

УДК 551.4

А. Д. АРМАНД

НИВАЛЬНЫЕ КАРЫ И РЕКИ КАК САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ

В статье предпринята попытка рассмотреть некоторые нивальные и эрозионные формы рельефа с позиций системного подхода. Охарактеризованы структуры обратных связей, под действием которых происходит самоорганизация природных систем, заключающаяся в увеличении упорядоченности их строения и в снижении разнообразия (энтропии).

С проникновением в географию идей кибернетики и системного анализа появилась возможность под новым углом зрения пересмотреть наши знания о многих природных процессах. При этом обнаруживается, что ряд явлений, представлявшихся ранее совершенно различными по своей природе, подчиняется некоторым достаточно общим закономерностям. Специфический интерес представляют в этом отношении свойства самоорганизации географических систем. Под самоорганизацией понимается способность некоторой структуры определять наряду с внешними факторами направление и скорость своей эволюции. Важнейшими элементами таких структур являются контуры обратной связи (Эшби, 1959), среди которых различается несколько типов. Очевидно, исследование конкретного воплощения таких структур в природных системах должно быть первым шагом в создании объяснительных и прогнозных моделей этих систем. Ниже рассматриваются черты самоорганизации, присущие каровым и речным системам.

КАРЫ

Основными элементами нивальной системы, объединяемой в понятие «кар», можно считать характерное углубление в склоне горы, имеющее форму кресла, и залегающие в нем снежник-перелеток или фирновое поле. В глобальной системе круговорота воды кары входят звеном в наземную транспортную сеть (гидросеть) и играют наряду с ледниками роль элементов задержки стока. Функционирование каров состоит в ежегодном накоплении снежника, прислоненного к задней стенке углубления, с помощью лавин, метелей и прямого выпадения снега. В течение лета снежник или часть его стаивает, вода стекает в речную сеть. Эволюция системы определяется тем, что в теплое время года на обильно смоченном контакте снега и грунта температура многократно переходит через нуль. Повторяющиеся замерзание и оттаивание ускоряют разрушают слагающие склон горные породы.

Функционирующие кары — открытые системы. Веществом, участвующим в обмене, является вода в твердом и жидком виде. В обмене участвуют по крайней мере четыре вида энергии. Выпадающий в горах снег приносит с собой потенциальную энергию поднятой над уровнем воды. Энергия затрачивается на концентрацию снега при посредстве лавин и на вынос воды вместе с продуктами разрушения пород за пределы системы. Второй вид энергии — потенциальная энергия высо-

ко расположенных горных пород. Она тратится вместе с энергией воды на удаление твердых частиц. Далее, в теплое время года снежник и грунт неоднократно получают и отдают тепло, приносимое радиацией и адвекцией. Эта энергия расходуется на разрушение кристаллической решетки льда (снега) с последующим удалением его талой водой. Избыток энергии в форме длинноволнового излучения возвращается в атмосферу. Основную работу выполняет четвертый вид энергии — энергия кристаллизации воды: периодическое охлаждение поверхности позволяет молекулам воды вернуться к упорядоченному кристаллическому состоянию. Энергия кристаллизации частично затрачивается на дробление горных пород, если вода перед замерзанием затекла в трещину.

Кроме упомянутых выше возобновимых ресурсов вещества (воды) и энергии, система расходует невозобновимый ресурс. Подразумевается та часть объема гор, в которой кары могут развиваться, формировать свои углубления. В ходе эволюции горные породы, слагающие этот объем, перерабатываются в нивальный мелкозем и сносятся вниз. Если происходит тектоническое поднятие горного массива, то величина этого ресурса увеличивается.

Поле вещественных ресурсов, питающих систему, т. е. снега, может быть изображено на карте изолиниями, показывающими среднегодовое количество твердых осадков. Поле энергетических ресурсов мы получим как суперпозицию (наложение) трех полей: тех же твердых осадков, высотного поля рельефа гор и поля приходной части теплового баланса.

Поверхность, с которой система собирает снег, следует считать ее ресурсной нишей. Она складывается из площади, занятой самим каром, из лавиносборов, отдающих ему свой снег, и площади, с которой снег сносится в него метелями.

Функционирование каров определяется не только наличием ресурсов, но и действием различных видов «шума», разрушающего структуру системы. В нашем случае такими шумами можно считать колебания ресурсных потоков: тепла, снега, доступной потенциальной энергии (крутизны склона). Изменение розы ветров может сказаться на метелевом приносе снега, изменение формы снегосборов — на активности лавин. Для системы может быть неблагоприятным как увеличение, так и уменьшение снега, тепла, перепада высот. При избытке тепла время летней «работы» снежника сокращается, в пределе — до нуля, при избытке снега из-за того, что он в течение теплой части года покрывает всю поверхность гор, не освобождая места для «морозного забоя». Избыток крутизны склона препятствует скоплению достаточных для нивации масс снега. Шум создается изменениями этих факторов во времени с разными скоростями. В пространстве их влияние описывается в форме полей шумов. Суперпозицией полей ресурсов и шумов, складывающихся с разными знаками, определяется ресурсное пространство, в котором может функционировать система. Для каров оно ограничивается склонами гор в узком диапазоне высот, близких к снеговой границе.

Окружающая систему внешняя среда служит источником разнообразных воздействий, определяющих форму, размеры, положение, ориентировку, функционирование и ход эволюции каров. Эти воздействия могут рассматриваться как внешняя информация, поступающая на вход системы. Система впадина — снежник не относится к структурам, достаточно высоко организованным, чтобы использовать эту информацию для получения дополнительных ресурсов или нейтрализации шума. Здесь имеет место пассивная реакция на информацию. Поля ресурсов и шумов определяют положение зоны развития каров на склонах гор, первичный эрозионный и тектонический рельеф уточняет положение и ориентировку отдельных впадин, от геологии зависит скорость нивального процесса и т. д.

Самоорганизация каров как систем заключается в том, что существует механизм, в некоторых пределах регулирующий поступление ресурсов и нейтрализующий шумы. Механизм этот заключен в структуре взаимодействия снежника со своим ложем. Заключается он в том, что под действием снежника углубляется нивальная впадина, а это в свою очередь увеличивает возможности накопления снега. Взаимное влияние формирует кольцо положительной обратной связи. Процесс развивается по схеме самовозбуждения. Через некоторое время в рельефе кара стираются следы первоначальной формы, влияние трещиноватости горных пород и других геологических факторов также снижается. От различных исходных состояний эволюция ведет каровую впадину в направлении к некоторой «типовой» форме, черты которой позволяют легко выделить нивальные образования среди разнообразия горного рельефа. Снижается и чувствительность системы к колебаниям тепла и осадков (шуму). Развитые кары накапливают достаточно снега, чтобы обеспечить длительный «рабочий период» в летнее время, даже если в течение ряда лет снега выпадает меньше или он тает интенсивнее, чем обычно. С подъемом снеговой линии в горах нередко можно наблюдать «лестницы каров», где каждая «ступенька» соответствует одному из прежних стабильных положений границы вечных снегов. Те впадины, которые не соответствуют современной снеговой обстановке, в наше время не могли бы возникнуть заново, но механизм самоусиления зачастую позволяет им продолжать развиваться в не свойственной им обстановке (повышенного шума).

Развитие систем под действием положительной обратной связи ($\pm$) может привести к стабилизации процесса только в том случае, если положительная обратная связь на каком-то этапе сменяется отрицательной обратной связью ($\pm$), или если достигается полное использование потока возобновимого ресурса. Это обычный исход развития большинства природных систем, когда в ходе развития не происходит качественных изменений. Эволюция каров относится к более редкому случаю неограниченного развития, приводящего к самоуничтожению системы. Разрушение системы происходит в результате полного расходования невозобновимого ресурса — срезания нивальным процессом всего объема гор, расположенного выше минимальной высоты, на которой может происходить нивация. Для зрелых этапов процесса характерен рельеф открытых (сквозных) долин, которые образуются после смыкания каров, растущих на противоположных склонах хребтов навстречу друг другу. Позднее он сменяется рельефом карлингов — остроконечных нивальных останцов. Если горы тектонически стабильны достаточно долгое время и изменения климата невелики, то этот процесс заканчивается формированием нивальных поверхностей выравнивания. Фаза стабильности нехарактерна для каров, пока они продолжают нормально функционировать.

На территории, отвечающей условиям ресурсного пространства, кары, как правило, многочисленны. Однако пока кары не соприкоснутся своими стенками, они, по-видимому, оказывают довольно слабое влияние друг на друга. Следовательно, черты организации их в систему более высокого порядка, в систему каров, должны проследиваться в ограниченной степени. Взаимовлияние каров может иметь характер конкуренции за ресурс. Проявление конкуренции имеет место, если растущая нивальная впадина перераспределяет площадь лавиносборов и направление метелевых потоков «в свою пользу». На «питании» и росте систем сказывается непосредственный контакт, разрушение промежуточных стенок. Может произойти слияние нивальных впадин в одну большую, поглощение малого кара более развитым или образование перекидной долины. Во всех этих случаях происходит перераспределение снега, поступающего с лавинами, и в особенности изменение дина-

мики ветров, а с ними — метелей. Влияние это, однако, неоднозначно зависит, например, от ориентировки каров в их старой и новой конфигурации по отношению к розе ветров. Однако в площадном размещении каров едва ли можно ожидать проявления отчетливых закономерностей, связанных с самоорганизацией системы более высокого порядка, таких, как принцип плотнейшей упаковки или черты иерархичности.

РЕКИ КАК СИСТЕМЫ

Как и снежники с ледниками, реки выполняют функцию транспорта воды по суше в общеземном круговороте влаги. Функционирование рек заключается в непрерывном или периодическом движении воды вниз по долине. При этом происходит необратимый процесс, определяющий эволюцию системы: размыв ложа и вынос частиц породы вниз по течению.

Таким образом, вода и частицы породы — два основных вещества, при посредстве которых открытая система осуществляет обмен с окружающей средой. Источниками энергии, приводящими в движение этот механизм, служат потенциальная энергия воды, запасенная при подъеме пара в атмосфере, и потенциальная энергия массы горных пород, расположенной выше базиса эрозии. Соответственно поля вещественных ресурсов для наших систем изображаются изолиниями модулей стока и изогипсами. Энергетическое ресурсное поле складывается из двух величин. Интенсивность потока энергии, поступающей с водой на единицу площади суши, мы получим путем умножения модуля стока на абсолютную высоту поверхности. Запас энергии, заключенный в литосфере, можно найти как сумму потенциальной энергии массы горных пород, слагающих земную кору под водосборным бассейном от поверхности до уровня моря. Потенциал энергетического поля лимитирует скорость, с которой система перестраивает свою структуру в ходе развития. Масса и объем поднятой над уровнем моря суши вместе с потенциальной энергией горных пород относится к невозобновимым ресурсам.

Различные воздействия, нарушающие однообразное функционирование и последовательную эволюцию систем, мы рассматриваем как различные шумы. На речные системы воздействуют периодические, квазипериодические и уникальные события. К первым можно отнести ежегодные ледостав и сезонное изменение расходов. Паводки, связанные с ливнями, мы отнесем ко второй группе. Примерами уникальных воздействий могут быть подпруживание части течения в результате обвала, оползня или постройки плотины, мелиорация, распашка почвы и вырубка лесов в бассейне и т. п. Виды шумов могут различаться по форме сигнала. Импульсные воздействия кратковременны, после прекращения они дают возможность самоорганизующейся системе вернуться в состояние, близкое к прежнему. Таковы трансформации русла в результате катастрофического паводка или в ходе мелиорации. Ступенчатые воздействия также однократны, но в отличие от предыдущих нагрузка после совершения события не снимается. Система вынуждена приспособливаться к новым условиям. К этой группе шумов надо отнести плотины, отвод воды в каналы, постоянное снегозадержание на полях в пределах водосбора и др. Нарастающие воздействия с течением времени усиливают нагрузку на систему. Это однонаправленные тектонические движения, захватывающие часть бассейна или весь бассейн целиком. Сюда же можно отнести уменьшение грунтового стока воды, если он оттягивается углубляющимся карьером, или увеличение количества шлама, сбрасываемого в реку при горных работах.

Периодические шумы различаются в широком диапазоне по частоте. Для рек с ледниковым питанием характерны суточные ритмы расходов. Реки умеренных, субполярных и арктических климатических областей испытывают влияние сезонных ритмов. На деятельности речных систем

отражаются климатические и эпейрогенические колебания с периодичностью от десятилетий до сотен тысяч лет а, вероятно, и больше.

При таком разнообразии шумов изобразить их на карте в виде полей шумов непросто. Длиннопериодические и долговременные воздействия, однако, могут исследоваться по результатам их влияния на сами речные системы. Так, при составлении карт новейших тектонических движений используются результаты морфологического анализа долин и склонов в соответствии с теориями В. М. Дэвиса (1962) и В. Пенка (1961), а также данные о строении террас, аллювиальных фаций, составе пыльцы и т. п. Антропогенные поля шумов в большой степени будут совпадать с полями плотности населения, с развитием сельского хозяйства и промышленности. Карты климатогенных шумов должны характеризовать суточную, сезонную и многолетнюю неравномерность стока, повторяемость ливневых паводков и т. д.

Внешние воздействия нарушают или изменяют сложившуюся в ходе эволюции структуру (внутреннюю информацию) речных систем, но, как правило, не влияют на сам факт их существования. Поэтому область существования рек, ресурсное пространство ограничивается в данном случае не наличием шумов, а наличием ресурсов, т. е. существованием поверхностного стока достаточной величины.

Внешняя среда речных систем является источником не только шума, но и внешней информации, оказывающей влияние на поток и русло, а также на морфологию всей речной системы в целом. Различие между этими двумя видами воздействий в большой степени условно, особенно в тех случаях, когда шум не ведет к прямому уничтожению системы. Разграничение зависит от того, что принять за нормальную структуру, эволюцию, нормальное функционирование. К внешней информации, на которую так или иначе реагируют реки, мы относим такие постоянные или длительно действующие факторы, как общий уклон поверхности, тектонический план строения территории, литологию пород, ускорение Кориолиса. Внешняя информация определяет, какую конкретную форму примут структуры, развившиеся под влиянием самоорганизации системы.

Первой закономерностью, связанной с самоорганизацией речных систем, является древовидный рисунок их строения в плане. Он настолько привычен, что уже не бросается в глаза и кажется естественным, не требующим объяснения. Эту закономерность можно сформулировать несколько иначе: вероятность бифуркации рек по сравнению с вероятностью их слияния очень мала. Только в дельтах и на конусах выноса наблюдается обратная картина. Здесь потоки больше расходятся, чем сливаются. В остальных же случаях такие примеры, как общее верховье Ориноко и Касикьяре, — большая редкость.

Нежизнеспособность «развилки» на водотоках обусловлена тем, что между двумя руслами, образовавшимися из одного, автоматически возникают отношения типа $(-)$, конкуренция за ресурс (рис. 1, а). Такая система не имеет устойчивых состояний, она эволюционирует в сторону самоуничтожения путем ликвидации одного из конкурентов — протоков или ослабления связи между ними. Второй путь в рассматриваемом случае неосуществим. Остается только первый — «обезвоживание» одного из дочерних русел. Физический смысл «борьбы» нетрудно понять. Всегда имеется причина, из-за которой в одно из русел поступает воды хотя бы на немного больше, чем в другое. Это небольшое преимущество реализуется в более интенсивной глубинной эрозии первого потока. Увеличение глубины в свою очередь усиливает неравномерность стока. Процесс лавинообразно нарастает, пока весь объем стока не будет принадлежать руслу — «победителю».

Противоположная картина наблюдается при слиянии двух потоков. Здесь возникает положительная обратная связь, усиливающая возник-

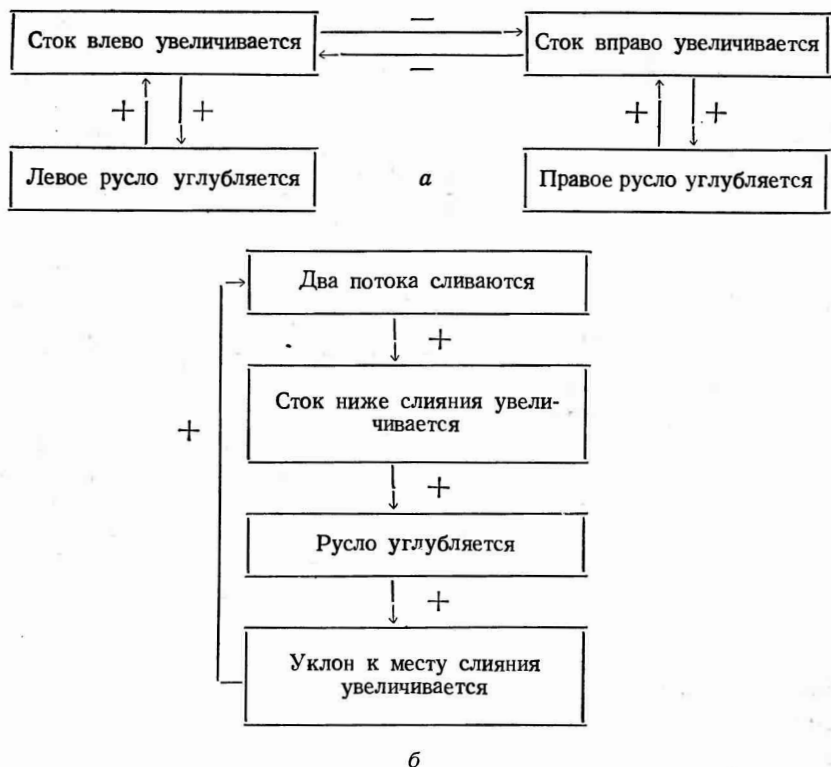


Рис. 1. Схема обратных связей в системах «бифуркация рек» (а) и «слияние рек» (б)

шее взаимодействие (рис. 1, б). Существо этого взаимодействия заключается в увеличении эрозионной способности потока ниже места слияния по сравнению с вышележащими отрезками. Дополнительное углубление как бы «притягивает» притоки друг к другу.

Оба рассмотренных механизма возникают естественным путем лишь в том случае, если продолжается достаточно интенсивная глубинная эрозия русла, т. е. на стадии зрелости и особенно юности по В. М. Дэвису. Именно поэтому появление осередков, образование протоков — признаки «дряхления» долины, т. е. приближения реки к профилю равновесия. По этой же причине (из-за отсутствия глубинной эрозии) не возникают обратные связи, изображенные на рис. 1, в дельтах и конусах выноса. В первом случае углубление русла невозможно из-за подпора конечного бассейна, во втором — из-за перегрузки потока влекомыми наносами. Механизм обратной связи действует как переключатель, или триггер, при бифуркации рек и как «защелка», препятствующая обратному растеканию соединившихся струй при слиянии.

Многokrатное действие «защелки» соединяет отрезки водотоков в систему, имеющую иерархическое строение. Притоки 1-го, 2-го и т. д. порядка образуют 1-й, 2-й и т. д. уровни иерархии. Формирование уровней происходит по принципу аккумуляции ресурсов (вещества, энергии). Водоток каждого следующего уровня отличается от предыдущих тем, что его расход воды равен сумме расходов притоков. В остальном они подобны друг другу. Если привлекать аналогию из другой области, то можно сравнить реки с накоплением оперативной информации о ходе сельскохозяйственных работ на разных ступенях административной лестницы. Принцип аккумуляции ресурсов в иерархии рек находит отражение в принципе пространственного включения. Здесь иерархия про-

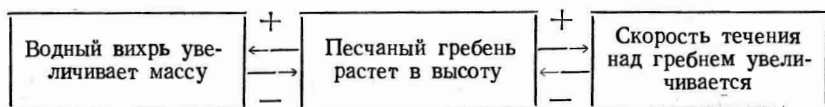


Рис. 2. Схема обратных связей в системе «песчаная гряда — водный вихрь»

является в том, что водосборный бассейн реки каждого более высокого порядка вмещает в себя все водосборы рек всех более низких порядков.

В структуре речных систем можно обнаружить еще одну иерархию, существующую независимо от первой и построенную несколько иначе. Здесь системы разных уровней не подобны друг другу. Они построены различным образом и различаются по своим функциям в системе. Каждый предыдущий уровень служит «собирателем», концентрирующим вещество и энергию для системы следующего уровня. Таких уровней в каждой речной системе по крайней мере три. Нижним из них будем считать русловые формы, такие, как косы, волны песчаной ряби. Как системы эти образования содержат два взаимодействующих элемента: песчаный (галечный, илистый) гребень и образующийся за ним водный вихрь. Следующий ярус займет система, элементами которой служат весь поток в целом и вмещающее его русло. Наконец, в качестве надсистемы, включающей предыдущую систему как свою составную часть, можно считать весь водосборный бассейн: русло, долину и водосборную площадь. Элементами этой системы будут, с одной стороны, воды, участвующие в плоскостном, русловом и грунтовым стоке, и с другой — участок поверхности литосферы, т. е. рельеф и горные породы водосбора. Здесь, так же как и в иерархии притоков, между уровнями существует отношение передачи ресурсов, но в качестве системообразующего мы принимаем принцип взаимного функционального дополнения собственно системы и ее ресурсной ниши. Здесь аналогия может быть найдена в отношениях взаимного дополнения между предприятиями горнодобывающей промышленности и заводом, обрабатывающим поставляемое ими сырье.

Так же как и иерархия притоков, многоуровневая дополнительная система находит свое адекватное отражение в пространственном включении низших уровней в более высокие. Характерно, однако, что движение вещества и энергии тут происходит в обратном направлении: от верхнего яруса «лестницы» к нижнему. Особенности самоорганизации систем разного уровня рассмотрим последовательно, начиная с самых низших.

Формы ряби возникают на песчаном, илистом и иногда галечниковом дне рек. Они имеют характерный асимметричный профиль с пологим склоном, направленным вверх по течению, и крутым — вниз. Размеры их весьма непостоянны. В зависимости от скорости течения, глубины русла и размеров слагающего их материала они могут иметь высоту от *мм* до первых *м*, ширину — от *см* до десятков *м*. Наиболее крупные из них достигают в длину сотен *м*. Эти формы относят уже не к ряби, их называют грядами, косами, или коргами, но природа их возникновения в основном одна и та же. Песчаный (галечный, илистый) гребень и образующийся за ним водный вихрь взаимодействуют между собой по схеме (рис. 2) обратной связи переменного знака ($\pm\pm$).

В начальную фазу роста действует схема самовозбуждения. Форма дна и вихрь взаимно усиливают друг друга, гряда растет в высоту, ширину и длину. Отрицательная обратная связь ($\pm$) начинает сказываться после того, как ускорившееся над грядой поступательное течение усиливает размыв гребня и таким образом замедляет его рост. В дальнейшем формы ряби не увеличиваются в размере, если не меняются усло-

вия их существования. При этом они смещаются вниз по течению, участвуя в транспорте наносов рекой.

Самоорганизация русловых форм имеет несколько различных проявлений. а) Рост гряд происходит против направления силы тяжести, при этом накапливается потенциальная энергия поднятых над поверхностью дна частиц. б) Рельеф дна принимает упорядоченный характер: регулярное чередование гряд и понижений. в) В некотором диапазоне значений скоростей течения, уклонов, размеров частиц гряды и ложбины сохраняют свою характерную форму и ориентировку—поперек течения. г) При разрушении одной или нескольких гряд в серии они восстанавливаются на прежнем месте и примерно в той же форме. д) Система обладает способностью к размножению в его примитивной форме (Арманд, 1975). Информация о возникшей в какой-то части дна гряде передается вниз по течению, и действием энергии потока создается гряда, подобная первой, из еще не «организованного» материала. Каналом связи служит поле скоростей потока, в котором возникают регулярные пульсации. Для зарождения гряд существенное значение имеет «затравка», как для роста кристалла; ее роль может выполнить любая неровность. Под влиянием обратной связи она вырастает и преобразуется в «стандартную» форму. е) В результате «самозарождения» и «размножения» гряд происходит заполнение ими всей площади дна с подходящими скоростями течения и размером частиц—всего ресурсного пространства. Комплекс расположенных параллельно элементарных гряд, внешне напоминающий стиральную доску, представляет собой систему более высокого порядка. Эта система осуществляет внутреннюю связь между соседними грядами и может рассматриваться как слабая система, состоящая из однотипных элементов. ж) В простейшей форме между соседними грядами существуют отношения конкуренции за ресурс (пространство и «строительный материал»). Конкуренция проявляется в том, что в период роста гряд менее развитые из них поглощаются более развитыми. Вихрь более крупной гряды размывает грядку, следующую вниз по течению.

Все перечисленные проявления самоорганизации в развитии русловых форм, кроме последней, показывают, что при этом происходит увеличение пространственной организованности вещества и аккумуляция энергии. Это соответствует понижению термодинамической и информационной энтропии, что является отличительным признаком самоорганизации. Конкуренция, или межсистемный шум, в наибольшей степени проявляется во взаимоотношениях высокоразвитых систем, здесь же присутствует в зачаточной форме.

Следующий уровень иерархии составляет система, объединяющая поток и русло в целом. Характерными проявлениями этой системы являются выработка закономерно вогнутого продольного профиля и образование меандров.

Продольные профили рек в начальные фазы их развития отличаются неправильным чередованием больших и малых уклонов. Профили различных рек мало похожи один на другой. В этот период продольное падение русла на отдельных участках больше всего зависит от первоначального рельефа территории, обусловленного тектоникой, от чередования и условий залегания горных пород с разной устойчивостью к размыву. В дальнейшем уклоны выравниваются и закономерно располагаются по длине реки, в целом—от более крутых в верховьях к более пологим в нижнем течении. От различных исходных форм профили эволюционируют к некоторому стандарту, аналогичному для всех зрелых речных систем. Причину такого развития следует искать, как и в других случаях, в наличии структур обратной связи, определяющей самоорганизацию системы. Обратной зависимостью связаны каждые три участка русла: нижний, средний и верхний. Верхний и нижний участки

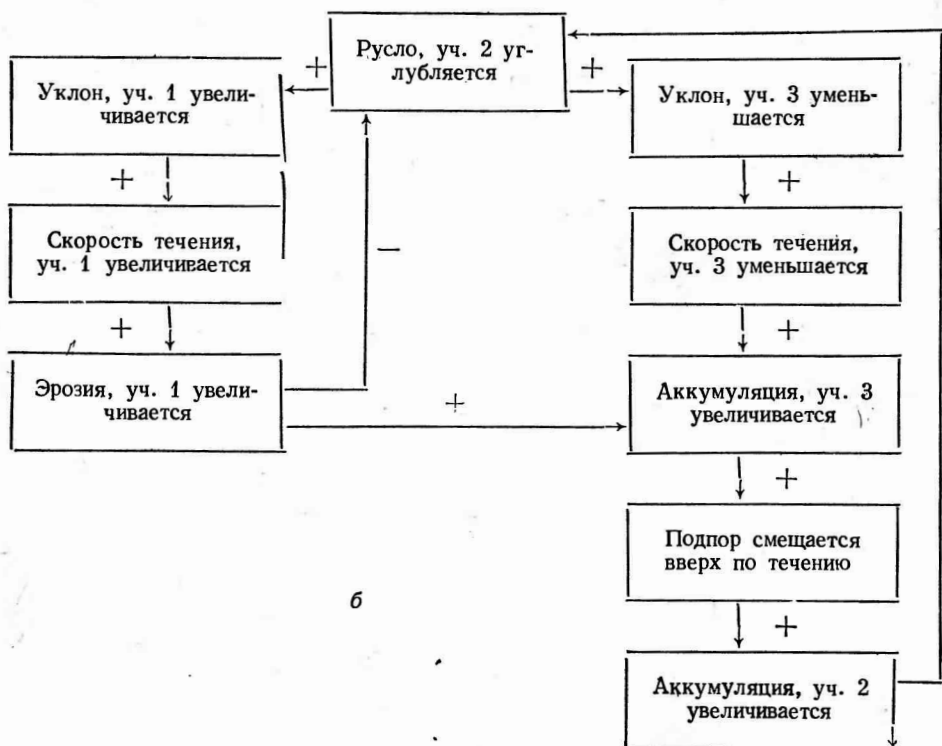
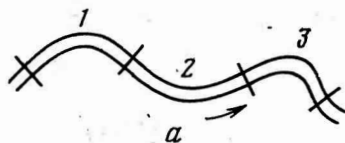
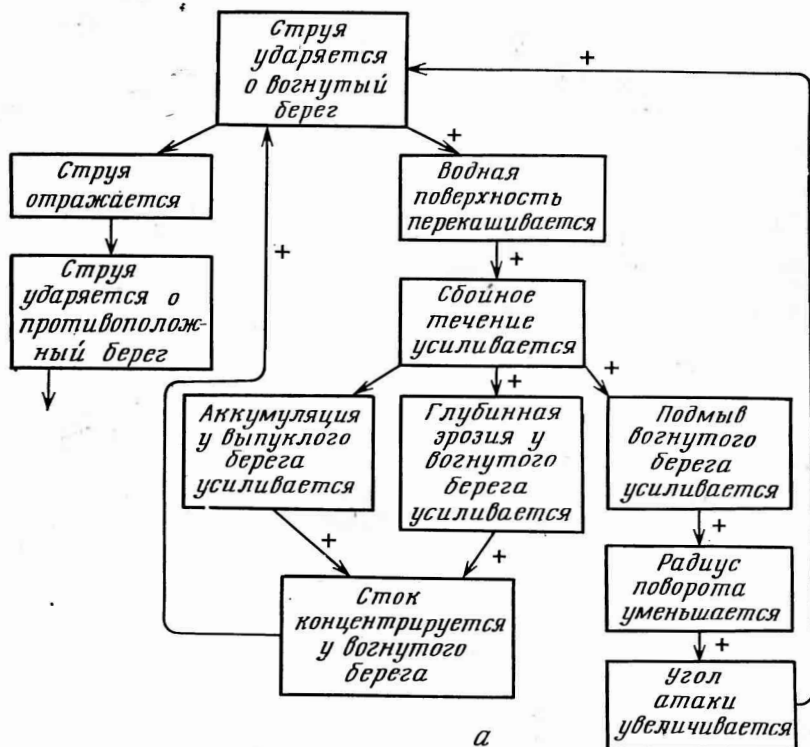
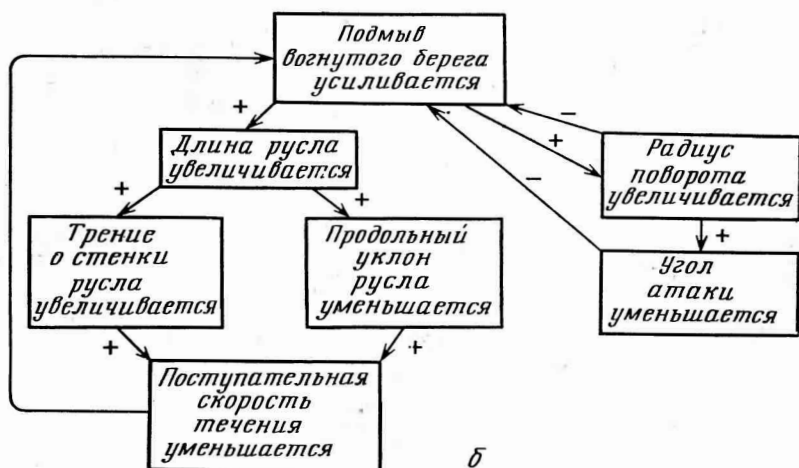


Рис. 3. Схема расположения участков речного русла (а) и связей между ними (б).
1, 2, 3 — последовательные участки русла

отзываются на каждое изменение состояния среднего участка. Можно говорить о передаче информации по водотоку вверх и вниз. Информация, передающаяся по течению, кодируется в форме большего или меньшего насыщения потока взвешенными и влекомыми наносами. Против течения информация передается путем изменения уклона и последующей попятной эрозии или аккумуляции. Механизм отрицательной обратной связи ($\pm$) раскрывается на схеме (рис. 3). Врезание русла на среднем участке способствует эрозии в вышележащей части течения и аккумуляции — в нижележащей. Повышение дна среднего участка русла вызывает противоположную реакцию «соседей». В результате такого взаимодействия участков уклоны русла по всей длине течения стремятся выровняться. Но они контролируются также несущей силой потока и размерами переносимых частиц аллювия. Как правило, оба фактора действуют в направлении снижения уклонов вниз по течению, откуда и возникает вогнутый профиль. Самоорганизация системы в разобранном примере состоит в стандартизации уклонов на однородных участках течения и в стабилизации состояний русла во времени, что выражается в восстановлении уклонов после воздействия шумов разной природы. В терминах математического анализа это описывается как асимптотически устойчивое равновесное состояние. В связи с наличием задержки в передаче воздействий вверх и вниз по течению движение к равновесию может происходить в форме затухающих колебаний.



а



б

Рис. 4. Схема связей в системе «поток — русло» в начальную (а) и конечную (б) фазы развития меандр

Самопроизвольные периодические повышения и понижения продольного профиля удается иногда наблюдать в действительности.

Закономерные изгибы реки в плане — меандры — развиваются в той фазе эволюции рек, которую В. М. Дэвис назвал зрелостью. Меандрирование внешне выражается в более или менее регулярном отклонении русла от направления общего уклона поверхности то вправо, то влево. Излучины для рек одного порядка величины (по значениям расходов) и при одинаковых уклонах имеют примерно одинаковый радиус и расстояние между последующими изгибами (шаг). Общая схема меандр-

рирования имеет множество модификаций. Нет двух рек, излучины которых не различались бы радиусом изгиба, шагом, длиной прямолинейного промежутка между соседними искривлениями, распределением меандров по длине водотока, деталями конфигурации и рельефом дна. Экспериментальные исследования и натурные наблюдения показывают (Маккавеев, 1955), что на формирование извилистости рек влияет большое количество факторов: уклоны дна и водной поверхности, расходы во время предельного заполнения русла водами паводка и расходы в межень, высота паводков относительно уровня поймы, литология размываемого дна долины, впадение притоков и т. п. Несмотря на все это, сам феномен меандрирования настолько специфичен и универсален, если не считать горных рек, что не возникает сомнений в единой природе этих образований. Более того, механизм, управляющий формированием сходных в своей основе форм из самых различных первоначальных конфигураций русла, не может быть не чем иным, как структурой, основанной на принципе обратной связи. Уверенность эта основана, в частности, на аналогии с процессами самоорганизации других географических систем.

Удовлетворительной теории образования излучин пока не создано. Очевидно, однако, что основными элементами системы, на которых формируется структура обратной связи, являются водный поток и способные размываться (растворяться, растапливаться) породы, слагающие ложе потока. Одной из гипотез, упрощенно представляющих характер их взаимодействия, может быть схема, представленная на рис. 4, а, б. Здесь предполагается, что система излучин развивается под действием положительных обратных связей, усиливающих случайно возникшие отклонения от прямолинейного течения. На определенном этапе развития извилин, когда радиус их уменьшается до некоторой критической величины, автоматически включаются контуры отрицательных обратных связей (рис. 4, б), приводящих к стабилизации процесса. Рост меандров прекращается, что, впрочем, не препятствует их сползанию вниз по течению, а в некоторых случаях — прорыву шеек, спрямлению излучин и повторению всего процесса.

Как и в случае с русловыми формами, самоорганизация системы поток — русло приводит к возникновению упорядоченности (плановых очертаний реки), или, в терминах теории информации, к снижению энтропии.

Верхний уровень иерархии рассматриваемых систем принадлежит речному бассейну. Взаимодействие рельефа и стока состоит в том, что поверхность выполаживается под действием экзогенных факторов, а это в свою очередь снижает энергию текущих вод. Система действует по схеме отрицательной обратной связи (рис. 5). Соответственно развитие совершается с затуханием интенсивности процесса. Теоретическим пределом эволюции может считаться территория бассейна с такими малыми уклонами, при которых



Рис. 5. Схема обратной связи в системе «речной бассейн — сток»

скорости стока недостаточно для отрыва и переноса частиц грунта. При этом продольные уклоны русел стока также достигнут минимальных величин, продольный профиль станет профилем равновесия. Энергетические ресурсы системы окажутся исчерпанными, развитие прекратится. Достигается асимптотически устойчивое равновесное состояние.

Здесь можно дополнить представление об иерархии речных систем. К двум принципам расчленения речных систем на «этажи» — принципу функционального дополнения и принципу пространственного включения добавляется третий — принцип иерархии характерных времен.

Наименьшие характерные времена имеют русловые формы. Мелкие песчаные волны ряби восстанавливают нарушенную форму или приспособляются к изменившимся условиям течения за несколько минут. Более крупные русловые формы за несколько дней паводка могут заметно изменить конфигурацию реки, однако восстановление развитой системы меандров, например, после спрямления русла, требует ряда лет. Срок такого же порядка нужен системе для выработки нового продольного профиля (после возведения плотины). Наконец, пенепленизация горной страны растягивается на период в 10—100 млн. лет.

Результатом временной иерархии является то, что в развитии систем разного уровня также наблюдается «вложенность» — в хронологическом смысле этого слова. Самые «быстрые» подсистемы — русловые — первыми заканчивают переходный процесс и достигают стабилизации. Их саморазвитие на этом заканчивается, но продолжается вынужденное развитие. Они непрерывно изменяют форму, размеры, состав материала, следуя за развитием систем следующего яруса. Когда оно также завершится выработкой вогнутого профиля и развитой системы меандров — все системы начинают вынужденно следовать за саморазвитием бассейна. И только после стабилизации верхнего, самого «медленного» уровня система теоретически может достигнуть общего равновесного состояния. Отсюда понятна логическая необходимость различать идеальный «профиль равновесия», «предельный профиль», «эрозионную терминанту» рек, соответствующую общему равновесию системы, и «выровненный профиль», «нормальный профиль» (Марков, 1948; Болиг, 1956; Пенк, 1961). Последний наблюдается на стадии «зрелости», когда закончилось саморазвитие среднего, но еще не верхнего звена.

Идеальная схема саморазвития системы, как известно, в реальной действительности всегда нарушается различными видами шумов. В соответствии со своим характерным временем системы каждого уровня «выбирают» из всего спектра шумов те, на которые они способны реагировать как самоорганизующиеся системы, выбирают свою «полосу частот». В этой полосе автоматически выделяются импульсные шумы, чья длительность и периодичность меньше характерного времени систем, и ступенчатые, или нарастающие — долгодействующие. Для русловых форм импульсными шумами могут быть короткопериодические — суточные, например, паводки; долгодействующие — изменение положения стрежня в русле и т. п. На такие воздействия продольный профиль или рисунок меандров не успевают прореагировать. Они изменяются в свою очередь в ответ на климатические или эпейрогенические колебания с частотой один раз в десять, сто, тысячу лет. Устойчивые тектонические опускания и поднятия, орогенические циклы относятся к шумам верхнего яруса систем. Для более «быстрых» подсистем фон медленно го поднятия, например, может считаться неизменным.

Проведенный анализ развития нивальной и эрозионно-аккумулятивной географических систем не добавил каких-либо новых фактов к их познанию. Статья преследовала иную цель: показать, как явления физической географии могут рассматриваться с позиций системного подхода. Характерной особенностью системного анализа является абстрагирование от конкретного проявления процессов. На первый план выступают схемы взаимодействия элементов системы и результаты этого взаимодействия. Основным результатом является преобразование или, наоборот, активное сохранение существующей структуры во времени. Таким образом, системный подход отвечает главным образом на вопросы: в каком направлении эволюционирует система, как она реаги-

рует на отклонения от нормального режима функционирования. При этом для анализа привлекаются такие общие понятия, как обратная связь, информация, устойчивость, самоорганизация. Объяснение чисто географических явлений основывается на закономерностях и принципах, разработанных кибернетикой и математикой. В результате обнаруживается, что физико-географические системы имеют много общего с биологическими, техническими и даже социальными системами. Выигрыш, получаемый при установлении таких параллелей, несомненен. Чем к более общим законам сводится объяснение конкретного явления, тем, очевидно, глубже понимание сути происходящего, тем более широкий круг явлений удается объяснить, тем больше прогнозная сила таких объяснений.

Нет сомнения, однако, что одностороннее изучение одних схем взаимодействий без их вещественно-энергетической основы, так же как и использование только физического подхода в чистом виде, непродуктивно. Удовлетворительной полноты знания о географическом явлении можно достичь только в том случае, если удастся создать модель, синтезирующую в себе физические и информационные представления об объекте.

ЛИТЕРАТУРА

- Арманд А. Д. Информационные модели природных комплексов. М., «Наука», 1975.
Боллиг А. Очерки по геоморфологии. Пер. с фр. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
Дэвис В. М. Геоморфологические очерки. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., Изд-во АН СССР, 1955.
Марков К. К. Основные проблемы геоморфологии. М., Географиз, 1948.
Пенк В. Морфологический анализ. Пер. с нем. М., Гос. изд-во геогр. лит., 1961.
Эшби У. Р. Введение в кибернетику. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.

Институт географии АН СССР

Поступила в редакцию
7.V.1979

NIVATION CIRQUES AND RIVERS AS SELF-ORGANIZING SYSTEMS

A. D. ARMAND

Summary

The author uses the system approach to analyse some nivation and erosional land-forms. Structures of the feedbacks are described which control the self-organization of natural systems (i. e. increase in regularity and decrease in variability — entropy). In the case of the nivation cirques the self-organization means evolution from various initial hollows towards regular chair-like notches and further on — towards a nivation plateau. The self-organization of a fluvial system manifests itself in development of concave channel profile and regular meanders' pattern; some channel forms (ridges) also develop; the relief of the drainage basin decreases. Positive feedback within a system results in more resistance to external noises. That is caused by negative feedbacks strengthening.

Three principles are discussed co-existing in fluvial systems hierarchy, that are functional, territorial and temporal, each of them having its own feedback system and spectrum of noises.