

## ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ГЕОМОРФОСИСТЕМ КАК БИНАРНЫХ СТРУКТУР, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ С НАСЫЩЕНИЕМ (НА ПРИМЕРЕ ГОРНОЛЕДНИКОВОГО БАССЕЙНА АКТРУ)

Кузнецов А.С., Поздняков А.В.

*ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем» СО РАН, Томск, Россия (634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3), kuzgeo@gmail.com*

Любая форма рельефа характеризуется гравитационно-энергетическим потенциалом (подсистема  $X(t)$ ). Это обуславливает формирование в пределах данной подсистемы нового гравитационно-энергетического потенциала, предполагающего развитие рельефообразующих процессов и соответствующих им форм рельефа и образование подсистемы  $Y(X,t)$ . Подсистема  $Y(X,t)$  играет роль обратной отрицательной связи, ингибирующей развитие процессов в подсистеме  $X(t)$ , в результате такого взаимодействия достигается баланс (динамическое равновесие) в расходах вещества. На примере горноледникового бассейна Актру рассматривается функционирование бинарной геосистемы и особенности массообмена между подсистемами  $X(t)$  и  $Y(t)$ . В ходе исследования было подтверждено, что саморегулирование в геосистемах косной среды, в частности и в геосистеме Актру, осуществляется за счет обратного влияния размеров геосистемы на поступление вещества на входе. В подсистеме  $Y(t)$  происходит аккумуляция значительной доли вещества, которая будет длиться до момента её насыщения.

Ключевые слова: самоорганизация, динамически равновесные величины, заданные и текущие состояния.

## THE DYNAMICS OF GEOMORPHOSYSTEMS DEVELOPMENT AS BINARY STRUCTURES, OPERATIVE WITH SATURATION (ON AN EXAMPLE OF MOUNTAIN GLACIER BASIN OF THE AKTRU RIVER)

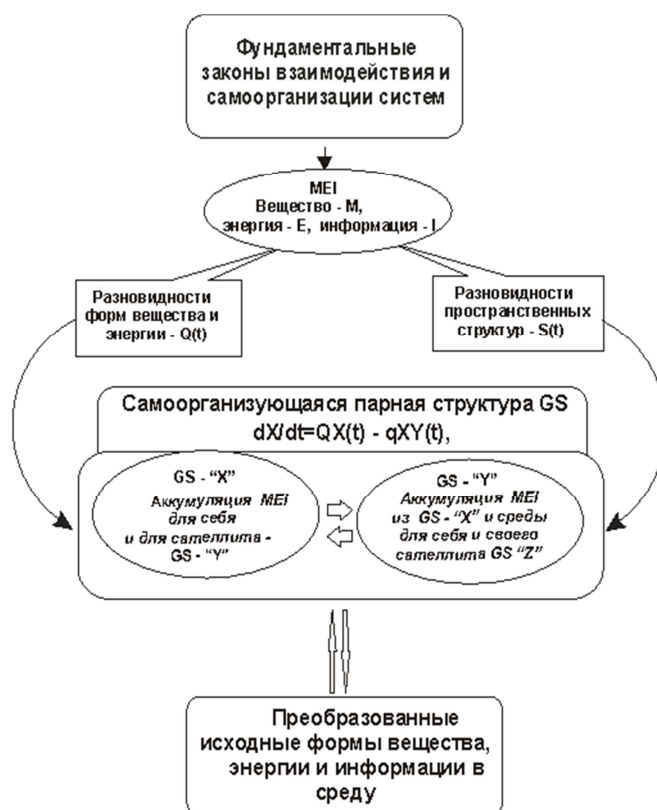
Kuznetsov A.S., Pozdnyakov A.V.

*FSBAS Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of Siberian Branch of the Russian Academy of Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation (634055, Tomsk, 10/3, Academicheskyy avenue) kuzgeo@gmail.com*

Any form of relief is characterized by the gravitational potential energy (subsystem  $X(t)$ ). This leads to the formation of a new subsystem within a given gravitational potential energy involving the development of relief-forming processes and their corresponding forms of relief, and the creation of subsystem  $Y(X,t)$ . Subsystem  $Y(X,t)$  acts as negative feedback, inhibiting the development of processes in the subsystem  $X(t)$ , as a result of this interaction is achieved by balance (dynamic balance) in the substance discharge. In the example of mountain glacier basin of the Aktru River considers the functioning of the binary Geosystems and features of mass exchange between the subsystems  $X(t)$  and  $Y(t)$ . The study confirmed that self-regulation in the geosystems of the stagnant environment, in particular in Aktru geosystem, carried out by feedback of the Geosystem's size for admission of entry matter. In the subsystem  $Y(t)$  proceeds the accumulation of a significant part of material. This accumulation will last till saturation of subsystem by incoming material.

Key words: self-organization, dynamic equilibrium values, predefined and current state.

Есть достаточно оснований утверждать, что самоорганизующиеся системы, в самом широком смысле, развиваются и функционируют с насыщением. С насыщением развиваются системы, характеризующиеся предельным циклом, в основе которого лежат внутренние структурно-организационные противоречия. А они – суть бинарности самоорганизующихся систем, в них генетически заложено диалектически противоречивое, по существу субстанциональное единство двух начал, вместе предполагающих образование, существование и развитие структурных целостностей – систем (рис. 1) [4; 5].



**Рисунок 1. Схема структурно-функциональных отношений бинарной геосистемы.**

Опыт изучения самоорганизующихся геосистем, в частности геоморфосистем, показывает, что они представляют собой парные образования: если формируется система  $X(t)$ , то вместе с ней формируется и ее спутник - система  $Y(X,t)$ . Для  $Y(X,t)$  система  $X$  представляет собой экологическую емкость - из нее поступает энергия, ею же определяются пространственные границы развития и время существования системы  $Y$ . Динамика системы, как бинарной структуры, осуществляется, с одной стороны, за счет поступления вещества и энергии из среды, а с другой - вследствие обмена ими между составляющими ее подсистемами. Потоки энергии, вещества и информации ( $MEI$ ), потребляемые системой  $X$  из среды, нами названы  $F$ -потоками, а объективно отдаваемые ее спутнику - системе  $Y$  -  $D$ -потоками. Энергия в  $F$ -потоках («энергия для себя») используется для сохранения и функционирования самой системы  $X$ . Величина накапливаемых в ней  $MEI$  ограничивается емкостью среды. Поэтому если в  $F$ -потоке расход  $Q(t)=const$ , то  $\Delta M(t) \rightarrow 0$ . Энергия в  $D$ -потоке - это «вынужденно» отдаваемая «энергия для спутника», причем расход ее  $q(t,M) \rightarrow Max$ . Формирование геоморфосистемы (ГМС) «спутник» является объективным, имманентным свойством всех самоорганизующихся систем. Появление ГМС, создаваемой  $F$ -потоком, неизбежно влечет появление ГМС «спутник  $Y$ » и питающего ее  $D$ -потока  $MEI$ .

Таким образом, любые самоорганизующиеся системы, включая и социально-экономические, можно рассматривать как бинарные структуры и характеризовать их динамику на основе балансовых отношений, известных как «ресурс-потребитель» или «хищник–жертва». По существу это закономерность всеобщего действия, согласно которой динамика систем описывается уравнением:

$$dM/dt=Q(M,V,t)-q(M,t)+f(U),$$

где  $M$  – выходные характеристики системы, учитывающие суммарную аккумуляцию вещества и энергии, создаваемую системами  $X$  и  $Y$ ;  $Q$  - расход энергии в  $F$ -потоке;  $q$  – расход энергии в  $D$ -потоке, создаваемом системой  $Y$ ;  $W$  - емкость среды (экологическая емкость);  $t$  - время;  $f(U)$  - антропогенная функция управления.

Согласно этой закономерности, динамика геосистем осуществляется по логистическому закону. В упрощенном виде: если полагать, что предел насыщения системы известен (это могут быть задачи, связанные с динамикой продуктивности какой-либо системы при известной экологической емкости  $W$ ), то возможно аналитическое решение уравнения динамики геосистемы.

#### *Заданные и текущие состояния в динамике геосистем*

Понятие «заданное состояние» введено в кибернетике. Оно характеризует состояние, которое некая саморегулирующаяся техногенная система в своей динамике *должна достичь*, при установленных начальных условиях поступления энергии. Динамика кибернетических и технических систем регулируется за счет определения величины рассогласования между заданным (ЗС) и текущим (ТС) состояниями.

Природные (в данном случае косные) системы, в частности ГМС, не имеют специальных регулирующих органов для определения величины рассогласования между ЗС и ТС. Функции регуляторов в них выполняют ее собственные морфометрические характеристики (высота  $H(t)$ , объем  $V(t)$ , площадь поверхности  $S(t)$  и пр.), в которых аккумулируются вещество и энергия [4; 5]. В динамике ГМС морфометрические характеристики оказывают обратное воздействие на входные характеристики, в частности - на поступление вещества (объем материала, выводимого в сферу гипергенеза). Например, прирост высоты  $\Delta H(t)$  и объема  $\Delta V(t)$  горного массива, по мере их суммарного увеличения, приближается к нулю (так как существенно возрастает давление на нижележащие слои, и они выжимаются из-под гор). То же наблюдается в динамике поймы и прибрежной отмели водохранилищ: с увеличением размеров (высоты, ширины) их прирост приближается к нулю. Эта закономерность используется для прогноза динамики прибрежных геосистем.

Таким образом, саморегулирование во всех геосистемах косной среды осуществляется за счет обратного влияния своих собственных размеров на поступление вещества на входе.

В вышеприведенном уравнении слагаемые в правой части находятся в функциональной зависимости от самих регулируемых характеристик систем, и так как второе слагаемое всегда стремится по своей величине к первому слагаемому, то эта функциональная зависимость, выступая в качестве обратной отрицательной связи, ингибирует процесс – замедляет рост вещества, энергии и информации в системе, приводит их массу к некоторой динамически равновесной величине, мало меняющейся в течение времени. Система переходит в разряд самоорганизующихся, способных к увеличению своей упорядоченности за счет изъятия вещества, энергии и информации и порядка (негэнтропии) из среды.

В отличие от живых организмов, обладающих гомеостатическими свойствами, и от кибернетических систем, в которых имеются специальный регулирующий (управляющий) орган и орган, выполняющий функции задающего воздействия, т.е. определяющий количество поступающего и отводимого вещества (или энергии) в системе, в ГМС все эти функции выполняются взаимодействующими потоками  $F$  и  $D$ .

*Заданными величинами*, характеризующими геосистемы в стадии насыщения, являются характеристики размеров форм рельефа: высота ( $H_c$ ); площадь ( $S_c$ ) поверхности; объемы ( $V_c$ ) форм; ширина ( $B_c$ ) подводного склона; крутизна ( $\alpha_c$ ) склонов и пр. В графиках кривые одновременного и взаимосвязанного изменения расходов вещества и энергии, в зависимости от роста размеров форм рельефа, всегда пересекаются. Точка пересечения кривых указывает на равенство расходов вещества в  $F$ - и  $D$ -потоках (в состоянии насыщения), а проекция ее на абсциссу – на стационарную динамически равновесную высоту, или, пользуясь терминологией теории авторегулирования, *заданную высоту* в стадии насыщения, но задаваемую спонтанно складывающимися условиями развития геосистем. Роль задающего воздействия (т.е. какими морфометрическими характеристиками должны обладать геосистемы при данных расходах вещества и энергии в  $F$ - и  $D$ -потоках в стадии насыщения) могут играть различные эндогенные и экзогенные процессы, или импактные события.

### **Объект исследования**

Примером функционирования подобного рода бинарной ГМС является горноледниковый бассейн Актру (Актру), расположенный в Юго-Восточном Алтае (Северо-Чуйский хребет). Общая площадь бассейна составляет  $42 \text{ км}^2$ , площадь современного оледенения – около  $16 \text{ км}^2$ . Средние углы наклона поверхности –  $27^\circ$ , для высокогорной части бассейна углы наклона поверхности возрастают до  $45\text{-}50^\circ$ , а максимальные уклоны доходят до  $60^\circ$ .

Район проводимых нами исследований охватывает преимущественно высокогорную часть бассейна, и рассматриваются только верховья р. Актру, ограниченные замыкающим створом в конце долинного зандра. Горноледниковый бассейн имеет относительно замкнутую форму, что исключает транзит вещества через бассейн, а вынос материала осуществляется в основном водным потоком р. Актру.

Самоорганизация и развитие данной ГМС, как и всех других, осуществляется с насыщением, конечным состоянием которого является динамическое равновесие [4]. Четко выраженная направленность развития ГМС к динамическому равновесию достигается благодаря регулирующему действию обратных связей. Эту роль выполняют два показателя ГМС: ее собственные размеры (площадь, высота над базисной поверхностью, объем, масса и пр.) и емкость среды.

### **Обсуждение результатов**

Системой  $X(t)$  в ГМС Актру является сам рельеф, формирование которого происходит за счёт эндогенного поднятия вещества земной коры – поступления  $MEI$  из среды в  $F$ -потоке. Одновременно с поднятием горного массива получают развитие процессы денудации, нивелирующие тектонические формы рельефа, т.е. происходит формирование парной системы «сателлита»  $Y(t)$  – в виде комплекса эрозионно-денудационных процессов. Основой функционирования системы  $Y(t)$  являются  $MEI$ , отдаваемые системой  $X(t)$  в  $D$ -потоке.

#### *Характеристика системы $X(t)$*

Формирование ГМС Актру начинается в эпоху тектонического поднятия на границе мелового периода и палеогена. В это время территория Горного Алтая представляла собой платообразную поверхность, поднятую на высоту около 500 м над ур.м. В конце мела начинается этап неотектонического развития Горного Алтая [1]. В эоплейстоцене происходит активизация эрозионных процессов, проявляющаяся в глубоком врезе речных долин. Это связано, по-видимому, с активизацией тектонических процессов на рубеже неоген-четвертичного периода, продолжающихся и по настоящее время [2]. Тогда же произошло заложение V-образной долины р. Пра-Актру, которая в дальнейшем испытала оледенение.

О современном поднятии осевой части хребта свидетельствует факт образования молодых террас в самых верховьях р. Актру - высотой до 2,5 м. Возраст террас, судя по древесной растительности, поселившейся на них, около 200-220 лет.

Таким образом, потоком  $F$ , формирующим систему, является эндогенный литопоток, характеризующийся следующими показателями:  $V$  – объем вещества земной коры на

единицу площади, выводимый в сферу гипергенеза,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  $B$  – объем вещества земной коры, выведенный в сферу эрозионной деятельности, заключенный между поверхностью геоида и базисной поверхностью,  $\text{м}^3$  на единице площади (объем вещества, необходимый для самоорганизации эрозионных процессов);  $P$  – объем вещества земной коры, выведенный в сферу гипергенеза на единицу площади,  $\text{м}^3$  – объем, заключенный между базисной поверхностью и вершинной; определяется вычитанием из общего объема ( $V_1$ ) объема всех долин и впадин ( $V_2$ ):  $P=V_1-V_2$ . Это объем вещества, необходимый для самоорганизации пространственного перераспределения продуктов выветривания денудационными процессами.

Согласно нашим расчётам, объем вещества, сосредоточенный между базисной поверхностью и поверхностью геоида, в ГМС Актру составляет  $2,06 \text{ км}^3/\text{км}^2$ . Общий же объём горных пород, выведенный в сферу эрозионной деятельности, заключенный между поверхностью геоида и базисной поверхностью ( $B$ ), составляет  $86,52 \text{ км}^3$  – это объем вещества, необходимый для самоорганизации эрозионных процессов.

Деятельный объём вещества, выведенный в сферу эрозионной переработки ( $P$ ), заключенный между вершинной и базисной поверхностью, для горноледникового бассейна р. Актру составляет  $38,09 \text{ км}^3$  - это объем вещества, необходимый для самоорганизации пространственного перераспределения продуктов выветривания денудационными процессами. На  $1 \text{ км}^2$  в среднем приходится  $0,9 \text{ км}^3$  горных пород, выведенных в сферу гипергенеза. Следовательно, с учетом скорости тектонического поднятия осевой части горного узла Биш-Иирду ( $1,5\text{-}2 \text{ см}/\text{год}$ ), ежегодно в область гипергенеза за счет *эндогенного* ( $F$ ) *литопотока* поступает до  $630\,000 \text{ м}^3$  вещества (расход вещества  $Q$ ).

#### *Характеристика системы $Y(t)$*

Как было отмечено выше, с формированием системы  $X(t)$  происходит формирование и системы сателлита –  $Y(t)$ , представляющей собой комплекс процессов, определяющих выравнивание приподнятой поверхности.

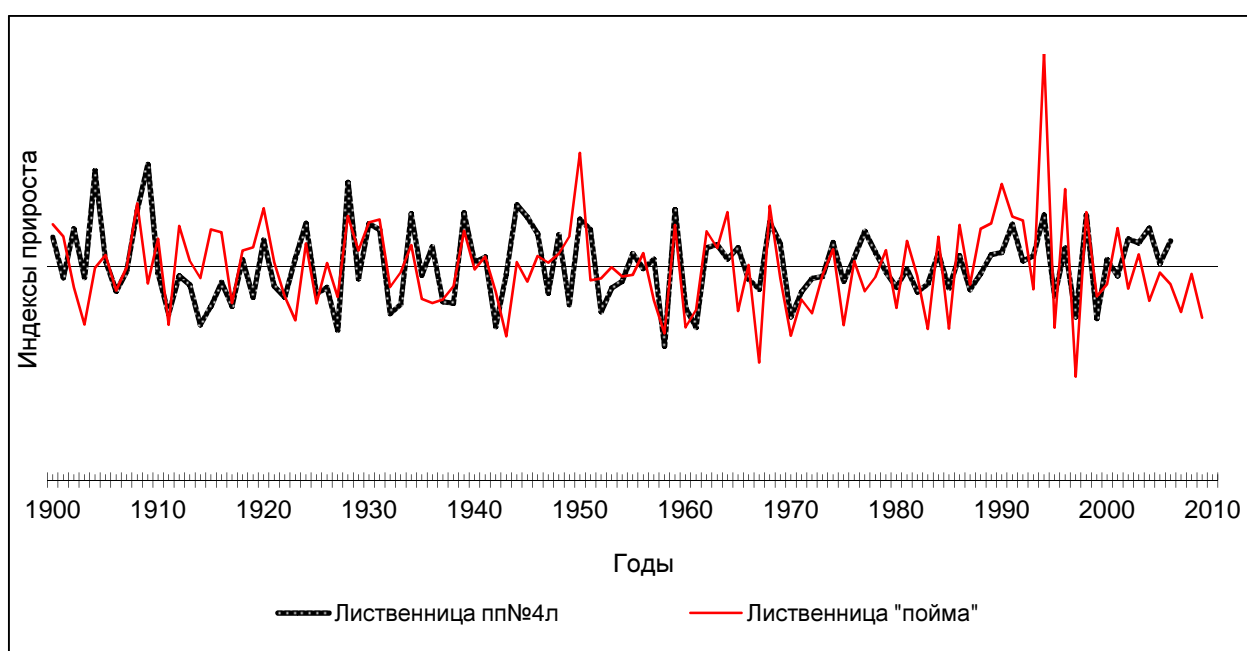
Основным потоком  $MEI$ , формирующим систему  $Y(t)$ , является  $D$ -поток. Эрозионно-денудационные процессы характеризуются объемом расхода вещества, удаляемого с единицы площади ( $\text{м}^3/\text{год}$ ), который определяется как произведение мощности  $m$  денудируемого слоя на площадь  $S$  поверхности рельефа:  $Q=mS/\cos\alpha$ .

Относительная «изолированность» бассейна от стороннего привноса вещества из смежных областей позволяет определить величину общей денудации рельефа путём исследования твёрдого стока р. Актру. Суммарный объём материала, поступающий в систему  $Y(t)$  в  $F$ -потоке, в течение года в среднем составляет около  $151\,000 \text{ м}^3$ .

Анализируя величины стока взвешенных наносов р. Актру на выходе из системы, можно определить расход вещества в  $D$ -потоке системы  $Y(t)$ , который будет характеризовать динамику процессов целостной бинарной ГМС Актру. В результате исследований нами был определён среднемноголетний сток взвешенных наносов на выходе из системы, переносимых водным потоком р. Актру; объем стока составляет около  $84\,000\text{ м}^3/\text{год}$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что в системе  $Y(t)$  происходит аккумуляция значительной доли вещества, которая будет длиться до момента насыщения системы. Данный факт подтверждается занесением прикорневой части деревьев, произрастающих в пойме р. Актру. Величина занесения составляет в среднем 30-40 см. С использованием дендрохронологических датировок определено, что активизация современной аккумуляции происходит с начала 1900-х гг., т.е. с окончания малого ледникового периода; именно в эти годы отмечается резкое падение приростов древесины лиственниц, произрастающих в пределах поймы, по сравнению с другими областями ГМС Актру (рис. 2).

Данный факт исключает реакцию на климат. Пики падения прироста отмечаются в 30-х, 60-х и 70-х гг. XX в., впоследствии синхронность прироста древесины на пойме и в других местах ГМС Актру восстанавливается вплоть до начала XXI в.



**Рисунок 2. Индексы радиального прироста лиственницы, произрастающей на склонах (пробная площадь № 4 – пп № 4 л) и в пойме р. Актру.**

Учитывая объёмы выносимого материала водным потоком р. Актру и материала, поступающего со склонов, определяем скорость денудации рельефа горноледникового бассейна: она составляет около 2-3 мм/год, что согласуется с общей величиной денудации для всего Горного Алтая, приводимой в работах М.В. Петкевич (1-3 мм/год) [3].

## Выводы

Таким образом, наши исследования подтверждают, что саморегулирование в геосистемах косной среды, в частности и в ГМС Актру, осуществляется за счет обратного влияния размеров геосистемы на поступление вещества на входе. В подсистеме  $Y(t)$  происходит аккумуляция значительной доли вещества, которая будет длиться до момента насыщения системы.

Современное развитие ГМС Актру происходит на фоне активного поступления  $MEI$  в эндогенном ( $F$ ) потоке в систему  $X(t)$ . Учитывая скорость денудации рельефа горноледникового бассейна и параметры расхода вещества в  $D$ -потоке на выходе из бинарной структуры ГМС Актру, констатируем, что наблюдается значительная доля аккумуляции вещества в системе  $Y(t)$ . Характерной реакцией на аккумуляцию вещества в системе  $Y(t)$  является занесение прикорневых частей деревьев, произрастающих в пределах долинного ландшафта Актру. Динамика накопления материала составляет в среднем 3-4 мм/год.

## Список литературы

1. Богачкин Б.М. История тектонического развития Горного Алтая в кайнозое. - М. : Наука, 1981. – 132 с.
2. Девяткин Е.В., Ефимцев Н.А., Селиверстов Ю.П., Чумаков И.С. Еще о ледомах Алтая // Труды комис. по изучению четвертичного периода. – 1963. – Т. XXII. – С. 64-75.
3. Петкевич М.В. Физико-географические аспекты развития склоновых процессов в Центральном Алтае : дис. ... канд. географ. наук. – Томск, 1973. - 180 с.
4. Поздняков А.В. Динамическое равновесие в рельефообразовании. – М. : Наука, 1988. – 208 с.
5. Поздняков А.В. Самоорганизующиеся бинарные структуры // Биниология, симметрология и синергетика в естественных науках : материалы V-й междунар. конф. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2007. – С. 29–35.

## Рецензенты:

Евсеева Н.С. д.г.н., профессор, зав. каф. географии ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Дюкарев А.Г. д.г.н., зав. отделением Экологических исследований ФГБУН ИМКЭС СО РАН, г. Томск.

Халтурин В.Г., д.т.н., профессор кафедры ООС, Пермский национальный исследовательский политехнический университет Министерства науки и образования РФ, г. Пермь.