

ИСТОРИЯ НАУКИ

УДК 551.4

© 2012 г. А.Ю. СИДОРЧУК

Н.И. МАККАВЕЕВ И ПУТИ РАЗВИТИЯ ГЕОМОРФОЛОГИИ¹**Введение**

Пути развития геоморфологии многообразны и сложны, все направления трудно охватить одному исследователю. Основной интерес Н.И. Маккавеева был сосредоточен в области динамической геоморфологии, и на развитие именно этого направления в геоморфологии он оказал наибольшее влияние.

В середине XX в. динамическая геоморфология как наука находилась в состоянии кризиса [1]. Заканчивался первый крупный этап в ее развитии, который можно назвать этапом качественного анализа процессов рельефообразования и качественного синтеза результатов этого анализа. Анализ процессов образования рельефа занял многие столетия, сначала при строительстве, особенно гидротехническом, затем при геологических работах. Последние приводили к описаниям истории развития рельефа отдельных регионов и в конце XIX в. дали возможность В.М. Дэвису и его ученикам создать обобщающую качественную модель развития геоморфологического ландшафта, названную географическим циклом [2]. Эта модель доминировала в науке более полувека, хотя и подвергалась постоянной критике. Еще в 1950 г. Анри Болиг, возможно, самый яркий ученик Дэвиса, обосновывал идеи о прогностическом значении географического цикла, защищал употребление понятия “стремления” в этой модели и весьма скептически отзывался о возможностях количественного подхода в динамической геоморфологии [3]. Через десять лет И.С. Щукин, представитель того же поколения, очень осторожно оценил возможности количественных и экспериментальных исследований [4]. Тем не менее, качественные подходы в геоморфологии постепенно теряли былое значение. Практика требовала количественных оценок темпов изменения рельефа, особенно в динамичных областях и для быстрых процессов. В геоморфологию пришли люди, получившие техническое базовое образование или приобретающие его в ходе практической деятельности. Наступал новый крупный этап в развитии динамической геоморфологии – этап количественного анализа процессов рельефообразования.

Критика географического цикла Дэвиса

Н.И. Маккавеев вошел в геоморфологию в конце сороковых – начале пятидесятых годов XX в. При базовом географическом образовании он имел обширный опыт инженерных гидротехнических работ, полевых и лабораторных измерений, камерального

¹ Статья публикуется в связи с переизданием книги Н.И. Маккавеева “Русло реки и эрозия в ее бассейне” и выпуском трех книг избранных трудов: “Эрозионно-аккумулятивные процессы и рельеф русла реки” (1998), “Теоретические и прикладные вопросы почвоведения и русловых процессов” (2003) и “Русловые процессы: теория и практика” (2008).

количественного анализа результатов изысканий. Такой опыт давал ему все основания для критики старых геоморфологических концепций, в первую очередь географического цикла.

В это время вышла книга К.К. Маркова [1], где теория Дэвиса была подробно рассмотрена и дана оценка ее недостатков: отрыв от реальной геотектоники, замкнутость географического цикла и обособленность циклов, обусловленных разными процессами. Н.И. Маккавеев свою критику сосредоточил на тех позициях, которые в то время защищал А. Болиг – на элементах финализма в концепции географического цикла и на возможности прогнозировать на ее основе развитие форм рельефа. Вот что говорил Болиг в докладе на Международном конгрессе по философии наук в 1949 г. (цитируем по [3], с. 73): “Если при установившемся равновесии последовательность стадий четко выражена, то это значит, что при знании одной стадии достаточно пытливый ум может точно предвидеть все последующие изменения, а также, следуя обратному ходу развития, он сможет вывести из настоящего состояния изменения, имевшие место в прошлом”. И далее (с. 77) “...мы не грешим ни финализмом, ни антропоморфизмом, если только мы исходим, хотя бы косвенно, из принципа наименьшей работы, когда мы говорим, что текущие воды, ледники, волны, ветер стремятся придать своему ложу форму, оказывающую наименьшее сопротивление их движению”. В том же году Н.И. Маккавеев пишет (цитируем по [5], с. 13): “Использовать схему циклов отдельного изолированного явления для целей прогноза, по-видимому, нельзя, так как в обратимом цикле не имеется никакой гарантии, что тенденция, замеченная в настоящем, продолжится и в будущем. Цикл развития того или иного явления природы ни в каком случае нельзя рассматривать как вещь в себе, вне связи с факторами, его определяющими, и явление только тогда может быть понято, когда удастся установить эту связь, и только в таком случае цикл будет полезным пособием для прогноза”. И в другой статье (цитируем по [5], с. 21): “Из антропоморфических принципов получил наиболее широкую известность так называемый “закон экономии сил природы”, или “принцип минимальной диссипации энергии”... Это положение античной философии до сих пор еще некоторыми исследователями рек признается за аксиому. Естественные реки очень часто нарушают принцип экономии. Гидравлический радиус естественного речного потока, как правило, в десятки раз меньше наивыгоднейшего. Формы рельефа, возникающие в русле в результате взаимодействия потока и грунта, вместо того чтобы способствовать “удобному” движению воды, увеличивают потерю напора вдвое и более”.

Н.И. Маккавеев не отрицает наличие природных циклов и возможность их использования для прогноза. Он возражает (как и К.К. Марков) против предопределенности цикла и указывает на необходимость выявления природных закономерностей, которые могут привести к циклу, а могут и изменить его развитие на любой стадии. Он также возражает против применения для этого принципов вариационного характера, таких как “закон экономии сил природы”, или “принцип минимальной диссипации энергии”, так как такие принципы ведут к антропоморфизму и телеологии. Он утверждает [5, с. 25], что “...развитие форм рельефа не может происходить изолированно, вне связи с изменениями условий, его определяющих”.

Основной путь развития геоморфологии Н.И. Маккавеев видит в исследовании физической сущности процессов рельефообразования. Он пишет [6, с. 7]: “Вряд ли нужно кого-либо убеждать, что главной дорогой, по которой должно пойти развитие геоморфологии, является путь, обеспечивающий глубокое проникновение в физическую сущность и механизм процессов, определяющих формирование рельефа, а также закономерности его изменений, в зависимости от естественно-исторических условий в различных частях оболочки земного шара. От успешности разработки этой проблемы тесно зависит возможность расширения областей практического приложения геоморфологии”.

Методы исследования

Итак, Н.И. Маккавеев полагал, что явление природы только тогда может быть понято, когда удастся установить связь с факторами, его определяющими. Эта связь не выводится из неких вариационных принципов, но является следствием базовых физических законов. Имелось в виду установление не только качественной, но и количественной связи между явлением и определяющими факторами. Для достижения этой цели Н.И. Маккавеев разворачивает наблюдения за процессами рельефообразования в экспериментальных лотках и на натурных реках, в ходе которых проводятся детальные измерения характеристик рельефообразующих факторов и изменений рельефа. “По мере развития геоморфологии как самостоятельной научной дисциплины, по мере того как будет укрепляться ее связь с практикой, центр тяжести геоморфологических исследований обязательно должен перемещаться в сторону методов, дающих возможность обосновывать количественные решения и точные прогнозы. Подобное изменение существа методов исследований является обязательным для любой прогрессивно развивающейся отрасли науки” [6, с. 7].

Экспериментальные работы по исследованию процессов рельефообразования на моделях

Еще до прихода на кафедру геоморфологии географического факультета МГУ Н.И. Маккавеев проводил исследования структуры потока в гидравлических лотках при различных формах русла, извилистого и разветвленного, при этом он сотрудничал с таким крупным исследователем динамики русловых потоков, как М.А. Великанов. На кафедре Н.И. Маккавеев разворачивает общее геоморфологическое моделирование, одно только перечисление выполненных опытов показывает масштаб исследований. В 1954–1975 гг. при непосредственном участии Н.И. Маккавеева и/или под его руководством были выполнены эксперименты на моделях по развитию продольного профиля реки и образованию речных террас при изменении величины и режима стока воды и наносов, влияния растительности на пойме, местных базисов эрозии, положения уровня приемного водоема и общего наклона местности; формированию antecedentного участка долины и влиянию купольных структур на форму и динамику речного русла; исследования по морфологии и динамики свободных и врезанных меандров речного русла; движения крупнообломочного материала в логах; размыва морскими волнами купольных тектонических структур; формирования аллювиальных россыпей; формирования термоэрозионных форм.

Применялся так называемый “метод свободного моделирования”, когда “водный поток в ходе опыта сам формирует свое русло и долину без вмешательства экспериментатора. Последний устанавливает лишь исходные условия опыта, а именно: форму и состав грунта первичной поверхности, по которой будет протекать поток, величину и режим стока воды, крупность, количество и ход поступления в поток наносов”; “...нужно при подборе условий опыта всегда придерживаться указаний, которые дает теория моделирования, и, кроме того, по возможности чаще в ходе эксперимента сверять получаемые результаты с натурой, чтобы в случае необходимости снова прокорректировать его исходные условия” [6, с. 46].

“Свободное моделирование” до сих пор является основным методом моделирования геоморфологических процессов. Для преодоления присущего этому методу масштабного эффекта часто применяется повторное моделирование одного и того же явления на моделях разного размера [7]. Однако в силу технических условий проведения опытов законы теории подобия при свободном моделировании нарушаются, и тогда только сравнение с аналогичными натурными процессами делает моделирование осмысленным. Недаром во всех трех томах “Экспериментальной геоморфологии” [6, 8, 9] значительное место во всех разделах отводится анализу данных измерений на натуре.

С самого начала своей научной карьеры Н.И. Маккавеев принимает участие в крупных экспедиционных изысканиях, нацеленных на комплексное и количественное исследование природных объектов. Таким было исследование почвенных условий в дельте Терека [10, с. 17–170], изданное отдельной книгой в 1934 г. Дальнейшая работа на речном транспорте была связана с детальным анализом русловых переформирований на самых разных реках Европейской части СССР [10, с. 171–230]. При этом Н.И. Маккавеев широко использовал материалы промеров и гидрологических измерений на реках, проводимых русловыми изыскательскими партиями, эти материалы по самому роду объекта всегда давали количественную информацию.

С приходом на кафедру геоморфологии географического факультета МГУ Н.И. Маккавеев организует экспедиционные исследования на Вычегде и Северной Двине, верхней и средней Оби, верхней Амударье, под его научным руководством велись исследования на Лене, Киренге, Алдане. Тематика не ограничивалась руслами рек: с 1969 г. были начаты исследования в дельтах Таза и Пура, Яны, Енисея, Лены, Индигирки. Комплексные исследования формирования стока наносов горных рек были организованы на юго-западном Кавказе. В дальнейшем на северном Кавказе (совместно со специалистами по исследованию лавин и селей) проводились работы по составлению генеральных схем противоэрозионных и противоселевых мероприятий. Все эти исследования дали богатый материал для теоретических обобщений Н.И. Маккавеева. Одновременно на основе этих исследований разрабатывались практические рекомендации по улучшению условий судоходства на реках и в дельтовых рукавах, по организации противоэрозионных работ. В выполнении исследований принимало участие большое количество сотрудников и учеников Н.И. Маккавеева, и на этой базе создавалась его научная школа.

Примером совместного использования результатов моделирования развития продольного профиля реки и исследований естественных процессов динамики речных перекатов является статья Н.И. Маккавеева с соавторами [11], где рассмотрен русловый режим в зонах переменного подпора. Эксперимент на модели дал возможность общего качественного описания формирования тела заиления на участке подпора реки при подъеме уровня приемного водоема, особенностей этого процесса в условиях переменного уровня. Было получено уравнение линейного уменьшения слоя аккумуляции вверх по реке. Но коэффициенты в этом уравнении, с помощью которых могли быть проведены количественные оценки, были получены по данным натурных наблюдений. Режим перекатов и их типизация рассмотрены исключительно на базе натурных измерений на Днепре и Дону, где установлены существенные отличия от бытовых условий сроков и знака русловых переформирований на разных участках зоны переменного подпора.

Количественный анализ процессов образования рельефа

Большинство своих выводов Н.И. Маккавеев строит на основе количественных данных и законов физики, также предлагает свои зависимости характеристик русового рельефа с определяющими факторами. Эти зависимости обычно очень просты, но имеют большой физический смысл.

Еще в 1940 г. по данным наблюдений на равнинных реках (Волги, Оки, нижней Камы, Днепра) им была получена количественная связь между радиусом кривизны динамической оси потока R с расходом воды Q и уклоном свободной поверхности воды I в условиях деформируемого русла [10, с. 189]:

$$R = 0.0043 \frac{\sqrt{Q} - C}{I^n}. \quad (1)$$

Здесь значение n близко к 1, C зависит от числа Лохтина и изменяется от 2 до 12. Первоначально эта формула предназначалась для описания блуждания динамической оси потока на разных фазах гидрологического режима, спрямления во время половодья и искривления в межень. Но в дальнейшем эта формула стала широко применяться для оценки размеров излучин речного русла. М.А. Великанов предложил модификацию формулы (1) с учетом размерности входящих в нее величин [12, с. 255]. Замечу, что в мировой литературе формула типа (1) появилась в 1945–1946 гг. в работе К. Инглиса [13].

Формула (1) была предложена Н.И. Маккавеевым в размерной форме, что и повлекло ее дальнейшую модификацию. В более поздних разработках Н.И. Маккавеев следил за размерностью предлагаемых им формул. В этом отношении характерной является его работа над показателем устойчивости русла. Классическим показателем устойчивости речного русла является число Лохтина L – отношение диаметра донных наносов d и величины километрического падения h :

$$L = \frac{d}{h}. \quad (2)$$

Эта формула была выведена В.М. Лохтиным [14] при достаточно строгом рассмотрении баланса сил, действующих на частицу наносов на дне речного русла, удерживающих P и сдвигающих P_1 , так что на некотором промежуточном этапе вывода она выглядела бы, как

$$\frac{P}{P_1} \sim \frac{gd}{v^2}. \quad (3)$$

Лохтин заменил скорость потока v ее зависимостью от определяющих факторов. При этом он отверг формулу Шези на том основании, что в ней уже учтено взаимодействие потока с наносами ложа и воспользовался формулой, которая применяется ныне для оценки скорости свободного истечения жидкости при данном напоре h :

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (4)$$

Лохтин называет это запасом скорости на единицу длины, который обуславливается падением реки. Тогда формула (3) приобретает вид

$$\frac{P}{P_1} \sim \frac{d}{h}. \quad (5)$$

Далее Лохтин интерпретирует падение (т.е. разность высот) как уклон (т.е. падение в метрах на километр пути). Эта вторая ошибка делает формулу (5) размерной, зато практически применимой при сравнении рек с близкими глубинами и шероховатостью ложа.

Простота и вычислительные удобства формулы Лохтина сделали ее важным инструментом для оценки устойчивости русел рек, но ошибки, сделанные при ее выводе, привели к необходимости ее модификации. М.А. Великанов фактически повторил анализ баланса сил, но остановился на критерии устойчивости русла [12, с. 261] в виде корня квадратного из выражения в правой части (3). Н.И. Маккавеев [15], как и Лохтин, заменил в формуле (3) скорость потока ее зависимостью от определяющих факторов. Он воспользовался для этого формулой Шези, чем избежал ошибок Лохтина. Однако Н.И. Маккавеев пошел значительно дальше в оценке устойчивости речного русла. Он отметил наличие линейной зависимости между показателем устойчивости русла в форме (3) и отношением ширины русла к его глубине B/H , что позволило получить выражение [15, с. 165]

$$\gamma = \frac{gd}{BC^2 I}. \quad (6)$$

Здесь C – коэффициент сопротивления в формуле Шези. Позднее Н.И. Маккавеев [8, с. 41] записывает (6) в виде

$$K_c = \frac{d}{BI}, \quad (7)$$

что делает критерий стабильности русла похожим на привычное число Лохтина с дополнительной шириной русла B в знаменателе. Это дополнение имеет глубокий физический смысл, так как критерий стабильности Н.И. Маккавеева стал представлять собой отношение двух критериев

$$K_c \sim \frac{gd}{v^2} \bigg/ \lambda \frac{B}{H}, \quad (8)$$

из которых первый представляет собой квадрат критерия М.А. Великанова и определяет устойчивость русла по отношению к глубинной эрозии, а второй – слегка модифицированный критерий И.Ф. Карасёва [16, с. 94], который определяет плановую устойчивость речного русла. Здесь λ – коэффициент гидравлических сопротивлений.

Третья формула Н.И. Маккавеева, которую следует упомянуть, это зависимость длины временного или постоянного водотока L от площади водосбора F [15, с. 55]:

$$L = 2.9 \sqrt{F}. \quad (9)$$

При кажущейся простоте эта зависимость (называемая в англоязычной литературе законом Хака [17]) с успехом используется для доказательства фрактальности речной сети (когда показатель степени отличен от 0.5 [18]), а также применяется в многочисленных математических моделях склоновой эрозии.

Изменения продольного профиля рек

Н.И. Маккавеев отмечает [5, с. 33], что согласно теории Дэвиса о циклах речной эрозии в руслах рек при поднятии базиса эрозии на значительном протяжении вверх по течению происходит аккумуляция и поднятие дна, тогда как при понижении базиса развивается глубинная эрозия. Качественный и количественный анализ процессов в устьях рек привел Н.И. Маккавеева к выводу о том, что эта схема Дэвиса не универсальна. Как показывают эксперименты в лотках и наблюдения на натурных объектах, на участке сопряжения реки и приемного водоема за счет резкого расширения потока обычно происходит уменьшение уровней воды и увеличение придонных скоростей потока, т. е. наблюдается явление приустьевого спада. Приустьевой спад наиболее характерен во время половодья, так как на приустьевом участке реки происходит быстрое снижение высоты волны половодья, которое контролируется практически стабильным уровнем приемного водоема. Данные наблюдений на 15 равнинных реках СССР показали [5], что уклон водной поверхности в зоне приустьевого спада в 2–2.5 раза больше, чем в среднем течении реки. Длина этой зоны для рек с малыми уклонами достигает нескольких сотен километров (2000 км для р. Оби). С приустьевым спадом связан размыв русла на приустьевом участке. Размыв дна русла продолжается до достижения скоростей течения, достаточных для перемещения транспортируемых наносов, но недостаточных для размыва. Линейные оценки показывают, что глубины реки при этом увеличиваются примерно на 30–40% бытовых, нелинейность процесса приводит к существенно большему росту глубин (до 100%). Переуглубление речных русел в приустьевой области было неоднократно описано (см. анализ К.К. Маркова [1]), Н.И. Маккавеев вскрыл причину этого явления. Он также показал, что здесь происходит переход части потенциальной энергии потока в кинетическую и за счет этого активное выдвигание речных дельт при очень малых уклонах свободной поверхности потока или даже его отсутствия на приустьевом взморье. Активные эрозионные процессы ниже уровня базиса эрозии и в дальнейшем интересовали Н.И. Маккавеева, так,

он всячески поддерживал работы по исследованию перемещения материала в подводных каньонах.

Главными следствиями подобных гидравлических и гидрологических условий Н.И. Маккавеев [5, с. 46–56] считает следующие:

1) Приустьевой спад, смещение зоны распластывания половодья вниз по реке за счет роста поймы и выдвижение устьевого бара в приемный водоем приводят к тому, что в русле реки, несущей наносы и активно строящей дельту, наблюдаются три чередующиеся и тесно связанные друг с другом зоны: 1) зона аккумуляции в верхней половине области распластывания половодья, 2) зона эрозии в нижней части области распластывания и 3) зона аккумуляции в пределах водоприемного бассейна. При постоянном базисе эрозии эти зоны постепенно перемещаются вниз по течению по мере нарастания длины дельты.

2) Понижение базиса эрозии вызывает в общем те же явления (только более интенсивные), что и при стационарном его положении: авандельта постепенно прорезается, бар выдвигается в море и одновременно передвигаются вниз по течению приустьевые ямы. В то же самое время происходит заполнение с верхней стороны старых ям и аккумуляция наносов на пойме.

3) При повышении базиса эрозии и общем смещении береговой линии процесс происходит по той же схеме, но в обратном порядке; приустьевая яма перемещается вверх по течению; образующиеся в результате размыва наносы пополняют верхний склон бара, и последний также следует вверх по реке. Так как зона распластывания перемещается по направлению против течения, то возможно углубление дна реки и даже некоторое снижение уровня. Быстрое повышение базиса эрозии в условиях широкой долины может вызвать довольно заметный размыв дна (на глубину, не превышающую величину амплитуды уровней, т. е. до нескольких метров), вместо аккумуляции и поднятия уровня реки (согласно схеме Дэвиса). Однако у рек, несущих много наносов и активно строящих дельту, при очень медленном поднятии базиса длина может остаться постоянной и на всем протяжении низовья будет иметь место аккумуляция.

Н.И. Маккавеев отмечает, что процессы, связанные с приустьевым спадом или подпором, производят лишь местные врезы или заиления русла. Наибольшее влияние (а в случае значительных вертикальных колебаний – решающее) оказывает процесс общего изменения продольного профиля реки. Здесь выделены следующие закономерности [5, с. 60–64]:

1) Если при регрессии приемного водоема обнажается территория, имеющая уклон больший, чем средний уклон водной поверхности потока в нижнем течении реки (при формирующем русло расходе), то происходит общее врезание русла сначала в нижнем, а затем и в среднем течении.

2) Если же уклон реки больше, чем уклон обнажающейся территории, то происходит аккумуляция наносов в низовьях, блокировка устья и растекание реки по равнине.

3) Если при поднятии базиса эрозии береговая линия бассейна наступает на сушу и часть речной долины затопляется, то у реки отсекается пологая часть продольного профиля. Кривая нарушается, и весь продольный профиль реки должен будет перестроиться. Пологий участок профиля должен возобновиться или за счет наращивания дельты, или за счет врезания русла.

4) При понижении базиса эрозии, если оно сопровождается отступанием берега бассейна и если средний уклон реки остается постоянным, отлогая часть кривой профиля должна перемещаться вниз, вследствие чего происходит врезание русла на участке вновь образовавшейся суши, но одновременно обычно происходит аккумуляция на участке стыка среднего течения с низовьем реки.

5) Чтобы определить, какой процесс будет происходить (врезание или аккумуляция), необходимо проанализировать весь комплекс условий, сопровождавших явление изменения базиса эрозии: деятельность абразии, скорость изменения уровня моря, интенсивность наращивания дельты, изменение водосборной площади и т.д.,

из них наиболее важными являются изменение условий стока и изменение общего уклона реки.

6) Процессы формирования низовий рек отличаются необычной сложностью, и можно определенно утверждать, что при палеогеографическом анализе равнинных территорий (если эти территории не испытывали за рассматриваемый период больших и резких вертикальных колебаний) схемы Дэвиса применять нельзя. В каждом отдельном случае нужно производить конкретный анализ всех основных участвующих в процессе факторов, так как в зависимости от их сочетания врезание или аккумуляция русла рек могут быть показателями совершенно различных процессов.

В настоящее время основная часть этих положений Н.И. Маккавеева разделяется большинством исследователей устьев рек. Схемы трансформации продольного профиля реки при различных сочетаниях уклонов реки и взморья и знака изменения уровня приемного водоема построены В.Н. Михайловым [19, с. 182–196]. Тем не менее, полный анализ всего многообразия условий изменений устьев рек при сочетании всех отмеченных в пп. 5 и 6 факторов, не проведен до сих пор.

Важная геоморфологическая проблема, поднятая Н.И. Маккавеевым и связанная с трансформацией продольного профиля реки, это проблема образования хордовых террас. Этот тип речных террас, когда относительная высота террасы снижается к верховьям и к низовьям, и достигает максимума в среднем течении реки (т.е. терраса образует хорду кривой продольного профиля), был упомянут А. Болигом [3, с. 109] в связи с аккумуляцией наносов. Н.И. Маккавеев ввел сам термин “хордовая терраса” и считал их типичным видом речных террас (наряду с многими другими типами [20]). Он выявлял эти террасы при моделировании трансформации продольного профиля экспериментальной реки в условиях тектонических деформаций, изменений климата и условий стока воды и наносов [6, 9]. Такие террасы были описаны на реках западного Кавказа [5, с. 127–134]. Хордовые террасы получались при теоретическом анализе трансформации продольного профиля рек [5, с. 73–80], они служили иллюстрацией к применению “закона” факторной относительности [20]. Интересно, что в большинстве геоморфологических исследований речных долин хордовые террасы не выделяются. Описание хордовых террас отсутствует в учебнике И.С. Щукина [4], лишь в некоторых более поздних отечественных учебниках по геоморфологии такие террасы упоминаются [21], в англоязычной литературе такого термина вообще нет. Это характерный пример того, что только рассмотрение всего продольного профиля реки, начиная с самых верховьев и до низовьев (что, видимо, не часто бывает), может составить верную геоморфологическую картину.

Синтез (качественный и количественный) геоморфологических идей у Н.И. Маккавеева

Важнейшей чертой научных построений Н.И. Маккавеева была его способность к широким обобщениям, как на качественной, так и на количественной основе (см., например, анализ его научного творчества, предложенный Ю.Г. Симоновым в [10, с. 5–16]). Хороших специалистов по анализу процессов рельефообразования (в том числе и количественному) много, но лишь немногие геоморфологи создавали обобщенные теории развития геоморфологического ландшафта. Обобщающие работы проходят красной нитью через все научное творчество Н.И. Маккавеева. Широко известна его книга “Русло реки и эрозия в ее бассейне”, где рассмотрен эрозионно-аккумулятивный процесс в водотоках всех типов (в том, что сейчас мы называем эрозионно-руслевой системой). Эта книга [15] не имела аналога среди работ специалистов по флювиальной геоморфологии того времени. Так, в работе П. Хортона [22] рассматривались в основном склоновые потоки и временные водотоки, в труде сотрудников Государственного гидрологического института [23] – в основном речные русла. В более поздних книгах Л. Леопольда, Г. Вольмана, Дж. Миллера [24], И.В. Попова [25] и С. Шамма [26] уже дается анализ рельефообразования во всей системе водотоков.

В конце XX в. идея о необходимости рассмотрения всей флювиальной системы во всем ее многообразии и при воздействии на нее природных и антропогенных факторов, стала общепризнанной и активно разрабатывается в международных программах геосферно-биосферных исследований [27].

В дальнейшем Н.И. Маккавеев обращался к вопросам классификации гидравлических процессов в различных звеньях сети водотоков [5, с. 171–182], давал широкие географические обобщения эрозионных процессов [5, с. 115–126, с. 193–200], обосновывал основные закономерности единого эрозионно-аккумулятивного процесса [5, с. 241–251, 277–285]. Здесь рассмотрим его последние работы по формированию пенепленов [5, с. 252–256, с. 257–268]. Эти работы нельзя рассматривать как законченные. Они были опубликованы в последние годы жизни Н.И. Маккавеева (или обнаружены в его архиве [28, 29]) и имеют во многом тезисный характер. Тем не менее, они вносят важный вклад в современную динамическую геоморфологию, знаменуя новый этап в развитии этой науки.

Н.И. Маккавеев строит глобальную качественно-количественную модель эволюции для системы трех оболочек нашей планеты (лито-, гидро- и астеносферы) как модель почти замкнутого круговорота вещества. Ее характеристики следующие:

1) Верхняя ветвь этого круговорота – “поток” вещества, перемещаемого агентами денудации в направлении материк – океан; нижняя ветвь – “поток” вязкого магматического вещества в астеносфере в обратном направлении. Движение магмы отражается на перемещении плит, которыми сложено дно океанов и которые вместе с лежащими на них осадками подвергаются субдукции (подсовыванию под континентальные плиты) и в дальнейшем в виде метаморфических пород участвуют в построении материковой коры.

2) Систему рассматриваемых оболочек Земли можно представить как своеобразную автоколебательную систему. Движение в нижней (эндогенной) ветви круговорота вещества поддерживается за счет тепловой энергии Земли; движение в верхней (экзогенной) ветви – в основном силой тяжести, но зависит также от климатических факторов, определяющих циркуляции водных и воздушных масс. Термин “автоколебательный” применяется к этому процессу лишь в том смысле, что он может развиваться и без участия инопланетных факторов.

3) Автоколебательная система приобрела пульсационный режим вследствие того, что магматическое вещество астеносферы представляет собой супервязкую структурную жидкость. Одна из главных особенностей структурных жидкостей – большое сопротивление, необходимое для приведения ее в движение. Когда же движение начинается, вязкостное сопротивление резко и значительно убывает.

4) Денудация активизирует круговорот вещества в системе суши – океан. Без денудации автоколебательный процесс невозможен. Магматические массы начинают двигаться при некоторых критических значениях горизонтального градиента давлений, который возникает между океанскими и континентальными областями в астеносфере вследствие разгрузки суши под действием денудации. Наступают эпохи горообразования, когда интенсифицируются процессы перемещения вещества астеносферы, поднятия материков, оседания дна океанов, вулканизма, развития гор, геосинклиналей и т.п.

5) Магматические массы двигаются до тех пор, пока не снизится до некоторых критических минимальных значений горизонтальный градиент давлений. Тогда наступает период остановки движения магматических “потоков”, в течение которого денудационные процессы подготавливают условия, благоприятствующие возобновлению движения.

6) На этапе затухания эндогенных процессов интенсивность денудации некоторое время продолжает расти, пока энергия рельефа не достигнет максимального значения. Затем эта энергия постепенно убывает по мере снижения отметок материка и сглаживания местных разностей высот, и на суше формируются пенеплены (почти равнины).

Уменьшению энергии рельефа способствует также поднятие уровня океана, вызванное накоплением в нем осадков.

7) Исходя из того, что порядок величины скорости перемещения подкорового вещества составляет сантиметры в год (что согласуется с данными о перемещении плит, слагающих дно океана), можно оценить длительность геоморфологического цикла ~ 100 млн. лет.

8) Таким образом, считать, что в развитии рельефа ведущую роль играет тектоника, – неверно. Эндогенная и экзогенная ветви круговорота вещества тесно связаны между собой.

Н.И. Маккавеев одним из первых создал механически непротиворечивую качественно-количественную модель взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов. Был показан механизм становления восходящего и нисходящего типов развития рельефа в геоморфологическом цикле при основополагающей роли и в том, и в другом процессах денудации. Детали этой схемы можно и нужно обсуждать. Геотектонические концепции не скоро выйдут из стадии гипотез, более или менее обоснованных. Что денудация земной поверхности и аккумуляция наносов сопровождаются вертикальными изостатическими движениями земной коры, общепризнано [30]. Но идея, что эти процессы могут быть спусковым механизмом горизонтальных движений вещества астеносферы, насколько известно, никем, кроме Н.И. Маккавеева, не защищалась. Здесь преобладает точка зрения, высказанная К. Оллиером [30, с. 250]: "...даже если эрозионная деятельность может привести к изостатическим поднятиям, она все же не в состоянии вызвать процессов спрединга и рифтогенеза или повлечь за собой формирование новой окраины континента или горных хребтов". Однако, тот же Оллиер [30, с. 51] отмечает, что энергия, которую Земля получает от Солнца, почти в 5000 раз превосходит геотермальную энергию. Так что положение Н.И. Маккавеева, что эндогенная и экзогенная ветви круговорота вещества взаимосвязаны, имеет и энергетическое обоснование.

Заключение

Современная динамическая геоморфология вступает в этап научной зрелости. Длительное накопление количественных данных о различных процессах образования рельефа в ходе полевых наблюдений и лабораторного эксперимента привело к появлению динамических математических моделей, которые вполне адекватно описывают как происхождение, так и эволюцию форм рельефа разного типа. Это особенно хорошо видно в области флювиальной геоморфологии, где имеется мощный фундамент современной численной гидравлики и гидродинамики. Конечно, не решены еще многие фундаментальные проблемы, и многие процессы описываются на уровне эмпирической параметризации. Так, в динамике русловых потоков остаются нерешенными базовые проблемы определения гидравлических сопротивлений и расхода наносов, и, скорее всего, они еще не скоро найдут свое теоретическое решение. Это не мешает строить детальные численные модели изменений рельефа речного русла и давать прогноз таких изменений с достаточной для практики точностью [31]. В других областях геоморфологии прогресс не столь существенный, тем не менее, набор существующих динамических моделей вполне основателен [32].

Как результат появилась возможность создания обобщающих динамических численных моделей эволюции геоморфологического ландшафта. Таких моделей еще немного [33], в них более точно прорабатываются вопросы развития речной сети и менее детально проблемы, связанные с выветриванием, развитием склонов, эволюцией ледникового рельефа и пр. Во многих динамических моделях эволюции геоморфологического ландшафта слабо представлена эндогенная составляющая развития рельефа, хотя изостатическая геотектоника, инициируемая денудационными процессами, рассмотрена в некоторых моделях. Зато собственно геотектонических динамических моделей, описывающих движение тектонических плит отдельных регионов и глобально, создано большое количество.

Есть основание полагать, что база для построения трехмерной численной модели эволюции рельефа в глобальном масштабе или для крупных регионов на некотором уровне параметризации экзогенных и эндогенных процессов уже существует. В такой модели, конечно, более достоверно будут описаны экзогенные процессы и на уровне некой геотектонической гипотезы, эндогенные процессы. Тем не менее, при создании такой модели задача, решенная В. Дэвисом на качественном уровне, будет решена количественно, такая модель может быть верифицирована и использована для геолого-геоморфологического прогноза и ретроспективных оценок.

Когда появится такая модель, будет ли у нее один автор, или это будет некий коллективный “количественный Дэвис”, сказать трудно. Главным является то, что современная геоморфология в целом готова для решения такой задачи. Здесь уместно выписать большую цитату из работы скептика А. Болига [3, с. 133], который отметил: “Впрочем, геоморфология для понимания форм земной поверхности не ждала детального объяснения происходящих процессов; ей достаточно было охватить процессы в общем, синтетическом, качественном виде. Не знаменательно ли, что в этой области ни одна новая истина не была обнаружена путем вычисления или опыта (т.е. эксперимента – А.С.), не будучи сначала открыта посредством наблюдения и рассуждения? Это позволяет, может быть, поставить вопрос, без сомнения смелый: верно ли, что наиболее полное знание процессов позволяет безоговорочно сделать вывод о формах, являющихся их результатом? Во всяком случае, качественный метод оправдал себя – теперь пусть оправдает себя количественный метод”. Н.И. Маккавеев многое сделал для того, чтобы качественные и количественные подходы в геоморфологии не противопоставлялись, а сочетались. Он начинал с критики умозрительности географического цикла, провел уникальное по своим масштабам и значимости количественное исследование процессов рельефообразования и создал мощную обобщающую качественно-количественную концепцию единого эрозионно-аккумулятивного процесса для речного бассейна, и в конце своей жизни наметил основные рамки общей теории геоморфологического цикла и эволюции геоморфологического ландшафта.²

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков К.К. Основные проблемы геоморфологии. М.: Географгиз, 1948. 344 с.
2. Дэвис В.М. Геоморфологические очерки. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 455 с.
3. Болиг А. Очерки геоморфологии. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 262 с.
4. Щукин И.С. Общая геоморфология. Т. 1. М.: Изд-во МГУ, 1960. 615 с.
5. Маккавеев Н.И. Эрозионно-аккумулятивные процессы и рельеф русла реки. М.: Изд-во МГУ, 1998. 285 с.
6. Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В., Заитов И.Р., Лебедева Н.В. Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1961. 194 с.
7. Клавен А.Б. Моделирование русловых форм в потоках с открытой водной поверхностью // Тр. V Всесоюз. гидрологич. съезда. Т. 10. Кн. 2. 1986. С. 237–248.
8. Экспериментальная геоморфология. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1969. 255 с.
9. Экспериментальная геоморфология. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1978. 142 с.
10. Маккавеев Н.И. Теоретические и прикладные вопросы почвоведения и русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 2003. 271 с.
11. Маккавеев Н.И., Белинович И.В., Хмелева Н.В. Русловые процессы в зонах переменного подпора // Русловые процессы. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 318–337.
12. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т. II. Наносы и русло. М.: Гостехиздат, 1955. 323 с.
13. Inglis C.C. Factors affecting meanders in channels // Annual Report of Central Irrigation and Hydrologic Research Station. Poona. 1942–1943.
14. Лохтин В.М. О механизме речного русла. СПб.: 1897. 80 с.

² Статья написана по инициативе Р.С. Чалова. По отдельным вопросам автор воспользовался консультациями В.И. Мысливаца.

15. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в её бассейне. М.: АН СССР, 1955. 346 с.
16. Карасёв И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
17. Hack J. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland // U.S. Geological Survey Professional Paper 294-B. 1957.
18. Никора В.И. Фрактальные свойства некоторых гидрологических объектов. Кишинев: ИГИГ АН МССР, 1988. 43 с.
19. Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 279 с.
20. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 114 с.
21. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 2006. 416 с.
22. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М.–Л.: Изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.
23. Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В. и др. Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 372 с.
24. Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. Fluvial Processes in Geomorphology. San Francisco: W.H. Freeman and Co, 1964. 509 p.
25. Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
26. Schumm S.A. The fluvial system. New York: Wiley, 1977. 338 p.
27. Sidorchuk A., Walling D., Wasson R.J. A LUCIFS strategy: modelling the sediment budgets of fluvial systems // Long Term Hillslope and Fluvial System Modelling: Concepts and Case Studies from the Rhine River Catchment. Berlin: Springer-Verlag, 2003. P. 19–36.
28. Маккавеев Н.И. Основные проблемы динамической геоморфологии // Геоморфология. 1986. № 3. С. 3–6.
29. Маккавеев Н.И. Основные модели развития рельефа // Геоморфология. 1986. № 3. С. 6–14.
30. Оллиер К. Тектоника и рельеф. М.: Недра, 1984. 460 с.
31. Беликов В.В. Совершенствование методов и технологий прикладного численного моделирования в гидравлике открытых потоков: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МГУ, 2005.
32. Models in geomorphology / M.J. Woldenberg. Boston: Allen & Unwin, 1985.
33. Hancock G.R., Lowry J.B.C., Coulthard T.J. et al. A catchment scale evaluation of the SIBERIA and CAESAR landscape evolution models // Earth Surface Processes and Landforms. 2010. V. 35. P. 1096–1098.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
15.06.2011

N.I. MAKKAVEYEV AND DEVELOPMENT OF GEOMORPHOLOGY

A.Ju. SIDORCHOUK

Summary

Toward the middle of the XX century the large stage of dynamic geomorphology development was accomplished; it was the stage of qualitative description of morphogenetic processes and generalization of these knowledge in concept of geographical cycle by W. Davis. At this time N.I. Makkaveyev began his geomorphological studies with criticism of speculative character of this concept and reasoned the want of quantitative methods. Later he put through the unique by its relevance investigation of geomorphic processes, worked out resumptive qualitative-quantitative conception of the single erosion-accumulative process in a river basin. Towards the end of his life he blocked out the frames of the theory of geographic cycle and geomorphologic landscape evolution. These works reflect the main paths of dynamic geomorphology and often anticipate other scholars' investigations. In the result of quantitative analysis of geomorphic processes it has become possible to develop numerical 3-d models of geomorphic landscape evolution at the interaction of endogenic and exogenic processes.