожух. Отрицательные температуры поддерживали системой трубок холодильника, вмонтированных в верхнюю и нижнюю грани установки. Специальное устройство позволяло задавать дну лотка необходимый уклон.

При изучении солифлюкции на дно лотка укладывали слой суглинка с включенными в него на разной глубине от поверхности обломками разной формы и удельного веса с точной фиксацией их положения перед началом опыта. Затем модель подвергали циклам замораживания-оттаивания, число которых устанавливалось в зависимости от цели опыта.

Выяснено, что солифлюкционный поток возникает на некотором расстоянии от вершины склона [5, 6]. Его изменяющееся по длине и вертикальному разрезу скоростное поле служит основной причиной изменения баланса материала в нем и образования склона вогнутой формы. По данным опытов получены эмпирические формулы скоростей движения материала. Для обломков, включенных в этот поток, характерно смещение вниз по склону с изменением направления на перпендикулярное к пласту в зависимости от веса частиц и их первоначального положения в оттаивающем грунте. Более мелкие частицы, испытывающие вдоль-склоновое смещение, обгоняют более крупные. В верхних слоях грунта часть обломочного материала под влиянием вымораживания поднимается.

Модель курума была представлена подвергавшимся циклам замораживания-оттаивания слою крупнообломочного материала, подстилаемого мелкоземом. В задачу экспериментов входило изучение смещения обломков, слагающих курум, и оценка в нем роли крутизны склона, степени увлажнения мелкоземной подстилки [7, 8]. Одновременно велись стационарные наблюдения за группой курумов Якутии. Различные условия формирования курумов, расположенных на выровненной поверхности, склонах разной крутизны и увлажнения, были идентичны. Применение в обоих случаях стереофотограмметрического метода фиксации динамики курумов позволило изучить механизм их образования, выявить ряд микропроцессов, установить различные типы движения слагающих их обломков. Установлено, что ведущим агентом

движения обломков является крутизна склона. В целом курумы мало-подвижны, в их поверхностном слое смещается относительно небольшое количество обломков. Обломки рудных свалов, включенные в курум, в процессе смещения проседают в его нижние горизонты.

Роль изучавшихся факторов в скоростях смещения отдельных обломков настолько велика, что они могут различаться даже в одном районе в зависимости от условий на несколько порядков. В связи с этим кажется неправомерным использовать данные о скоростях движения курума, полученные только по одному из них, в качестве средних скоростей для исследуемого района.

Оврагообразование — динамически активный объект — раньше других начало изучаться путем моделирования [9, 10]. В лаборатории экспериментальной геоморфологии [11, 12] опыты ставили на дождевальной установке, на которой создавали модели, воспроизводящие рельеф поверхности, сложенной рыхлым грунтом и представленной ложбиной с притоками. Этот первичный рельеф наследовался потоком, возникающим в процессе дождевания и формировавшим овраг.

В опытах наряду с изучением общих закономерностей развития оврага выявлялись соотношения разных его параметров и их связь с изучаемыми факторами в зависимости от стадий развития оврага. Цель этих исследований сводилась к поиску таких параметров, которые наиболее полно отражали бы активность развития оврага. Установлены две фазы развития активности оврага с различным соотношением возрастающих параметров. Полученные в опытах зависимости и коэффициенты использовали в дальнейшем для вывода формул между линейным ростом оврага и основными гидрологическими параметрами. Результаты моделирования позволили глубже изучить механизм развития оврагов, найти соответствующие диагностические признаки, получить ряд расчетных зависимостей, которые легли в основу учения о потенциальном оврагообразовании.

Продольный профиль реки — один из главных индикаторов изменений, происходящих в ее бассейне. В учении об эрозионно-аккумулятивном процессе ему уделяется большое внимание. Именно поэтому первые опыты под руководством Н. И. Маккавеева были посвящены изучению механизма формирования русла. Были поставлены две серии опытов [13] на открытой площадке модели, представляющей систему реки длиной 50—60 м с тремя притоками, впадающими в водоем площадью 20×20 м.

В первой серии изучалось влияние на продольный профиль климатических факторов. Она включала три опыта: изменение насыщенности потока наносами, изменение общего объема стока и его неравномерности. В первом опыте внимание обращалось на особенности эрозии и аккумуляции при изменении в потоке концентрации наносов. После достижения относительной стабильности продольного профиля в первом этапе опыта норма наносов в потоке была увеличена на порядок, что привело к аккумуляции наносов по длине реки. В результате спустя некоторое время формировался слой наносов, мощность которого убывала к верховьям. Последующее уменьшение нормы наносов сопровождалось врезанием потока. Оно началось в среднем участке течения и регрессивно продвигалось в сторону верховьев до тех пор, пока оказалась размытой почти вся толща наносов, накопившаяся в период аккумуляции. На нижнем участке, где врезу препятствовало стабильное положение базиса эрозии, он был незначителен.

Аналогично описанному механизму шло преобразование продольного профиля и в случае изменения величины общего стока и его неравномерности. Итогом этого явилось сходство морфологии рельефа долины, сформировавшегося к концу каждого опыта. Продольные профили имели вогнутую форму. Комплекс террас принадлежал к хордовому типу. Кривая вогнутости их продольного профиля была меньше по сравнению с профилем врезающегося потока.

Эти опыты наряду с выявлением механизма преобразования продольного профиля опровергли бытовавшее ранее положение, что глубинная и боковая эрозия протекают асинхронно. Во всех опытах они действовали одновременно, и интенсивность последней была тем больше, чем интенсивнее протекала первая.

Боковая же эрозия продолжалась еще некоторое время после прекращения глубинной.

Хотя вопрос о влиянии базиса эрозии на продольный профиль и формирование террас реки рассматривался в 60-х годах многими исследователями, детали этого процесса оставались неясными. Его решению были посвящены опыты второй серии, в которой предполагалось выяснить характер аллювиальных накоплений, возникающих при поднятии уровня приемного бассейна, установить особенности врезания реки при различной интенсивности снижения базиса эрозии и оценить роль крутизны шельфа в последнем случае.

Особенности накопления аллювия при подъеме уровня бассейна изучали опытом, в котором долина после выработки продольного профиля оказалась затопленной почти на половину длины. Сразу после этого в эстуарии начали формироваться дельты главной реки и нижних по течению притоков. Одновременно выше по течению от зоны подпора происходило накопление наносов, волна которых продвигалась вверх по долине. Скорость продвижения границ регрессивной и трансгрессивной аккумуляции зависела от ширины долины, емкости эстуария и расхода наносов. К концу опыта образовался слой наносов, который достигал максимальной мощности у переднего края дельты и уменьшался к верховьям реки, где, как и в начале опыта, продолжалась эрозия.

В следующем опыте было проведено двукратное, почти мгновенное понижение базиса эрозии. Во втором этапе его амплитуда была снижена вдвое по сравнению с первым. Импульсы снижения разделялись периодами стабильного положения базиса эрозии, что позволяло проследить реакцию этого воздействия на механизм формирования продольного профиля и образование связанных с ним форм рельефа. Преобразование ранее сформированного первичного рельефа долины как при первом, так и втором понижении уровня протекало почти идентично, отличаясь лишь масштабом деформаций и деталями возникающего флювиального рельефа.

Размыв начинался на участке верхнего края дельты, откуда врез распространялся вверх по долине. Наиболее интенсивные деформации продольного профиля наблюдали на участках древних дельт, на которых большие уклоны их переднего края и мощная толща аллювия способствовали интенсивному развитию глубинной и боковой эрозии. Вследствие больших скоростей и бурного режима потока на таких участках происходило интенсивное переформирование русла вплоть до смены его типов. Глубинная эрозия регрессивно распространялась вверх по течению. В обоих случаях к концу опыта сформировался комплекс террас, относительные высоты которых убывали к верховьям. Их максимальная относительная высота была приурочена к участку дельты. Более молодые террасы, образованные во втором этапе, оказались вложенными в более древние, которые интенсивнее всего размывались на участке развития боковой эрозии. Последняя в этих опытах проявлялась более интенсивно по сравнению с формированием продольного профиля под влиянием климатического фактора. Причиной этого, по-видимому, явилось повышенное количество наносов, которое было характерно для интенсивно врезающегося потока в случае понижения базиса эрозии.

Итак, снижению уровня бассейна во всех опытах сопутствовало врезание потока. Этот факт считали аксиомой. В одном из опытов этой серии был воспроизведен распространенный и на первый взгляд невероятный случай, когда понижение базиса эрозии сопровождалось аккумуляцией отложений по продольному профилю. Такой механизм формирования профиля наблюдается, если при снижении уровня бассейна обнажается шельф, крутизна поверхности которого меньше, чем уклон продольного профиля реки.

Сопряжение двух первичных поверхностей дна на модели перед началом опыта было выполнено под углом. В связи с этим в начальный период формирования продольного профиля наблюдалась аккумуляция в низовьях реки, которая постепенно захватила половину ее длины. Затем было произведено быс-

трое понижение уровня бассейна, сопровождавшееся небольшим врезом и образованием низкой террасы, а затем началась аккумуляция, которая распространилась почти до верховья. Результаты опытов показали, что снижение базиса эрозии в этом случае вызывает сложное изменение продольного профиля, протекающее по своеобразному эрозионному циклу. На первом этапе русло врезается на участке старой дельты, затем развивается аккумуляция, погребаящая образованную в первый этап низкую террасу и распространяющаяся в сторону истоков.

Опыты доказали, что быстрое снижение базиса эрозии вызывает врезание реки при любом характере шельфа. Однако при отлогом шельфе оно неглубокое, кратковременное и сменяется затем аккумуляцией.

Учение Н. И. Маккавеева о едином эрозионно-аккумулятивном процессе оказалось особенно плодотворным для экспериментального изучения процессов россыпеобразования. Первые исследования, начатые в 1963 г. под его руководством, касались изучения механизма формирования погребенных ложковых россыпей горного хрусталя Южного Урала с целью прогноза их коренных источников [14, 15]. Наряду с традиционными методами реконструкции палеогеографических условий эксперимент в этих исследованиях использовался с целью получения эмпирических формул, отражающих дальность переноса обломков хрусталя в зависимости от транспортирующей способности потока. Кроме того, моделировался механизм транспорта обломков по склонам и выяснялась дальность перемещения частиц в связи с денудационным срезом.

В результате исследований Н. И. Маккавеева впервые было разработано представление о генетических комплексах россыпесодержащего аллювия, выяснены их диагностические признаки. Последние, отражающие строение и степень обработки потоком частиц, позволяют судить о связи отдельных участков россыпи с коренным источником и на основании этого прогнозировать его местоположение. Эти исследования продолжали применительно к изучению механизма образования аллювиальных россыпей тяжелых минералов [16]. Опыты ставили одновременно с изучением натуральных россыпей золота ряда рудно-россыпных районов Восточной Сибири, что позволило решить возникающие при поиске и разведке россыпей вопросы.

Весь комплекс исследований, который выполняли на установках лаборатории экспериментальной геоморфологии, пронизывала идея связи между денудируемым под воздействием различных агентов источником материала и параметрами формируемой потоком в это время россыпи. Моделирование вели по схеме, при которой в объеме грунта, воспроизводящего коренной источник, находившийся в головной части лотка и размываемый потоком, размещали частицы полезного компонента (ПК) с определенным соотношением фракций разного размера. В конце опыта или через определенный интервал времени из аллювия осушенной модели извлекали металл и рассчитывали его вес на разных участках по длине россыпи и за ее пределами. По этим данным определяли параметры образовавшейся россыпи и рассчитывали баланс перемещавшихся частиц ПК в системе коренной источник — россыпь. При этом использовали частицы мелких фракций (от 2,0 до 0,1 мм), в основном магнетита, реже ильменита и золота. Основное внимание в механизме россыпеобразования уделяли роли руслового потока — одного из ведущих факторов, слабо освещенного в учении о россыпях. Для выяснения диагностических признаков генетических комплексов тяжелых минералов, с учетом их мелкого размера и большого удельного веса, была выполнена большая серия опытов в долинном лотке. Наряду с установленными признаками комплексов выяснилась особая роль в накоплении частиц ПК неровностей скального ложа потока, было установлено, что они определяют приуроченность к ним разных по морфологическим особенностям ассоциаций частиц россыпи. Этот вывод, с учетом теории русловых процессов, позволил разработать типизацию концентраций металла, основанную на представлениях о механизме их образования [17]. В зависимости от генезиса она дает представление об относительной продуктивности участка и позволяет прогнозировать его положение.

Роль эксперимента наглядно проявлялась при моделировании системы коренной источник — россыпь для изучения временной связи между денудиремым источником и формирующейся россыпью. Этот момент является одним из ключевых при решении вопроса о сохранности источников. Вначале он решался в мелком масштабе путем воспроизведения этой системы на дождевальной установке, на которой осуществлялся размыв источника, расположенного в бассейне водотока, формирующего россыпь [18]. В первом варианте была выявлена связь между степенью денудации источника и стадиями образующейся элементарной россыпи. Под этим термином обычно имеют в виду россыпь, образующуюся при денудации только одного источника. Для уточнения признаков эта система моделировалась в более крупном масштабе. В качестве признаков элементарной россыпи принимались ее морфометрические показатели и параметры, отражающие особенности дифференциации образующих ее частиц. В одной из серий изучалась связь между ними и морфологическими типами источников, в другой — зависимость их от мутности потока, крупности наносов и плотности частиц полезного компонента, образующих россыпь. Такой подход к изучению россыпи позволяет установить ряд признаков разных стадий ее развития, а по ним давать заключение о степени сохранности источника.

Итогом исследований этого направления явилось создание метода генетического анализа россыпей, позволяющего давать рекомендации на их разведку и доразведку и прогноз коренных источников.

Изучение взаимодействия экзогенного и эндогенного факторов, никем экспериментально не проводившееся, потребовало постановки серии опытов для разработки принципов его моделирования. Основная задача этих опытов — воспроизведение качественных схем некоторых процессов для выявления потенциальных возможностей их моделирования. Было выполнено четыре серии опытов. В одной из них [19] моделировался механизм формирования продольного профиля реки в процессе восходящего развития территории по схеме, впервые проанализированной Н. И. Маккавеевым. Опыты ставили в лотке размером 9×2 м, переходящем в нижнем конце в бассейн площадью 2×2 м. Рост крыла антиклинали, на которой поток с притоками создавал продольный профиль, воспроизводили путем последовательного увеличения в ходе опыта падения дна лотка. При постоянной водности потока средняя интенсивность роста структуры менялась в двух опытах незначительно, а в третьем — резко, соответствуя экстремальному его действию. В результате приращения уклонов в каждом из опытов в момент роста структуры усиливалась глубинная эрозия и возрастала транспортирующая способность потока. Максимальный врез отмечался на участке ниже впадения последних по течению притоков.

В другой серии опытов изучалась зависимость эрозии-аккумуляции от роста тектонической структуры при незначительных скоростях прерывистого (неоднократного) поднятия. Особое внимание уделялось роли интервалов времени между импульсами роста структуры. Продолжительность и повторность поднятия и периодов покоя создавали дополнительные условия по сравнению с предшествующими опытами. При меньшей скорости, т. е. при больших интервалах покоя между импульсами подъема, наряду с проявлением глубинной эрозии преобразование ранее сформированного рельефа происходило за счет боковой эрозии. При большей скорости преобладала глубинная эрозия.

К концу опытов вследствие специфики эрозионно-аккумулятивных процессов по длине потока продольные профили приобрели вогнутую форму. Степень ее выраженности, определяемая стрелой прогиба и ее положением по длине долины, зависела от скорости роста структуры. В обоих случаях возникли террасы хордового типа, представленные комплексом уровней, которые отличались по числу уступов и их высоте. В третьем опыте при отсутствии притоков и быстром росте антиклинали продольный профиль формировался по овражному типу с приуроченностью вогнутости к верховью.

Во второй серии опытов изучалось формирование antecedентного участка долины при пропиливаниях рекой локальной антиклинали [13]. Опыты ставили на лотке открытой площадки. Рост антиклинали, расположенной в среднем течении реки с осью, ориентированной поперек долины, осуществлялся специальным устройством. Оно состояло из двух щитов, скрепленных брусом, к концам которого крепили червячные винты. Подъем бруса воспроизводил подъем оси антиклинали и рост последней; одновременно увеличивали крутизну ее крыльев. Систему закладывали перед началом опыта на дно лотка и перекрывали грунтом, из которого формировалась модель. Схема опытов была аналогична первой серии. В двух опытах скорость подъема антиклинали была незначительной, в третьем она резко возрастала.

Во всех опытах независимо от скорости роста структуры ее подъем сопровождался врезанием потока на участке ее пересечения и выносом материала ниже по течению. К концу опытов в каждом из них в долине наблюдались две крупные формы: хребет и каньонообразный участок долины прорыва. Но в зависимости от скорости роста изменялся комплекс форм на обоих участках. При медленном поднятии продольный профиль в течение опыта оставался стабильным, поскольку приращение его уклонов было столь малым, что поток успевал уничтожить его следы. Ниже по течению возникла внутренняя дельта с неустойчивой системой русел. Ее поверхность по мере врезания потока превращалась в комплекс локальных террас. При быстром росте структуры возник перепад продольного профиля, который не успевал срабатываться потоком. Выше по течению образовалось подпрудное озеро, позднее исчезнувшее. Внутренняя дельта и комплекс локальных террас занимали большую площадь по сравнению с первым опытом. Высшие точки образовавшегося хребта в обоих случаях сместились относительно первоначального выше по течению в результате аккумуляции наносов на верхнем крыле структуры.

В третьем опыте с экстремальным ростом антиклинали не было других признаков изменения флювиального рельефа долины, свидетельствующих об ее подъеме. К концу опыта уклон продольного профиля оставался прежним. Большой прирост уклона на участке антиклинали в момент ее поднятия определял высокую транспортирующую способность потока в течение всего опыта. Энергия потока тратилась здесь на размыв поднимающегося блока грунта и транспорт ниже по течению образующихся наносов. Об этом свидетельствовала также и симметричная форма горного хребта.

В заключение отметим, что эффект взаимодействия в рассматриваемом случае определяется соотношением интенсивности роста структуры и рангом форм рельефа, на него реагирующих. При медленных поднятиях первое отражается в усиленной динамике русловых форм на участке перед структурой. С увеличением скорости роста появляются «чужеродные» формы рельефа. В случае экстремального подъема другие признаки, кроме хребта и каньона, отсутствуют.

Оси сводов локальных структур в молодых отложениях нередко не совпадают с их положением в более древних. Неясность причин этого явления понижает точность прогноза при их поисках. Этот вопрос решался в опытах третьей серии [13], в которой воспроизводилось образование купольных структур в областях интенсивной аккумуляции. Опыты ставили в большом лотке на модели реки с сетью притоков и дельтой. С учетом разной интенсивности аккумуляции структуры размещали в вершине дельты, нижнем ее конце в условиях небольшого его подтопления водой, и в конусах выноса притоков. В конце опытов после осушки модели по разрезам, вскрывающим рыхлый чехол отложений, фиксировали их строение путем зарисовок.

Использовали два типа структур: диапировые в форме жесткого штампа крыльев и структуры, крутизна крыльев которых менялась. В итоге установлено, что при формировании антиклиналей в условиях речных долин и дельт их морфологические элементы отражают взаимодействие интенсивности флювиальных процессов и эндогенной составляющей. Воздействие на них флювиального процесса зависит от четкости проявления структуры в рельефе, определяемой

интенсивностью ее роста. Если она меньше интенсивности осадконакопления, то структура слабо выражена в рельефе, и регуляторное воздействие потока сводится к перемещению отложений на ее нижнее по течению крыло. Свод структуры в этом случае смещается по направлению течения. При росте структуры в условиях эпизодического подтопления водами с малой интенсивностью эрозионной деятельности или при большой интенсивности ее поднятия она проявляется в рельефе, создавая подпор потоку и вызывая аккумуляцию наносов на ее верхнем крыле и соответственно смещение оси свода против течения.

Особое место занимают эксперименты четвертой группы, в которых изучался механизм образования платформенных структур в условиях мелководья при взаимодействии эндогенного фактора и волновых процессов [20, 21]. Необходимо было выяснить особенности роста двух нефтегазоносных структур Тимано-Печорской провинции. Опыты ставили в двух бассейнах, в основном в бассейне размерами $2,4 \times 1,5 \times 0,35$ м, единичные — в бассейне $2 \times 6 \times 0,6$ м. Для моделирования структур использовали резиновые баллоны, рост которых осуществлялся заполнением их водой; специальный дозатор обеспечивал равномерное накопление осадков, и два волнопродуктора воспроизводили волны в поверхностном слое и приливо-отливные.

При спокойном режиме бассейна в одной из серий изучалось влияние роста структур на седиментацию, в другой — воздействие на этот процесс ветровых волн и волн перемещения, третья касалась формирования отложений при чередовании трансгрессии и регрессии морского бассейна. Результаты опытов показали, что на смещение вершин и асимметрию антиклиналей наряду с тектоникой могут оказывать влияние первоначальный наклон пластов, односторонний вдольбереговой поток наносов, преобладающее направление ветров и другие явления, связанные с динамикой зоны шельфа. Анализ мощностей осадков и морфологии натуральных структур позволил реконструировать с учетом результатов опытов условия накопления на них наносов в разные эпохи и дать более обоснованный ответ на возникшие практические вопросы. Выявленные особенности механизма формирования комплекса эрозивно-аккумулятивных форм, образующихся в береговой зоне, вошли в арсенал исследований в качестве показателей проявления локальных структур, используемых при их поисках.

В заключение отметим, что в обзор не включен ряд исследований (формирование речных меандров, оценка роли местных базисов эрозии, процессы в верхнем и нижнем бьефах водохранилищ и т. п.). Они, как и проанализированные, дают представление о широте проблем, при изучении которых экспериментальный метод незаменим и обладает большими возможностями, в том числе и при решении методологических вопросов, связанных с экологией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов З. К., Дедков А. П., Ермолаев О. П. и др. Экспериментальные методы в изучении флювиальных процессов // Геоморфология. 1991. № 1. С. 103—106.
2. Стурман В. И. Изучение эрозионных процессов в лаборатории экспериментальной геоморфологии Лувенского университета // Геоморфология. 1991. № 2. С. 103—106.
3. Торнес Дж. Б., Брунсен Д. Геоморфология и время. М.: Недра, 1987. 226 с.
4. Макавеев Н. И. Руслó реки и эрозия в его бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 345 с.
5. Воронин А. П. Экспериментальное исследование солифлюкции: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1974. 19 с.
6. Воронин А. П. Перенос частиц тяжелых минералов и каменных обломков в солифлюкционном потоке // Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 3. С. 64—67.
7. Хмелева Н. В., Шевченко Б. Ф. Об особенностях развития курума // Геоморфология. 1980. № 6. С. 95—101.
8. Шевченко Б. Ф. Особенности формирования курумов и осыпных склонов по данным стационаров и экспериментальных исследований: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1981. 27 с.
9. Арманд Д. Л. Изучение геоморфологических процессов экспериментальным методом // Тр. Ин-та географии АН СССР. Материалы по геоморфологии и палеогеографии СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1950. Вып. 4. С. 28—61.
10. Нефедьева Е. А., Хмелева Н. В. Изучение эрозионных форм экспериментальным методом // Тр. Ин-та географии АН СССР. Материалы по геоморфологии и палеогеографии СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1956. Вып. 68. С. 5—36.

11. Косов Б. Ф., Никольская И. И., Зорина Е. Ф. Экспериментальное исследование оврагообразования//Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 3. С. 113—135.
12. Никольская И. И. Экспериментальные исследования развития оврагов. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1980. 26 с.
13. Маккавеев Н. И., Хмелева Н. В., Заитов И. Р. и др. Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1961. Вып. 1. 194 с.
14. Калинин А. М. Условия и механизм образования хрусталеносных россыпей Восточно-Уральского антиклинория. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1967. 29 с.
15. Маккавеев Н. И., Калинин А. М. и др. Образование аллювиальных россыпей горного хрусталя//Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1969. Вып. 2. С. 88—112.
16. Маккавеев Н. И., Хмелева Н. В., Григорьев Н. П. Аллювиальные россыпи тяжелых минералов и прогноз их коренных источников. Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 3. С. 50—113.
17. Хмелева Н. В., Виноградова О. В., Маорс Л. В. Генетические комплексы россыпесодержащего аллювия и их морфогенез//Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1983. Вып. 9. С. 110—118.
18. Хмелева Н. В., Ивочкина Л. Г., Елисеева О. А. О связи строения аллювиальных россыпей с денудационным срезом и формой коренных источников//Геоморфология. 1981. № 1. С. 23—30.
19. Хмелева Н. В., Ивочкина Л. Г. Формирование продольного профиля при восходящем развитии рельефа//Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 3. С. 5—48.
20. Маккавеев Н. И., Никифоров Л. Г. Рост платформенных структур в условиях морского мелководья//Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1969. Вып. 2. С. 121—160.
21. Никифоров Л. Г. Морфоструктурный анализ морского побережья. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: МГУ, 1972. 36 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
26.11.93

EXPERIMENTAL GEOMORPHOLOGY

N. V. KHMELEVA

Summary

A review of studies carried out by the team of the Laboratory of Experimental Geomorphology, Moscow State University, gives a description of results obtained and problems tackled in the course of development of a new — experimental — branch of geomorphology. Laboratory experiments were applied primarily to investigations of fluvial processes for 40 years; they were based on theory of a single process of erosion and alluviation as developed by N. I. Makkaveev. The results permitted to verify some propositions of the theory, to elucidate mechanism of individual process, to develop criteria by which a dynamic state and stage of the phenomena under study may be determined. The experiments were also applied to some practical purposes.

УДК 551.4.012

© 1994 г. Ю. Г. СИМОНОВ, В. И. КРУЖАЛИН, Т. Ю. СИМОНОВА

ОТ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОМОРФОЛОГИИ К ЭКОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

Прикладные геоморфологические исследования на предыдущем этапе развития, как известно, были преимущественно ориентированы на решение задач, которые можно объединить в две большие группы: поисковую и инженерно-геоморфологическую. При всем их различии они обладают единством подхода заказчикам к использованию геоморфологической информации — каким образом уменьшить затраты на поиск, разведку и эксплуатацию полезных ископаемых в первом случае и на проектирование, строительство и эксплуатацию инженерных сооружений — во втором. При этом практически не было необходимости оценивать ни то, что произойдет с природой, ни то, как эти, порой непредвиденные изменения скажутся на здоровье и условиях жизни человека. Однако в ходе