

УДК 528.94

Черванев И.Г.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ РОЛЬ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА

Введение. Харьковская геоморфологическая школа является одной из первых в Украине. Ее истоки заложены еще в конце XIX века геологами Леваковским, Гуровым и Борисяком, хотя систематическое изучение рельефа связано с именами Д.Н.Соболева и Н.И.Дмитриева, которые вошли в историю Харьковского университета первой половины XX века в качестве фундаторов региональной геоморфологии.

Многочисленные ученики этих выдающихся исследователей, в их числе Л.И.Карякин, П.В.Ковалев, Д.П.Назаренко, С.И.Проходский, И.Н.Ремизов, П.Г.Цысь исчерпывающе детально исследовали структуру рельефа и историко-генетические аспекты рельефообразования, впервые описав полный комплекс террас Днепра и равнинных рек северо-восточной Украины (из них только П.Г.Цысь работал в западных областях Украины), а также связь рельефа с общими чертами тектонической структуры и геологической палеогеоморфологией края.

Нельзя не отметить, что представителям этой классической школы принадлежит два обобщения относительно рельефа всей территории Украины [^{1,2}], которые до сих пор служат основой обучения географов, геологов и используются для профессиональной подготовки геоморфологов.

В 60-е годы возникло новое направление геоморфологического изучения рельефа Украины в форме структурно-геоморфологического анализа. Его основоположником был С.И.Проходский, впервые придавший исследованиям такого рода целенаправленность – для целей прогнозирования структурных ловушек углеводородов по морфометрическим особенностям рельефа, и систематичность.

В рамках структурно-геоморфологического анализа обособился структурный анализ рельефа, основанный на исследовании каркаса инвариантных линий, а несколько позднее начало развиваться учение о самоорганизации рельефа [³].

Последним крупным событием этого направления геоморфологических исследований стало проведение XXVIII пленума Геоморфологической комиссии РАН, которая подвела итоги развитию учения о самоорганизации и саморегулировании геоморфосистем, где Харьковская геоморфологическая школа была представлена тремя ключевыми докладами [⁴], что показало значимость таких исследований в масштабах по крайней мере СНГ.

¹ Дмитриев М.І. Рельєф УСРР. – Харків, 1936.

² Цись П.М. Геоморфологія УРСР. Львів, 1962.

³ Черванев И.Г. Самоорганизация рельефа: структура, функции, саморегулирование рельефа флювиального типа // Геоморфология, 1988, № 3.

⁴ Самоорганизация и саморегулирование рельефа. Томск: Томский филиал СО РАН. 2003.

Концептуальная основа. Все исследования, проводимые в Харьковском университете по изучению геоморфологических систем на протяжении последней четверти века, имеют общую концептуальную основу (см. [4]). Она состоит в признании:

- геоморфосистемной организации окружающего нас земного мира;
- понимании самоорганизации как фундаментального свойства геоморфосистем, проявляющегося спонтанно;
- наличие проявлений вне времени и пространства геоморфосистем сохранять, поддерживать и совершенствовать (направленно изменять) свои структуру, характер связей и отношений (гомеостазис, функционирование) вне зависимости от внешних воздействий, в том числе вопреки человеческой воле;
- самоорганизация - явление качественно более высокого ранга, чем саморегуляция.
- в процессе саморегуляции поддерживается то отношение, что как бы задано изначально;
- самоорганизация состоит в возникновении новых структурных элементов, новых связей и отношений - т.е. сводится к необратимому выходу системы за первоначальные рамки.
- смысл овладения механизмами системной организации мира геоморфологических систем имеет определенное значение в аспекте проблемы устойчивого развития, обеспечения геодинамической стабильности регионов активного преобразования рельефа;

Общая посылка к постановке геоморфосистемных исследований состоит в следующем утверждении:

природные и инспирированные техногенезом катастрофы и чрезвычайные ситуации достаточно часто являются закономерными особенностями спонтанного поведения геоморфосистем, которые только нами воспринимаются как "стихия", т.к. не исследованы «механизмы» саморегуляции этих процессов. В определенной мере они являются закономерными реакциями на человеческие вторжения в такие системы и процессы. Овладевая предметом этого анализа, мы тем самым приобретаем возможность направленного управляющего воздействия на те процессы и состояния, которые с точки зрения человеческих интересов являются неблагоприятными, угрожающими или катастрофическими, или же, наоборот, заслуживают усиления, но «с точки зрения природы» - это более естественные проявления жизни, чем мертвый покой.

В регионах высокой урбанизированности, интенсивного сельского хозяйства и иной активной деятельности, какой является и Украина, такого рода проблемы приобретают особенно большое значение. Ниже мы ограничимся, по понятным причинам, фрагментарным изложением проблемы в трех различных направлениях.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ РОЛЬ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА

Основные результаты исследований динамического равновесия и самоорганизации. После выхода монографии, посвященной самоорганизации рельефа [1], в работах Харьковской геоморфологической школы эффективно развивались 4 научных направления. *Н.В. Куценко* продолжал развивать теорию динамического равновесия флювиального рельефа и его использования для целей рекультивации. По его представлениям, фундаментальной основой геоморфологии является концепция динамического равновесия в рельефообразовании. Ее основные позиции: а) геоморфологические системы стремятся приобрести максимальную устойчивость, которая выражается в определенном виде равновесия; б) процессу рельефообразования внутренне присущ механизм саморегулирования морфометрических параметров, направленный на достижение равновесия; в) в результате действия этого механизма между морфометрическими характеристиками элементов рельефа, связанных единым литодинамическим потоком, устанавливаются определенные устойчивые соотношения, которые являются внешним выражением системообразующих отношений процесса рельефообразования [2].

Важным практическим выходом этой концепции являются разработки указанного автора по рекультивации земель, которую можно осуществлять эффективно только на прочном фундаменте формирования устойчивого рельефа. Устойчивое функционирование геоморфосистем и геотехнических систем, с оптимальным использованием биоклиматического потенциала и почвенного плодородия, возможно только на динамически устойчивом рельефе, который необходимо проектировать с учетом максимального удовлетворения экологических потребностей человека и биоты. Следовательно, в каждом конкретном случае горно-техническому этапу рекультивации земель должен предшествовать научный *геоэкологический этап*. Основной его целью должно быть научно обоснованное проектирование рельефа, который обеспечит экологически благоприятный режим поверхностного стока и оптимальную дифференциацию микроклиматических условий. Причем, рельеф должен рассматриваться как инвариантная часть геоморфосистемы, соответственно, проектироваться в процессе рекультивации в комплексе с другими компонентами ландшафта. Окончательная адаптация таких ландшафтов к условиям среды должна происходить естественным путем. Она происходит и стихийно, без целенаправленного проектирования рекультивационных работ, но в этом случае равновесие достигается посредством активизации неблагоприятных для человеческой деятельности процессов рельефообразования, таких как ускоренная эрозия земель, которые наносят значительный экономический и экологический ущерб. Концепция устойчивого развития, которая в настоящее время регламентирует взаимоотношения общества и природы на международном и национальном уровнях, требует разработки конкретных проектов такого развития не только в глобальном и региональном масштабе, но и на локальном территориальном уровне. Уникальные возможности конкретной

¹ Поздняков А.В., Черванев И.Г. Самоорганизация в развитии форм рельефа. М.: Наука, 1990.

² Куценко Н.В. Геоморфологическая концепция рекультивации рельефа // Самоорганизация и саморегулирование рельефа. Томск: Томский филиал СО РАН. 2003.

реализации этой концепции возникают в ходе восстановления, нарушенных промышленными разработками, земель, что является важной прикладной задачей геоморфологии.

Б.Н.Воробьев и *С.В.Костриков* составили компьютерную программу «Рельеф-Процессор» для моделирования структуры и некоторых процессов самоорганизации рельефа флювиального типа, и издали учебное пособие по практической геоинформатике для менеджмента окружающей среды, основанное на использовании этого программного продукта (наряду с другими геоинформационными системами) [1]. Они нашли способ воссоздания структуры рельефа в виде системы (деревьев) инвариантных линий тальвегов и водоразделов, что дало возможность правильного воссоздания рельефа и его декомпозиции на структурные элементы. Заключительным аккордом такого моделирования являются разработки по прогнозированию геодинамических процессов, прежде всего водной эрозии, таяния снега, подтопления и т.п.

Н.И.Адаменко углубил теоретический аспект математического описания процесса самоорганизации рельефа (кандидатская диссертация, 1998) и использовал модель самоорганизующегося рельефа для выявления экологически наиболее информативных точек (метод «контрольной точки»). Его сущность состоит в том, что прослеживая линии тока из произвольной точки, можно проследить пути потенциального накопления загрязнений, смываемых с поверхности, и соответствующим образом разместить точки мониторинга. Это исследование выполнялось для мониторинга загрязнения поверхности почвы и вод военными объектами и предотвращения техногенных аварий.

Своеобразным приложением общей теории на стыке самоорганизации рельефа и исследования энергетического баланса земной поверхности методами астрофизики на топологическом уровне являются работы, проводимые *В.И.Мамницким* [2] и им же в соавторстве с сотрудниками Госцентра «Природа» [3]. В этих работах решена обратная задача фотометрирования оптически однородного рельефа: по цифровой модели рельефа строится его оптический образ, что позволяет визуализировать рельеф как явный, так и воображаемый (например, базисную или вершинную поверхность, или погребенный рельеф или формальный «рельеф» трехмерного распределения какого-либо признака). Продолжая традицию сотрудничества с Госцентром «Природа», автор этих строк рассмотрел современные аспекты самоорганизации рельефа применительно к задачам космического мониторинга земной поверх-

¹ *Костриков С.В., Воробьев Б.Н.* Практична геоінформатика для менеджменту довкілля. Електронний навчально-методичний посібник. Харків: Харківський національний університет/проект Темпус-Тасіс.- 2003.

² *Мамницкий В.И., Жернов В.В.* Синтезированное изображение как средство наглядного отображения картографической информации. / Тез. докл. всес. совещ. – М.: ИГАН СССР.- 1987.

³ *Kiselyov V.V., Mamnitsky V.I., Matiyasevich M.V.* Photometric method of making the maps an optically-inform arena relief /Intern. Archive Photometric and Remote Sending/ Vol 28, part 2. Comission II. 1990.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ РОЛЬ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА

ности и использования цифровой информации, получаемой со спутников, для космического земледования [1].

О.А.Блинкова создала научную ветвь изучения самоорганизации подводного рельефа методами ГИС-технологий на примере анализа материкового склона и морского ложа Черного моря в районе Туапсе-Джубга. Она построила математическую модель для обработки информации об отметках дна, полученной многолучевым эхолотом, и на основании компьютерного анализа цифровой модели дна впервые воссоздала его морфологию, выделила структурные линии на принципах флювиальной геоморфологии, осуществила спектральный анализ профилей структурных линий рельефа, структуру базисных и вершинных поверхностей. По этим данным (без дополнительной информации) ею впервые установлено наличие геоморфологических зон на подводном склоне и выявлен глубоководный каньон, предположена структура донных отложений на основании анализа качества отражения звукового сигнала. Эта работа была использована в международном проекте части трассы глубоководного нефтепровода [2].

Работы Харьковской геоморфологической школы нашли отклик в других научных школах Украины. В Институте географии НАН Украины под руководством В.П.Палиенко выполняется серия исследований по структурному анализу рельефа конкретных регионов. В фотограмметрической школе Львовского технического университета «Львівська політехніка» защищены докторские диссертации Р.Н. Рудого (1999) и Х.В.Бурштынской (2003) по цифровому отображению рельефа, в которой на уровне глубокой формализации (доказаны теоремы) показаны преимущества структурно-цифровой модели рельефа и возможности создания самоорганизующихся моделей, и получено несколько авторских свидетельств.

Ниже остановимся на тех аспектах проблемы, которые продолжают разрабатываться непосредственно автором.

Рельеф в географической оболочке. Географическая оболочка является самой известной нам (или самой крупной из известных нам) динамической системой, история которой вот уже на протяжении более чем 4 млрд. лет демонстрирует поразительную жизнеспособность самоорганизации диссипативных систем. Устойчивая неравновесность выступает тем способом существования такой системы, который обеспечивает ей выживаемость и эволюцию на протяжении этого невероятно длительного времени.

В этой системе рельеф является той ареной, на которой происходят события саморазвития природы и человеческой истории; на рельефе формируется динамическое равновесие сложной триединой гео-био-антропоной системы, прежде всего в

¹ Черваньов І.Г. Тривалий досвід і перспективи космічного землезнавства у пізнанні й використанні інформації про рельєф в геоморфологічному забезпеченні охорони довкілля / Матеріали 3-ї Української наради користувачів аерокосмічної інформації (20-24 листопада 2000 р., м. Київ). К.: 2000.

² Блинкова О.А. «ЗС» алгоритм геоморфологического анализа морского дна / ГИС в строительстве и эксплуатации трубопроводов // ГИС-обозрение. 2000, № 1.

термодинамическом отношении, как это не раз показывалось в современной литературе.

Он выполняет следующие функции:

модифицирует общий энергетический баланс территории (обусловленный космическими и теллурическими условиями), который зависит от сложности, экспозиции и крутизны склонов существенно в большей мере, чем известная из Землеведения планетарная роль широты места;

управляет переносом вещества и диссипацией энергии, обусловленными этим процессом, причем рельеф фокусирует и концентрирует потоки в большей мере, чем другие природные факторы;

является одним из наиболее значимых субстратов органической жизни, находясь с нею в двусторонних отношениях;

существенным образом модифицирует проявления человеческого развития начиная от способов хозяйственной деятельности и включая этническую самобытность, культуру и развитие;

формирует, наряду с человеческой деятельностью, экологические ситуации, определяет степень экологического риска и уровень экологической безопасности территорий.

- ведет себя как термодинамическая открытая система устойчивой неравновесности в структуре географической оболочки (являющейся такой же суперсистемой по отношению к рельефу).

В дальнейшем предполагается показать роль рельефа в глобальном саморегулировании энергетического потока Земли (опять же с точки зрения фундаментальных законов термодинамики в географическом освещении) и пересмотреть позиции рельефа в глобальной «климатической машине», причем вместе с характеристиками географического ландшафта в целом.

Геоморфосистема в качестве диссипативной структуры. После работ Р.Чорли, П.Хаггета, А.Позднякова, Ю. Симонова, А.Трофимова о динамическом равновесии в географических системах прошло уже несколько десятилетий. Революционизирующее значение в понимании равновесия сыграла теория И.Пригожина о диссипативных системах. К числу их наиболее важных признаков относятся устойчивость относительно малых возмущений и надкритическое удаление от равновесия. Тем самым, диссипативные структуры соответствуют *надкритическим состояниям текущего равновесия*.

Пригожин формализовал понятную и близкую геоморфологу идею того, что любой поток, который имеет место в природе, во-первых, фундаментально неравновесен, т.к. находится вдали от точки равновесия; во-вторых – находится в таком неравновесном состоянии устойчиво. Функция, которую такой поток выполняет в природной системе, состоит в диссипации энергии, поступающей из внешней среды и возвращающейся туда же в преобразованном и обесцененном виде. Другими словами, диссипативная система живет и развивается за счет количества и качества энергии внешней среды. Если в энергетическом отношении диссипация является энтропийным процессом, то применительно к организации геоморфосистемы, ко-

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ РОЛЬ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА

торая за счет этого совершенствуется этот процесс является процессом антиэнтропийным, т.е. созидательным. Он способствует поддержанию и совершенствованию внутреннего устройства системы и увеличению степени ее автономности относительно внешней среды. Отметим, что такие отношения в диссипативной системе возможны только при условии, что она является открытой системой.

Кажется, что никто из географов не рассматривает в явном виде системы природной среды как изолированные или закрытые. Однако, в то же время, в географических науках принято пользоваться понятиями и закономерностями классической термодинамики, которые «запрещают» существование систем, уменьшающих энтропию (повышающих порядок самопроизвольно); обычной практикой является понимание равновесия в вульгарном смысле; достаточно часто (если не всегда) природные процессы моделируются как симметричные, т.е. в обратимой шкале времени, без учета вектора саморазвития и необратимости изменений. Т.е. подспудно на открытые системы биокосной природы накладываются ограничения, заимствованные из модельно-физической (неорганической) природы изолированных и замкнутых систем.

Энергетический баланс и самоорганизация. В масштабах Земли энергия образует неравновесный (в указанном выше смысле) поток, а вещество – замкнутый круговорот. В масштабах любой части земной поверхности (на геоморфосистемном уровне) вещество также образует поток, соответствующий снижению его потенциальной энергии. Т.е. на геоморфосистемном уровне структуры географической оболочки это уже открытые системы.

Наличие потока тепла показывает, что обмен веществом сопряжен с обменом энтропией. Он, как известно географу, реализуется в тепловом балансе Земли, который при приблизительном равенстве правой и левой частей в то же время является асимметричным процессом, т.к. приходная часть – это преимущественно (на 90% в среднем) высококачественная высокоупорядоченная лучистая энергия Солнца, а расходная – изотропное (т.е. максимально неупорядоченное) тепло Земли. Энтропия во многих работах теоретиков рассматривается ключевой физической величиной при описании самоорганизации. Она служит мерой ценности содержащейся в системе энергии и мерой беспорядка. Энтропия системы может уменьшаться, если система экспортирует энтропию. Реальная и теоретически обоснованная возможность отвести энтропию из системы географической оболочки состоит в том, чтобы подводить к системе тепло при более высокой температуре и отводить тепло при более низкой температуре. Именно таков механизм экспорта энтропии Землей [1]. Чтобы гарантировать экспорт энтропии, свободную энергию следует *подвести к системе в количестве, превышающем изменение энергии и ее затраты вследствие производства энтропии.*

Окружающая среда должна содержать «энтропийные насосы», которые нагнетают в систему высококачественную энергию (коротковолновое излучение, поток

1 См. Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции. Синергетический подход. - Перев. с нем. М.: УРСС, 2001.

дождя или упорядоченный поверхностный сток). Планета Земля представляет собой своего рода «фотонную мельницу» (по Эбелингу), действующую в данном случае между горячими фотонами солнечного излучения и холодными фотонами, излучаемыми земной поверхностью. Эту функцию в значительной мере берет на себя земная поверхность. Энтропийным насосом (в указанном выше понимании) выступают в рельефе системы линий тока, которые упорядочивают линейный сток, т.е. снижают энтропию в сравнении с обычным площадным стоком, а в дальнейшем делают этот процесс все более эффективным, создавая древовидную сеть стока.

Как известно, в древовидной сети число степеней свободы для вещественного потока равно всего 1, т.е. он становится полностью детерминированным. Следовательно, эффективность энтропийного насоса по мере самоорганизации рельефа возрастает. Это является ключевым моментом к объяснению самоускоряющихся процессов образования бедлендов, ускоренной эрозии и даже дефляции: процесс, начавшись, стимулирует энтропийный насос, что приводит к увеличению ресурсов системы.

Экспорт энергии в единицу времени составляет величину, равную разности отношений: (поглощенное излучение / температура) – (излучение Земли/температура) = $-4 \cdot 10^{14}$ Вт/К. Знак «минус» означает, что энтропия убывает относительно Земли, т.е. экспортируется в Космос. Путем простых пересчетов, можно констатировать: средний экспорт энтропии с квадратного метра земной поверхности составляет величину около $1 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. Число $1 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ характеризует термодинамическую интенсивность силы, приводящей в движение фотонную мельницу, которая, в свою очередь, движет процессами самоорганизации и эволюции на Земле.

Кроме этого общего процесса, активные структурообразующие системы (живые организмы, почва и т.д.) содержат энтропийные насосы внутри себя и поэтому должны, как правило, обладать внутренней организацией более высокой, чем среда. Кроме того, активные структурообразующие системы должны получать из окружающей среды приток высокоэнергетических сырьевых веществ. Таким образом, энтропийный насос уводит геоморфосистемы в сторону от равновесия.

Роль рельефа в качестве регулятора энергетического баланса геоморфосистемы. Самоорганизация связана с ценными формами энергии и с упорядоченными состояниями геоморфосистемы. Рельеф играет лишь некоторую роль в изменении пропускающей способности тропосферы, т.к. с его поверхности благодаря эрозии, дефляции и плоскостному смыву, продукты которых развываются воздушными потоками, поступает в воздух определенное количество аэрозольных частиц пыли, минеральных солей и органических частиц. Но основную роль рельеф играет как дифференциатор физических свойств земной поверхности. Известно, что шероховатость и цвет поверхности являются основными факторами, определяющими поглощение энергии. Пока не исследовалось то обстоятельство, что диссипация энергии такой поверхностью путем отражения и излучения будет тем большей, чем сложнее и хаотичнее рельеф. Здесь необходимо вспомнить положение, приводившееся выше, относительно того, что диссипативная система тем эффективнее, чем больше разность в количестве и качестве подводимой и уходящей энергии. Здесь же

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ РОЛЬ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА

отметим, что свойства рельефа морфологически одинакового будут разными в зависимости от состояния его поверхности: наличия, типа и состояния растительного покрова, типа и состояния почвы – в целом, почвенно-растительного блока ландшафта. Наконец, антропогенная деятельность также модифицирует состояние земной поверхности и в отношении шероховатости, также цвета и степени защищенности от экзогенных процессов, т.е. она воздействует разными способами на эффективность «энтропийного насоса геоморфосистемы.

Благодаря этим факторам – неровностям поверхности, ее шероховатости и цвету, также процессам, которые меняют состояние последней – рельеф модифицирует поток солнечной энергии, максимально упорядоченный благодаря параллельности солнечных лучей прямой радиации, в сложно преобразованный, в некоторой мере мозаичный поток инсоляции земной поверхности (зависимость его от астрономических и рельефных факторов). Вслед за этим, придавая хаотичность потоку теплового излучения от земной поверхности, он способствует эффективному обесцениванию последнего с энергетической точки зрения. Таким путем геоморфосистема повышает экспорт энтропии в тем большей мере, чем сложнее, упорядоченнее, организованнее рельеф.

В силу этого, геоморфосистема способна концентрировать энергию в определенных местах, что в конечном счете приводит к возникновению природных катаклизмов и техногенных аварий (разрывы сетей, оползни в населенных пунктах и на линейных объектах и т.д.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Краткий обзор состояния проблемы показывает необходимость, с точки зрения ее развития и разрешения, следующих шагов:

Развития исследований самоорганизации рельефа как активной части геодинамики зменой поверхности.

Расширение рамок проблемы за пределы традиционно геоморфологического анализа до комплексного геоморфосистемного.

Максимально детальное и адресное изучение процессов, обусловленных самоорганизацией, в качестве регуляторов энергетического баланса. Самоорганизация рельефа должна, по убеждению и опыту автора, рассматриваться как управляющее звено самоорганизации гетерогенных геоморфосистем географической оболочки, т.к. это связано с проблемами окружающей среды, изменений климата и устойчивого развития определенных ключевых территорий.

Назревшую необходимость мониторинга рельефа в качестве «провокатора» возникновения чрезвычайных ситуаций (наводнений, селей, катастрофической эрозии и денудации склонов).

Поступило в редакцию 12.10.2004