

На правах рукописи

НЕВИДИМОВА Ольга Геннадьевна

**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РЕЛЬЕФООБРАЗОВАНИЯ**

25.00.25 – «Геоморфология и эволюционная география»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Томск – 2006

Работа выполнена в лаборатории самоорганизации геосистем
Института мониторинга климатических и экологических систем
СО РАН (г. Томск)

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Поздняков А.В.

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор
Бураков Д.А.

доктор физико-математических наук, профессор
Задде Г.О.

Ведущая организация: Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск)

Защита состоится 14 июня 2006 г. в _____ час на заседании
диссертационного совета Д 212.267.15 при Томском государственном
университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, главный
корпус

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского
государственного университета

автореферат разослан «___» _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат географических наук

Т.В. Королева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современная геоморфология обладает широким комплексом идей, концепций, подходов, методов, предназначенных для изучения своего главного объекта – рельефа земной поверхности. Специфика этого объекта, его сложность – с одной стороны, и рост эмпирического базиса, потребность в логической обработке открытых фактов, не укладывающихся в традиционные схемы, накопление теоретического материала – с другой стороны, как и появление новых задач и условий, вызванных усложнением состояния окружающей среды за счет антропогенной и техногенной составляющей, требуют новых подходов к изучению рельефа. Одно из направлений научного поиска связано с явлением самоорганизации геоморфологических систем в контексте синергетики.

Необходимо подчеркнуть, что способность к самоорганизации – это основная сила, обеспечивающая эволюцию любых целостностей безотносительно их материальной основы, свойство, присущее как биологической среде, так и косным системам. Поэтому изучение закономерностей самоорганизации геоморфосистем дает возможность более глубоко познать объект геоморфологии – рельеф и оценить роль в эволюции природы геоморфологической формы движения, представляющей собой, по словам О.В. Кашменской (1982), генетическую ассоциацию форм движения, совокупным результатом которых является эволюция форм земной поверхности.

Реализация этой актуальной исследовательской программы предполагает осмысление и соотнесение таких понятий, как нелинейность, обратные связи, целостность, целесообразность, с характеристиками системы и возможность математического анализа сложных явлений. Геоморфологические системы обеспечивают возможность взаимного увязывания этих понятий в целостную модель сложной системы, самоорганизация которой есть результат спонтанного стремления к равновесию (Поздняков, 1988, 2005).

Всякая самоорганизующаяся геоморфосистема развивается в направлении достижения динамически подвижного равновесия, для которого характерно максимальное сопряжение формирующего систему потока и потока, дезорганизующего её. Принцип динамически подвижного равновесия устанавливает количественные характеристики равновесия, связывая в единое целое большое число параметров системы с указанными потоками. В рамках теории самоорганизации возможно описание полной эволюции геоморфосистемы, не принимая во внимание огромное количество взаимодействий для каждого элемента системы, а учитывая степень согласованности пространственных и временных характеристик её потоков. Влияние потоков друг на друга регулируется в основном обратной положительной и обратной отрицательной связью. Зная механизмы действия различных видов связей, можно реконструировать или прогнозировать различные состояния в развитии геоморфосистем. Решение данной задачи имеет важное теоретическое и прикладное значение, что также определяет актуальность диссертационного исследования.

Степень разработанности проблемы. Проблема самоорганизации геоморфологических систем в контексте синергетики в настоящее время представляет особый

научный интерес (см., например, материалы XXVII Пленума Геоморфологической комиссии РАН). Она сложна, многогранна и в целом еще только поставлена. В то же время существует много глубоких исследований, связанных с данной проблемой, которые позволяют приблизиться к её разрешению.

Фундаментальные аспекты синергетики рассмотрены в трудах П. Гленсфорда, Дж. Николиса, И. Пригожина, И. Стенгера, Г. Хакена, а также отечественных ученых В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича, Е.Н. Князевой, С.П. Курдюмова, А.Ю. Лоскутова, Г.Г. Малинецкого и других.

Методологически подход к исследованию рельефа земной поверхности, основанный на универсальных закономерностях эволюции и самоорганизации, опирается на научные представления классиков геоморфологии В. Дэвиса, В. Пенка. Значительный вклад как в развитие самого понятия «геоморфологическая система», так и в формирование представлений о структурной и динамической организации различных форм рельефа внесли исследования С.С. Воскресенского, И.П. Герасимова, О.В. Кашменской, Б. Кеннеди, А.Н. Ласточкина, Н.И. Маккавеева, Ю.А. Мещерякова, Ю.Г. Симонова, А. Стралера, В.Б. Сочавы, Д.А. Тимофеева, Н.А. Флоренсова, Р. Хортона, Р. Чорли, И.С. Щукина и других ученых. А.Д. Армандом впервые были обозначены основные схемы действия обратных связей для геосистем, а также механизмов саморегуляции и самоорганизации. С точки зрения аспекта взаимодействия наиболее глубокий математический анализ процессов геоморфодинамики проведен в работах А.С. Девдариани, В.М. Московкина, З.Б. Ройхваргера, А.М. Трофимова, А.В. Ушакова, А.Е. Шайдегера и др. А.В. Поздняковым, И.Г. Черваневым были рассмотрены проблемы саморегуляции и самоорганизации геоморфосистем в контексте динамического равновесия на основе выдвинутого А.В. Поздняковым положения о положительном и отрицательном литопотоках.

Однако до сих пор остаются открытыми многие вопросы как теоретического, так и прикладного характера, дискуссионны вопросы терминологии. Методологические аспекты проблемы самоорганизации геоморфосистем освещены в геоморфологической литературе фрагментарно, очень мало работ по математическому описанию процесса самоорганизации в геоморфологических системах, а аналитически установленные закономерности не доведены до уровня математических моделей. Потенциальные возможности теории самоорганизации в познании рельефа земной поверхности реализуются в значительной степени недостаточно. Все это усиливает актуальность проблемы и определяет предпосылки к её разработке на современном научном уровне.

Целью исследования является установление основных закономерностей и особенностей развития геоморфологических систем в аспекте самоорганизации на примерах строения и функционирования форм рельефа различного генезиса. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- Определить основные методологические положения и терминологический аппарат теории самоорганизации.
- Проанализировать исходные принципы конструирования открытых нелинейных самоорганизующихся систем применительно к геоморфологическим системам.
- Показать, что любую форму рельефа можно рассматривать как систему, развитие которой, включая процессы саморегулирования и самоорганизации, зависит от

взаимодействия различных видов литопотоков, определяющих направленность процессов в геоморфосистемах к достижению равновесия.

- Охарактеризовать основные особенности механизмов саморегуляции и самоорганизации, учитывая контролирующие их прямые и обратные связи в развитии различных типов склонов.
- Описать принципиальную схему установления динамически равновесного режима в формировании русла реки на основе закономерностей свободной турбулентности как проявления самоорганизации русловых процессов.
- Выявить особенности организации и динамики пойменной системы.
- На основе концепции динамических моделей, с позиций физики и выявленных закономерностей саморегуляции и самоорганизации, проанализировать ряд процессов, связанных с россыпеобразованием.

Объект и предмет исследования. Общим объектом исследования являются геоморфологические системы как динамические структурные целостности. Выделение склоновых систем объясняется глобальностью их распространения.

В качестве предмета исследования выступают механизмы саморегуляции и самоорганизации, функционирующие в геоморфосистемах и обеспечивающие их эволюцию.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертационной работы положены результаты аналитических исследований, проводившиеся по плановой тематике Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН: Программа 24.1. «Природные процессы в ландшафтной оболочке Земли и их эволюция с учетом антропогенного воздействия, географические основы сбалансированного развития территорий»; «Научно-методические и технологические основы мониторинга и прогнозирования развития атмосферных и экосистемных изменений под воздействием природных и антропогенных факторов»; по проектам РФФИ: «Синергетика геоморфосистем» № 94-05-16328 (1994–1996 гг.); «Самоорганизация флювиогляциальных катастроф (на примере Горного Алтая)» № 01-05-65151 (2001–2003 гг.); результаты анализа материалов, полученных во время полевых экспедиций (2001–2004 гг.).

Использовались многочисленные литературные источники, опубликованные по теме работы.

Данное диссертационное исследование проводилось с позиций синергетики и основывается на современных теоретических концепциях геоморфологии. Для обоснования представленных в работе решений использовались в основном аналитический, формально-логический методы, методы физического и математического моделирования, а также дифференциального и интегрального исчисления.

Основные результаты исследования и их научная новизна

- Впервые обосновано применение синергетического подхода к изучению рельефа; обобщены и систематизированы современные представления по проблеме самоорганизации геоморфосистем.

- Охарактеризованы основные особенности механизмов саморегуляции и самоорганизации, выделены контролирующие их прямые и обратные связи при формировании рыхлого чехла и в развитии различных типов склонов.

- Доказано, что структурная организация склоновой системы определяется взаимоотношением между количеством и составом продуктов выветривания и скоростью денудации. Разработана принципиальная модель самоорганизации склоновых систем. Реализация важнейшего принципа теории самоорганизации – принципа подчинения – рассматривается на примере склона в рамках вязкопластических моделей.

- На основе разработанной схемы структурно-функциональных отношений при формировании плесов и перекатов вследствие образования в русле турбулентных струй, подобных свободным, качественно охарактеризован процесс установления динамически равновесного режима в формировании русла реки как проявление самоорганизации русловых процессов.

- Показано, что в развитии пойм процесс самоорганизации обеспечивается потоком материала, поступающего на пойму в паводок (F -поток), и размывом поймы (D -поток). Взаимодействие этих потоков направлено на достижение аттрактивного состояния, определяемого как динамически равновесное и характеризующего завершение формирования пойменной системы как целостности в конкретных внешних условиях.

- Процесс формирования делювиальной россыпи охарактеризован как самоорганизующийся, направленный на установление относительно постоянного соотношения фракций обломочных частиц (динамическое равновесие). Формирование продуктивного горизонта возможно только в таких внешних условиях, когда процесс разубоживания уравновешен процессами концентрации полезных ископаемых и скоростью разрушения коренного основания. Приведена модель высвобождения минералов в толще склоновых отложений, позволяющая оценить соотношение свободного и «связанного» минерала к моменту поступления его в русло реки; описаны принципиальные условия образования аллювиальных россыпей.

- Сформированы представления о динамических режимах и стадиях развития геоморфологических систем, характеристики которых зависят от интенсивности и динамики F - и D - литопотоков.

- Полученные теоретические результаты сопровождаются авторскими функциональными схемами, конкретными примерами по строению и развитию форм рельефа различного генезиса, математическими моделями.

Теоретическая и практическая значимость работы обусловлена возможностью использовать ее основные положения и выводы в дальнейших исследованиях, как методологического, так и прикладного плана.

Результаты исследования дополняют теоретические представления о геоморфодинамике и самоорганизации. Изложенные результаты и положения открывают возможность математического моделирования эволюции геоморфосистем, прогнозных оценок изменений форм рельефа при различных внешних воздействиях.

Материалы диссертации могут быть использованы в учебных курсах вузов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных, всероссийских и региональных научно-практических конференциях и семинарах, таких как: Всероссийский научный семинар «Самоорганизация устойчивых целостностей в природе и обществе» (Томск, 2000 г.); XXVII Пленум Геомор-

фологической комиссии РАН «Самоорганизация и динамика геоморфосистем в условиях техногенного освоения территорий и потепления климата» (Томск, 2003 г.); Международная научная конференция «Перспективы синергетики в XXI веке» (Белгород, 2003 г.); Всероссийская молодежная школа-семинар «Проблемы устойчивого развития в современной географической науке и образовании» (Томск, 2004 г.).

По теме диссертационного исследования опубликовано 7 работ, 2 работы находятся в печати.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 175 названий. Работа изложена на 164 страницах, включая 22 рисунка и таблицу.

В 1-й главе «Методологические основы синергетического подхода к исследованию рельефа» дано обоснование исследования геоморфосистем методологическими возможностями синергетики, определяются принципиальные положения работы. Геоморфологические системы рассматриваются как целостные самоорганизующиеся системы, динамика которых обеспечивается взаимосвязанными и взаимообусловленными литопотоками двух типов: *F*-потоками, за счет которых формы рельефа образуются, и *D*-потоками, ведущими к деградации рельефа.

Во 2-й главе «Особенности самоорганизации в склоновых системах» показано, что отношения между взаимодействующими элементами склоновой системы и внешними факторами определяют закономерности формирования, поддержания или смены структуры и соответствующее морфологическое выражение.

В 3-й главе «О некоторых эффектах самоорганизации в русловых процессах и закономерностях россыпеобразования» рассматриваются структурная и функциональная организация систем «плес-перекат» и «пойма», формирование ореолов рассеяния полезных минералов как отражение эволюции речной долины.

4-я глава «Самоорганизация геоморфосистем: динамические режимы и циклы развития» посвящена анализу некоторых особенностей эволюции геоморфосистем как динамических целостностей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Геоморфологические системы вместе с создающими их литопотоками представляют собой целостные образования, развивающиеся на основе самоорганизации и саморегуляции в результате действия прямых и обратных связей.

Любой геоморфологический процесс возможен лишь в условиях массоэнергообмена, то есть преобразование элементов рельефа есть движение вещества, связанное с изменением их энергии. Поэтому развитие геоморфосистем обеспечивается за счет поступлений вещества и энергии из внешней среды и выделения их из системы за ее границы. Потоки вещества и энергии, определяющие развитие геоморфосистем, представляем как *F*-потоки, за счет которых осуществляется образование и поддерживается существование форм рельефа, и как *D*-потоки, ведущие к деградации форм и их моделировке.

F-поток – это фактор, создающий неоднородности в среде. *F*-поток питает систему веществом и энергией и поэтому служит первопричиной ее образования и развития. Действие *F*-потоков направлено на увеличение выходных характеристик

геоморфосистем, например, размеров (высоты H , площади поверхности S , объема вещества V , заключенного в форме рельефа, и т.д.).

Действие D -потоков ведет к уменьшению выходных характеристик геоморфосистем: размеров форм рельефа, расхода обломочного материала во флювиальных потоках и т.д.

Наличие потоков предполагает, что существуют процессы, скорости которых отличны от нуля, то есть состояние системы во времени меняется. Геоморфологическую систему, функционирующую в некоторой внешней среде, можно охарактеризовать вектором состояния $\bar{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, определенным набором переменных величин x_1, x_2, \dots, x_n , значения которых при заданном времени описывают состояние системы. Для различных геоморфологических систем x_i могут быть компонентами поля скоростей, плотностью, координатами, характеризующими высоту, ширину, длину формы рельефа и т.д.

В силу данных определений для F - и D -потоков, можно утверждать, что если внешняя среда непосредственно влияет на процессы, характеризующиеся как F -поток, то есть « F -поток формируется на среде», то для D -потока определяющим является сама система, процессы изменения состояний системы, её размеров, зависящие от внешних условий, то есть « D -поток формируется на конкретной системе и среде» (Поздняков, 2003). Тогда эволюцию геоморфосистемы можно описать как

$$\frac{\partial}{\partial t} x_i(t) = P(x_i, t) - Q(x_i, P, t), \quad (1)$$

а принципиальная схема функционирования геоморфосистем будет выглядеть так, как представлено на рис. 1.

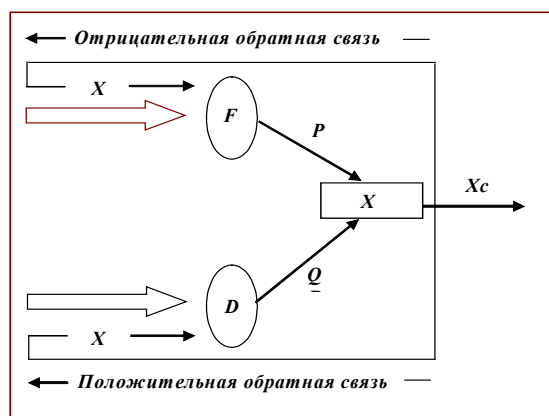


Рис. 1. Принципиальная схема функционирования геоморфосистем (по А.В.Позднякову, с дополнениями автора). P и Q – расход вещества соответственно в F - и D -потоках; X_c – характеристики форм рельефа в стационарном режиме; \Rightarrow – внешние потоки ΔT , ΔM , ΔW , формирующие F - и D -потоки

С ростом системы, по мере приближения форм рельефа по размерам и продуктивности к некоторой критической величине, обусловленной особенностями внутреннего строения и функционирования, уменьшается расход вещества и энергии в F -потоке. Количество поступающей массы или энергии контролируется обратной отрицательной связью: чем больше становится система, тем меньше вещества она накапливает. Эта закономерность наблюдается в развитии различных геоморфосистем. Так, в динамике поймы с возрастанием её высоты уменьшается количество

вещества, выпадающего на поверхность поймы в паводки; в почвенном слое с приближением его мощности к предельной величине уменьшается амплитуда колебания температуры, и скорость дезинтеграции материнских пород убывает; на подводном береговом склоне с увеличением его ширины все более теряется энергия волн, и абразия берегов затухает и т.п.

Если система в данных внешних условиях достигает своих предельных размеров, то её функции сводятся к переработке поступающих из среды вещества и энергии в другие их формы и выделению их во внешнюю среду в том же количестве. Рост системы прекращается, и она повторяет себя по содержанию и по форме. Самоподдержание достигнутого уровня развития и существование системы на данном этапе обеспечивается действием механизма *саморегуляции*, когда отрицательная обратная связь контролирует степень рассогласования характеристик системы с их предельными значениями.

В *D*-потоке функцию регуляции выполняет положительная обратная связь: чем больше система, тем интенсивнее идут процессы, определяемые как *D*-поток. Так, в эрозионном процессе в качестве регулятора выступает величина стока, которая возрастает по мере развития ложбины стока за счет увеличения площади водосбора. По закону положительных связей происходит нарастание площади поверхности обломков при выветривании. Количество обломочных частиц в заданное время тем больше, чем больше их было в предыдущий период. Длительное положительное обратное воздействие подводит систему к критическому уровню и завершается (в зависимости от внешних условий и внутренних возможностей системы) или разрывом связи, или такой ситуацией, когда энергетические ресурсы контрагентов, участвующих в напряженном взаимодействии, исчерпываются. Таким образом, положительная связь выводит систему на процесс *самоорганизации*, тем самым, по-своему, решая проблему существования геоморфосистем.

Таким образом, и саморегуляция, и самоорганизация в геоморфосистемах становятся возможными благодаря взаимодействию элементов системы и установлению определенных обратных связей между ними при соответствующих начальных и граничных условиях (управляющих параметрах).

Поскольку динамика любой геоморфологической системы требует согласованного развития подсистем разного характерного времени внутри неё, то в результате со временем устанавливаются такие функциональные связи между элементами (подсистемами) системы, что процессы в *F*- и *D*-потоках начинают идти в одном темпе, то есть увеличивается целостность геоморфосистемы.

По определению, *D*-поток инициируется процессами, которые начинают действовать, только когда система накопит определенное количество вещества и энергии, то есть по истечении некоторого времени. Различие во времени образования, следовательно и по количеству вещества и энергии, сосредоточенного внутри потока, является причиной колебательного характера взаимодействия *F*-потока с *D*-потокком. Причем амплитуда колебаний с течением времени будет уменьшаться, поскольку геоморфосистемы диссипативны, что предполагает существование у системы асимптотического предела (при $t \rightarrow \infty$) – аттрактора. Это значит, что при достижении предельной формы рост системы должен прекратиться, то есть устанавливается стацио-

нарное состояние: $\frac{\partial}{\partial t}x_i=0$. Из (1) следует, что $P(x_i,t)-Q(x_i,P,t)=0$. Это соотношение показывает, что изменения в системе, вызванные влиянием внешней среды (F -поток), полностью скомпенсированы действиями процессов, формирующих D -поток, и характеризует условие динамического равновесия.

Как подчеркивает А.В.Поздняков (1998, 2003), стремление к достижению динамического равновесия определяется как целесообразное свойство любой целостной системы. Поэтому значения переменных x_i в системе, находящейся в состоянии динамического равновесия, являются её характеристическими показателями и объективно выполняют роль её аттракторов – целей системы (обозначим их как x_c). В каждой конкретной геоморфосистеме есть набор собственных подобных показателей, реализующихся за характерное время развития системы; следовательно, существует своя специфическая целесообразность. То есть состояние динамического равновесия представляет собой аттрактор и характеризует завершение этапа формирования системы как целостности в данных условиях.

Итак, любые геоморфологические системы есть результат взаимодействия потоков двух видов. Следовательно, любую форму рельефа можно рассматривать как систему, описание которой оптимально через соотношение F - и D -потоков: динамика размеров $X(t)$ таких систем пропорциональна разности между поступлением $P(t)$ вещества, энергии в потоке из среды (F -поток) и их расходом $Q(t)$ в D -потоке, формирующемся в теле системы X .

2. Структурная организация склоновой системы определяется взаимоотношением между количеством, составом продуктов выветривания, скоростью их денудации и, через обратные связи, с морфометрией. Общее целесообразное развитие системы – к динамическому равновесию, как их аттрактору – отражается в морфологических особенностях формирующихся склоновых образований.

Образование и развитие склонов, с закономерным соотношением их морфометрических характеристик, обусловлено тем, что рыхлый материал, в зависимости от его физико-механических свойств (главным образом, от значения вязкости), формирует наклонные поверхности определенной крутизны. В алгоритме разработанной нами (рис. 2) принципиальной модели самоорганизации склоновых систем показано, что их динамика определяется взаимодействующими литопотоками. В рассматриваемой самоорганизующейся геоморфосистеме в качестве F -потока, создающего необходимое для развития денудации вещество и потенциал энергии, выступают процессы выветривания, за счет которых мощность рыхлого покрова на склоне со временем растет. Следовательно, возрастают сдвигающие усилия, меняются вязкостные характеристики грунтов, что прямо определяет расход вещества на склоне.

Рельефообразующую роль литопотока D играют процессы денудации, тип которой зависит от консистенции вязкостно-пластических свойств выветрелого материала. Процесс денудации контролируется положительной обратной связью, обеспечивающей поддержку процессов на максимальном уровне, который допускается запасами выветрелого материала.

Роль внешнего воздействия, задающего скорость выветривания (следовательно, и расход вещества в F -потоке), играют такие факторы, как устойчивость пород, климатические характеристики, определяющие колебания температуры и влажности, тектонические движения, увеличивающие градиент поверхности.

К построению определенной структуры системы “кора выветривания” приводит совокупность процессов, поддерживаемых в основном двумя механизмами - делением обломков на части (дроблением) и поверхностным разрушением, которые контролируются как положительной, так и обратной отрицательной связью.

В заданных внешних условиях данная система будет характеризоваться балансом всех этих связей, развитых до определенного предела, а также свойством эмерджентности, так как механизмы разрушения горных пород в общем случае взаимосвязаны и протекают одновременно.

Следствием указанных свойств является формирование в системе механизма саморегулирования, направленного на сохранение инварианта системы – структуры системы. С увеличением мощности рыхлого чехла скорость выветривания пород на поверхности коренного основания затухает, что происходит вследствие обратного отрицательного воздействия. Если с поверхности начинается вынос продуктов выветривания (D -поток), то мощность рыхлого слоя будет расти только до тех пор, пока величина прироста мощности рыхлого слоя за определенное время не сравняется с мощностью слоя, удаляемого за то же время. Если же удаление продуктов выветривания прекратится, то мощность рыхлого чехла будет в тенденции расти до максимально возможной в данных условиях – M_{np} . Благодаря отрицательной обратной связи система способна в той или иной степени компенсировать возмущения, что ведет к поддержанию в заданных пределах, определяемых внешними условиями, мощности коры выветривания и скорости понижения поверхности коренного основания. Иными словами, мощность рыхлого чехла является регулируемым параметром, как и дифференциация обломочного материала в нем.

Принцип взаимодействия в системе « F -поток ↔ D -поток» состоит в следующем: F -поток увеличивает M мощность рыхлого чехла, а D -поток уменьшает ее. Если количество материала, удаляемого со склона, будет больше количества материала, отделяемого от коренной породы и вовлекаемого в склоновое движение, слой чехла обломков будет уменьшать свою мощность. Колебания влажности и температуры будут легче проникать в толщу коренной породы, разрушать ее и тем усилят поступление материала в сферу деятельности денудации.

При замедлении движения будет накапливаться большая толща продуктов выветривания, и вследствие этого коренная порода, защищенная чехлом обломков, будет выветриваться медленнее. В то же время при вязко-пластическом перемещении, например, если более мощный чехол обломков движется быстрее маломощного (при прочих равных условиях), снос станет происходить быстрее. Расход вещества в D -потоке прямо зависит от веса единицы объема, то есть от M . Так как с ростом M замедляется скорость выветривания пород, то расход вещества в литопотоке F экспоненциально затухает, а в $D(M)$, наоборот, растёт, что связано с увеличением веса рыхлого слоя и сдвигающего усилия.

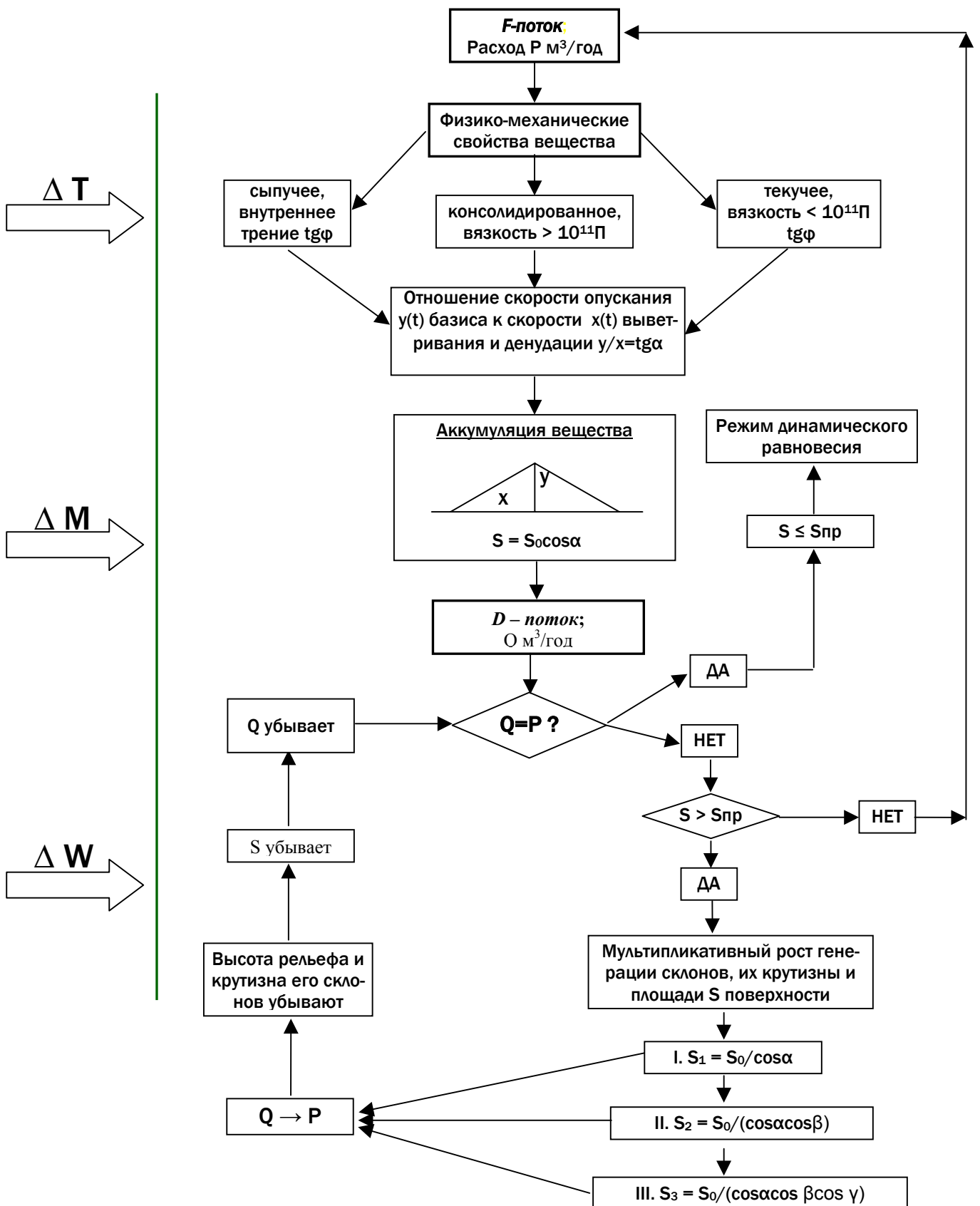


Рис. 2. Схема формирования склонов в результате взаимодействия F- и D-потоков.
 ΔT , ΔW , ΔM – характеристики вещества и энергии, поступающих в сферу деятельности потоков

Скорость денудации любого другого типа с ростом M также увеличивается.

В целом динамика склона в условиях тектонического покоя определяется взаимной регуляцией денудации и выветривания. При равномерном тектоническом поднятии площадь поверхности склона (рис.2) не превышает предельной и равна $S = S_0 / \cos \alpha$, где S_0 - площадь основания, проекция поверхности на горизонтальную плоскость. Процесс направлен на установление простого динамического равновесия, когда между элементами системы формируются такие функциональные отношения, что устанавливается равенство между скоростью выветривания и денудацией. С этого момента при сохраняющихся неизменными внешних условиях мощность рыхлого чехла, как и другие морфометрические характеристики склоновой системы, не меняются.

При тектоническом поднятии, интенсивность которого нарастает (F -поток), уклоны деформируемой поверхности увеличиваются, следовательно, растет и интенсивность D -потока, выражающегося теперь в виде эрозии и денудации. Формируются склоны следующей генерации, крутизна которых меняется как β или γ (рис.2). Площадь S склонов первой генерации равна $S_1 = S_0 / \cos \alpha$, а площадь поверхности склонов второй и третьей генераций возрастают, соответственно: $S_2 = S_0 / \cos \alpha \cos \beta$; $S_3 = S_0 / \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma$. То есть процесс нарастания площади склонов становится мультипликативным, развивающимся по закону обратных положительных связей. Пределом числу генераций склонов является баланс расходов вещества в литопотоках, устанавливающийся, когда поднятие поверхности и врезание рек станут равномерными. Мультипликативный процесс приводит к образованию сложнорасчлененного рельефа, подобного фрактальной структуре, причем степень расчленения поверхности нарастает от краев горных массивов к их центральным частям. В этом же направлении растет число (n) генераций, крутизна склонов и площадь их поверхности. Вследствие фрактального характера процесса эрозионного расчленения площадь поверхности формы рельефа зависит от собственных характеристик и от размерности границы поверхности. Фрактальные соотношения в росте числа генераций склонов и форм рельефа определяются тем, что формы рельефа, уменьшаясь в размерах в строгой последовательности, сохраняют еще и подобие. На рис. 3 показана структура фрактальных соотношений в нарастании числа форм и площади поверхности для склонов крутизной 32° и нарастание их генерации от первой до седьмой, соответствующей особо высокой степени эрозионного расчленения поверхности (Лялин, Поздняков, 2004).

Рисунок характеризует упорядоченность смены иерархии форм и склонов по их размерам и свидетельствует о закономерности мультипликативно развивающегося процесса.

Таким образом, динамика склонов, обусловленная взаимодействующими F - и D -потоками в условиях различной активности тектонических движений, выветривания и денудации, в пределе ведет к формированию поверхности равновесия различной морфологической сложности. В процессе развития склона к состоянию динамического равновесия формируются устойчивые и упорядоченные соотношения между

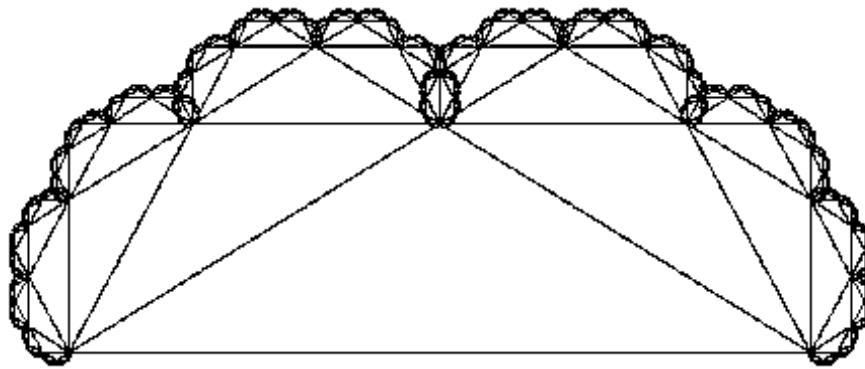


Рис. 3. Фрактальная характеристика сложнорасчлененного рельефа из 7 поколений склонов при $\alpha=32^\circ$ (Лялин, Поздняков, 2004).

морфологическими элементами склона. Транспортировка обломочного материала через его вязкость строго определенным образом проявляется в профиле склонов. Процесс изменяет профиль склона таким образом, чтобы не был нарушен баланс вещества, задаваемый выветриванием и равновесием взаимодействующих сил.

3. В соответствии с заданными условиями процесс образования делювиальных россыпей направлен на установление относительно постоянного соотношения фракций обломочных частиц (динамическое равновесие). Результатом этого является закономерное формирование продуктивного горизонта.

Методологические подходы, основанные на раскрытии сути взаимодействия литодинамических потоков в образовании форм рельефа различного генезиса, представляют разносторонний практический интерес. В диссертационном исследовании демонстрируется один из примеров применения данной методики к описанию механизма концентрации частиц с большим удельным весом и формирования россыпи на склонах, в процессе выветривания горных пород и денудации продуктов разрушения.

Формирование россыпи – сложный, многофакторный процесс, обусловленный развитием всей речной долины как целостности. Совокупный результат зависит от динамических свойств составляющих геоморфологическую систему «речная долина» подсистем «склон» и «русло». Образование, перемещение и накопление обломочного материала, частью которого являются полезные минералы, обусловлены особенностями данных подсистем и меняются вместе с изменениями соотношения расходов вещества в литопотоках и их специфики.

Чтобы выявить пути образования и развития россыпи, прежде следует установить количественные характеристики эрозионных и денудационных процессов, в результате которых минералы с большим удельным весом из рудного состояния переводятся в свободное (в россыпь); изучить пространственное и временное распределение участков образования, перемещения и концентрации полезных компонентов в рыхлом материале.

В процессе образования и развития россыпи важным моментом является соотношение нескольких составляющих (видов движений): траектории движения рудо-содержащих обломков в теле коры выветривания (почвогрунтов); распределения

мощности коры выветривания по профилю склона; зависимости скорости выветривания коренных пород от мощности коры выветривания; скорости высвобождения тяжелых частиц из вмещающих пород; траектории движения свободных частиц с большим удельным весом и др.

Для выявления эволюции россыпи необходимо определить выходные характеристики геоморфосистемы. Несомненно, что среди них важнейшими являются параметры продуктивного горизонта движущегося по склону слоя коры выветривания, или почвогрунтов. А они определяются соотношением расходов различных видов вещества в движущемся по склону слое коры выветривания. Иными словами, в процессе россыпеобразования наиболее значимыми являются гранулометрическая дифференциация продуктов выветривания и ее изменение по продольному профилю склона. Концентрация тяжелых частиц в продуктивном горизонте тем больше, чем больше разница в скоростях движения обломков вмещающих пород («пустой» породы) и свободных тяжелых частиц; вместе с тем концентрация тяжелых частиц возрастает тем больше, чем больше удаляется «пустой» породы. Вследствие этого функции F -потока в данной самоорганизующейся системе выполняют процессы выветривания не только рудосодержащих коренных горных пород, но и самих обломков руды в теле движущегося слоя почвогрунтов.

Роль D -потока выполняют здесь процессы денудации, которые при этом рассматривать в качестве сплошной среды нельзя. Необходимо следить за поведением отдельных обломочных частиц (не только с большим удельным весом, но и обломочных частиц вмещающих пород) в процессе образования коры выветривания, перемещения слоя продуктов выветривания по склону и вертикального перераспределения частиц в зависимости от их веса и крупности. Поэтому при решении данной задачи наиболее сложным является характеристика D -потока – изменение не только мощности движущегося слоя продуктов выветривания, но и его физических свойств в целом и отдельных частиц в частности.

Изменение во времени мощности рыхлого чехла в какой-либо точке склона определяется разностью между поступлением грунта с вышележащих частей и его выносом вниз по склону, то есть величиной $\partial P / \partial x$ (поток $P \text{ м}^3 / \text{т}$ обломочного материала вниз по склону):

$$P = igM^3 / 3v, \quad (2)$$

с одной стороны, и скоростью Q образования грунта в F -потоке на том же участке единичной ширины - с другой:

$$\partial M / \partial t = Q - \partial P / \partial x. \quad (3)$$

Здесь $Q = k\gamma$, где k - коэффициент разрыхления (отношение объема грунта к объёму породы, из которой он образован), γ - интенсивность выветривания коренного основания (толщина слоя, разрушающегося за единицу времени). Анализ этого уравнения показывает, что через время $\tau = \max\{\tau_1, \tau_2\}$, где $\tau_1 = M / Q$ – характерное время образования рыхлого покрова, а $\tau_2 = 3vL / giM^2$ (L - базис склона) – характерное время перераспределения обломочного материала на поверхности склона, устанавливается равновесное распределение мощности рыхлого чехла, и при решении многих задач можно считать $\partial M / \partial t = 0$. Тогда, интегрируя по x уравнение (3) и учиты-

вая (2), получаем связь между крутизной склона и мощностью рыхлого чехла на нем:

$$iM^3 = \frac{3Qv}{g}x = \chi x, \quad (4)$$

Таким образом, пространственное перераспределение продуктов выветривания по поверхности склонов во многом определяется его дисперсностью, от которой зависят влагоудерживающая способность грунтов и, следовательно, их вязкопластические свойства – способность к перемещению под действием силы тяжести. Диспергированностью обломочного материала полностью определяется степень высвобождения рудных минералов из вмещающих пород и возможность их концентрации и формирования россыпных месторождений.

После высвобождения из вмещающих пород, тяжелые минералы участвуют в двух движениях: перемещаются вместе с рыхлым чехлом по склону со скоростью V_x и одновременно погружаются в вязком грунте из-за большей плотности (удельного веса) со скоростью v , определяемой формулой Стокса:

$$v = a^2 \Delta \rho g / 18 f \rho_0 \nu, \quad (5)$$

где a - линейные размеры минералов, $\Delta \rho = \rho - \rho_0$, а f – безразмерный коэффициент, значение которого зависит от формы минералов; для реальных частиц он меняется в пределах от 0,5 до 1.

Погружение со скоростью (5) не обязательно приведет к перемещению минералов к коренному основанию, поскольку оно вследствие выветривания отстывает. Погружающаяся в грунте частица сможет достичь только такого уровня, на котором скорость ее погружения уравнивается вертикальной составляющей скорости перемещения грунта V_y (Ройхваргер, 1983). Этот уровень и есть продуктивный горизонт, положение которого описывается величиной m - расстоянием от дневной поверхности, то есть глубиной залегания. По мере движения рыхлого чехла по склону, одновременно с изменением его мощности меняется и положение в нем тяжелых минералов. Условием формирования продуктивного горизонта можно считать постоянство абсолютной $m = const$ или относительной $m/M = const$ глубины залегания тяжелых минералов.

Ясно, что если плотность минералов (или их размер) мало отличается от плотности грунта, то $m \approx 0$. Чем больше величина $a^2 \Delta \rho$, тем глубже залегает соответствующий продуктивный горизонт. Минералы разных размеров и разных плотностей могут находиться на одном горизонте, если для них одинаково значение $a^2 \Delta \rho$. И при $a^2 / a^{*2} = 1$ (a^{*2} - критический размер минералов) $m = M$, то есть продуктивный горизонт будет лежать на самом коренном основании. Он будет представлен частицами, у которых скорость погружения v равна скорости Q удаления нижних слоев грунта от поверхности коренного основания. Все минералы с большим значением $a^2 \Delta \rho$ станут оседать, образуя делювиальную россыпь, условием формирования которой будет:

$$a^2 \geq a^{*2} = 3i\rho_0 M^3 / \Delta \rho \chi. \quad (6)$$

Из этой формулы следует, что факторами, благоприятствующими образованию россыпей склонового ряда, являются крупный размер и большая плотность выделе-

ний полезного ископаемого в коренном источнике, а также малые мощности рыхлого чехла и наклон дневной поверхности. Формула (6) позволяет не только качественно, но и математически оценить возможность формирования россыпи на конкретном склоне. Поскольку мощность рыхлого чехла определяется параметром $\chi = 3Qv/g$, условия формирования россыпи улучшаются с уменьшением вязкости грунта и скорости выветривания коренных пород. Еще одним важным фактором увеличения концентрации частиц с большим удельным весом в рыхлом чехле склонов является оптимальное соотношение характерного времени τ_s развития склона (формирования рыхлого чехла и движения его по склону) и характерного времени τ_a высвобождения полезных минералов из вмещающих пород. Если процессы выветривания пород коренного источника $\tau_a = h/Q$ (h – высота склона) длятся меньше времени $\tau_s = h/iV_x(M - m)$ (времени движения продуктов выветривания от места нахождения коренного источника тяжелых минералов на склоне к его базису денудации), то тяжелые минералы не выйдут за пределы склона и их концентрация будет только нарастать.

Тяжелые минералы после высвобождения из вмещающих пород, мигрируя одновременно вглубь по профилю рыхлой толщи и сползая вместе с ней по склону, будут формировать обогащенный слой на некотором расстоянии L ниже по склону.

Как было отмечено В.В.Поликарпочкиным и А.В.Поляницыным (1973, 1976), процессу концентрации частиц с большим удельным весом в рыхлом движущемся по склону чехле продуктов выветривания препятствуют процессы диффузии – перемешивание слоев, осуществляющееся за счет разности скоростей их движения, то есть dV_x/dy . Эта же величина представляет собой угловую скорость вращения обломков, которое и приводит к перемешиванию слоев. Отсюда следует, что интенсивность перемешивания зависит еще и от гранулометрического состава: с увеличением крупности обломков до некоторого предела скорость перемешивания возрастает.

Тогда уравнение, описывающее поведение концентрации N минералов в рыхлом чехле склона с учетом диффузии, можно записать как

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -div[(V + v)N] + \gamma + div(kgradN). \quad (7)$$

Находящаяся в левой части уравнения (7) скорость изменения концентрации в данной точке рыхлого чехла есть результат трех процессов: направленного движения минералов по координатам x, y , их высвобождения со скоростью γ из пустой породы и диффузии k .

Отсюда следует, что для увеличения концентрации частиц в рыхлом слое продуктов выветривания недостаточно, чтобы они имели больший удельный вес, чем вмещающая порода. Сам по себе больший, чем у рыхлой породы, удельный вес минералов не может приводить к увеличению их концентраций на глубине, по сравнению с первоначальной в месте высвобождения. Для образования россыпи (увеличения концентрации тяжелых частиц) требуется выполнение двух условий. Во-первых, необходимо уменьшение мощности коры выветривания за счет удаления глинистой, песчаной, пылевой фракции и в растворенном виде внутригрунтовым стоком и по-

верхностным смывом. Во-вторых, при достижении динамического равновесия в развитии склона на всем протяжении его профиля баланс продуктов выветривания должен быть постоянен (следовательно, относительно постоянной будет и мощность коры выветривания), а скорость вертикальной составляющей движения тяжелых частиц должна быть больше скорости приращения толщины коры выветривания. Тогда рудосодержащие обломки, перемещаясь по склону в теле грунтов и разрушаясь, будут выделять частицы металла, которые будут накапливаться на поверхности коренного основания, формируя россыпь.

Согласно логике предлагаемой модели, вероятность образования концентрированных россыпей полезных ископаемых больше, если рудосодержащие породы рассеяны по площади склона. Тогда концентрация частиц металла в россыпь возможна даже в случае малых содержаний его в коренных рудопроявлениях. Узколокальные рудопроявления, даже с очень высокими содержаниями полезного компонента, менее благоприятны для образования россыпных месторождений полезных ископаемых.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Процессы самоорганизации структур с образованием геоморфосистем различного ранга являют себя вследствие существования объективных причин. Так, элементы природной среды, в силу действия всеобщих законов (гравитации, термодинамики и т.п.), вступают в функциональные отношения, образуя геоморфосистемы различных порядков, которые, взаимодействуя между собой, выходят на другие геоморфосистемы более высоких порядков, с качественно иными свойствами. Системы всех порядков вступают в функциональные взаимодействия с составляющими их элементами или подсистемами, вызывая направленные изменения количественных характеристик выходных параметров (обратные положительные и отрицательные связи). В процессах геоморфодинамики тенденция к самоорганизации осуществляется через внутренние взаимодействия и внешние управляющие воздействия.

В геоморфологических системах функции регулятора для определения величины рассогласования между аттрактивным и текущим состоянием системы выполняют их размеры, связанные обратными связями с процессом поступления вещества и энергии таким образом, что с увеличением размера системы уменьшается количество подводимых в систему вещества и энергии.

2. Любые геоморфологические системы есть результат взаимодействия потоков двух видов: образующего и поддерживающего систему F -потока и ведущего к деградации форм D -потока. Следовательно, любую форму рельефа можно рассматривать как систему, развитие которой зависит от пространственных и временных характеристик её F -потока и D -потока. Динамика размеров $X(t)$ таких систем пропорциональна разности между поступлением $P(t)$ вещества, энергии в потоке из среды (F -поток) и их расходом $Q(t)$ в D -потоке, формирующемся в теле системы.

3. Дисбаланс вещества и энергии при взаимодействии положительного и отрицательного потоков может определять как различные стадии развития форм рельефа, так и степень их устойчивости. Согласно сделанным обобщениям, геоморфоло-

гические системы представляют собой *циклически развивающиеся структуры*. Эта цикличность составляет внутреннюю закономерность геоморфологических процессов. Геоморфологическая система проходит следующие стадии развития: стадия зарождения организации ($P(t) \rightarrow \max, Q(t) = 0$) \Rightarrow стадия прогрессивного развития (совершенствование структуры и увеличения размеров системы, сопровождающиеся уменьшением энтропии; $P(t) > Q(t), Q(t) \rightarrow P(t)$) \Rightarrow динамически равновесный режим (подвижное равновесие; $P \approx Q \approx \text{const}$) \Rightarrow деградация системы, когда несоответствие функционального и организационного устройства системы внешним условиям вызывает перестройку структурных отношений.

4. Экстремумы в системе, находящейся в состоянии динамического равновесия, являются её характеристическими показателями и объективно выполняют роль ее аттракторов – целей системы. В каждой конкретной геоморфологической системе есть набор собственных экстремумов, реализующихся (не нарушая данного качественного состояния) за характерное время развития системы; следовательно, существует своя специфическая *целесообразность*. То есть, состояние динамического равновесия представляет собой аттрактор и характеризует завершение этапа формирования системы как целостности, что позволяет говорить о *направленности* геоморфологических процессов.

5. Геоморфологические системы, как динамические системы, обладают различными по сложности эволюционными режимами. В развитии форм рельефа можно выделить несколько основных *динамических режимов*, в зависимости от интенсивности и динамики F и D литопотоков. В каждом из этих режимов формы рельефа отличаются особенностями морфологии, определенным уровнем структурно-функциональной организации и энтропии. Фундаментальным принципом поведения самоорганизующихся геоморфосистем является периодическое чередование стадий увеличения интенсивности процессов и их стабилизации. По мере приближения к аттрактивной цели, формирующейся в соответствии со структурой функциональных отношений системы и условий среды, интенсивность развития системы затухает, процессы стабилизируются, система входит в режим динамического равновесия.

6. Выявленные особенности самоорганизации в развитии геоморфосистем и их математическое выражение имеют большое значение в разработке теории геоморфологии и ее прикладных аспектах. Знание их позволяет раскрывать сущность геоморфологических явлений и в определенных случаях управлять ими.

Практическая значимость рассмотренных закономерностей состоит в том, что они являются основой для дальнейшей разработки динамических моделей эволюции рельефа как в районах с антропогенной и техногенной нагрузкой, так и в естественных условиях. Они позволяют численно проследить динамику склонов, речных долин, что важно для решения прогнозных задач, в частности, для выявления степени концентрации полезных ископаемых и формирования россыпей, а также для разработки адаптационных способов управления руслом, обеспечивающих самосохранение флювиальных систем.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Невидимова О.Г., Поздняков А.В., Литвин А.И., Процессы самоорганизации в развитии склонов и формировании россыпей полезных ископаемых // Самоорганизация геоморфосистем (Проблемы самоорганизации. Вып. первый). – Томск: ТНЦ СО РАН, 1994. – С. 50-62.

2. Невидимова О.Г., Поздняков А.В. Самоорганизация турбулентных струй, подобных свободным, и формирование речного русла // Самоорганизация геоморфосистем (Проблемы самоорганизации. Вып. 3). – Томск: Изд-во ТНЦ СО РАН, 1996. – С. 61-65.

3. Невидимова О.Г. О концептуальных положениях синергетической парадигмы // Самоорганизация устойчивых целостностей в природе и обществе. Матер. 4-го Всерос. науч. семин. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – С. 168-171.

4. Невидимова О.Г., Поздняков А.В. Математическое моделирование формирования поймы // Геоморфологической комиссии РАН. Томск, 25 августа–2 сентября 2003 г.: - Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2003. – С. 119-121.

5. Невидимова О.Г. Самоорганизация и динамика геоморфосистем: Материалы XXVII Пленума Г., Мельник М.А., Поздняков А.В. Фрактальные соотношения и динамические режимы в процессах рельефообразования (доклад) // Самоорганизация и динамика геоморфосистем: Материалы XXVII Пленума Геоморфологической комиссии РАН. Томск, 25 августа–2 сентября 2003 г.: - Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2003. – С. 122-126.

6. Невидимова О.Г., Мельник М.А., Лялин Ю.В. Фракталы в геоморфосистемах (доклад) // Перспективы синергетики в XXI веке: Сборник материалов Междун. науч. конф. В 2 т. – Белгород: Изд-во «Белаудит», 2003. – Т. 1. С. 203-208.

7. Невидимова О.Г. Феномен устойчивости: эволюционная интерпретация // Пробл. устойчивого разв. в современной географической науке и образовании: Материалы Всерос. молодежной школы-семинара. Томск, ТГУ, 27–28 апреля 2005 г. – Томск: Дельтаплан, 2005.

8. Невидимова О.Г. Quantitative regularities in floodplainformation // Geomorphology and Earth System Science: BGRG Annual Conference, June 28–30, 2006 (в печати).