

Кузнецов Александр Сергеевич

**Системно-энергетический анализ динамики рельефообразующих процессов
(на примере горноледникового бассейна Актру, Горный Алтай)**

Специальность 25.00.25 – Геоморфология и эволюционная география

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Томск 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Поздняков Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **Савичев Олег Геннадьевич**, доктор географических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, кафедра гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии, профессор

Мистрюков Анатолий Александрович, кандидат географических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, лаборатория геоинформационных технологий и дистанционного зондирования, старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова”**

Защита состоится 9 ноября 2012 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.15, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Национальный исследовательский Томский государственный университет”, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан 8 октября 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Хромых Валерий Спиридонович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень разработанности проблемы.

Любые самоорганизующиеся структуры в течение некоторого времени находятся в состоянии установившегося режима развития. Между ними и средой постоянно происходит массо- и энергообмен, вызывающий нарушение равновесия в системах. Самоорганизация и саморегулирование – не что иное, как развитие и внутренняя перестройка структур, обусловленная существованием противоречивых тенденций и постоянных изменений, направленных на приведение их в соответствие с меняющимися условиями. Эти тенденции определяют взаимодействие подсистем и составляют внутренний сущностный процесс в системе. Рассматривая геоморфосистемы как операционально-замкнутые структуры, можно наглядно проследить весь процесс самоорганизации и саморегулирования, как отдельных элементов, так и всей системы в целом. Самоорганизация сложной системы есть результат спонтанного стремления к динамическому равновесию. *Операционально-замкнутая геосистема (далее ОЗС) представляет собой самоорганизующуюся структуру, динамика которой обуславливается поступлением вещества и энергии из среды и обратными положительными и отрицательными связями, действующими в самой геоморфосистеме, а также на входе и во всей системе в целом* (Поздняков, 1988, 2005).

Применение системного подхода в геоморфологии в нашей стране началось в основном с середины XX в., благодаря работам В.Б. Сочавы (1973), А.Д. Арманда (1963, 1988 и др.), А.В. Позднякова (1973, 1975, 1976, 1988), О.В. Кашменской (1980), Ю.Г. Симонова (1976). Значительный вклад в основы методологии систем и ее практического применения был внесен трудами Н.И. Маккавеева (1955 и др.) и Р.С. Чалова (1986, 2008), рассматривающих русловой поток как саморегулирующуюся систему. Было дано определение понятию *геоморфологическая система и ее элементы* (Поздняков, 1974, 1975). Стали применяться математические методы описания динамики рельефа (Девдариани, 1967; Московкин, Трофимов, 1978 и др.), объективно предполагавшие рассмотрение процессов рельефообразования в зависимости от пространственного перераспределения вещества, что возможно с позиций системного подхода (Поздняков, Ройхваргер, 1980).

Наибольшее научно-теоретическое значение имели исследования, в которых впервые раскрывается роль и механизм действия обратных отрицательных связей в формировании и развитии форм рельефа различного генезиса (Поздняков, 1976, 1988). В частности, выявлены основные принципы авторегуляции в динамике форм рельефа. Показано, что заданными величинами в процессах геоморфодинамики являются размеры форм рельефа – их морфометрические характеристики, включая и объемы, которые они могут достичь в установившихся условиях поступления вещества и энергии (Поздняков, 1988). А в последующих исследованиях было доказано, что состояние динамического равновесия в динамике различных систем, в том числе и систем косной среды (геосистем), характеризуется балансом расходов вещества и выполняет роль своеобразного аттрактора (Поздняков, 2002).

Данные теоретические положения легли в основу настоящего диссертационного исследования, проводившегося на примере *горноледникового бассейна Актру* (далее – басс. Актру).

Басс. Актру расположен в горах Алтая и занимает юго-восточную часть горного узла Биш-Иирду Северо-Чуйского хребта. Район исследования охватывает преимущественно высокогорную часть бассейна, нами рассматриваются только верховья р. Актру, ограниченные замыкающим створом в конце долинного зандра. Относительно

замкнутая форма объекта исследования исключает транзит вещества через бассейн, а вынос материала осуществляется в основном водным потоком р. Актру.

Данный район, ставший, по всеобщему признанию, одним из репрезентативных природных объектов общероссийской и международной значимости для изучения и проведения режимных наблюдений за динамикой геосистем, является научно-исследовательской базой Томского государственного университета. Тем не менее, научной интерпретации накопленной фактической информации на основе системной методологии практически нет до сих пор. В данной работе горноледниковый басс. Актру исследуется как ОЗС; это первая попытка системного анализа природных объектов подобного плана.

Целью диссертационного исследования является установление основных закономерностей и особенностей динамики геоморфосистемы басс. Актру с позиции самоорганизации и энергетического подхода. Для достижения цели ставились следующие **задачи**:

- Определить основные методологические положения и терминологический аппарат теории самоорганизации и энергетического анализа.
- Охарактеризовать горноледниковую геоморфосистему Актру как операционально-замкнутую структуру, с выделением функциональных характеристик и внутрисистемных связей.
- Выявить особенности динамики и саморегуляции основных бинарных структур геоморфосистемы Актру.
- Провести оценку энергетического потенциала рельефа исследуемой территории.
- Составить карту геоморфодинамики Актру.

Личный вклад автора. В основу диссертационного исследования положены результаты экспедиционных исследований на стационаре Томского госуниверситета Актру: изучалась динамика пространственного перераспределения (расхода) продуктов выветривания в зависимости от особенностей морфометрии, экспозиции склонов, гидротермического режима грунтов и пр.

Впервые с целью определения скорости накопления материала в пойме р. Актру, а также возраста селевых отложений в исследуемом районе, использовались современные методы дендрохронологического анализа. Была произведена GPS-съёмка конусов аккумуляции, моренных комплексов и отложений селевых потоков для дальнейшего их картографирования. Проведены работы по определению твёрдого стока р. Актру в створе на выходе р. Актру, в пределах зандрового поля (район географического стационара ТГУ) и на замыкающем створе верховий бассейна. Определены скорости движения материала осыпных аккумулятивных тел. Проведено дешифрирование космических и аэрофотоснимков для составления карт геоморфодинамики и выявления энергетического потенциала горноледникового бассейна Актру. Определено содержание моренного материала в глетчерном льду долинных и плосковершинного ледников.

Полевые исследования проводились автором в составе экспедиций, организованных Лабораторией самоорганизации геосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в полевые сезоны 2008–2010 гг. под руководством проф. А.В. Позднякова. Значительную помощь в организации и проведении исследований оказывали сотрудники лаборатории: с.н.с. П.С. Бородавко, н.с. А.В. Пучкин и н.с. О.Г. Невидимова. Использовались многочисленные литературные источники, опубликованные по соответствующей тематике.

Результаты исследования и их научная новизна:

- впервые горноледниковая геоморфосистема рассматривается как открытая, операционально-замкнутая бинарная структура с набором функциональных отношений между элементами;

- впервые для горноледникового бассейна Актру проведена оценка энергетического потенциала. Составлена карта-схема распределения удельного энергетического потенциала;
- составлена карта геоморфодинамики Актру с определением количественных характеристик рельефа и рельефообразующих процессов.

Результаты исследований дополняют теоретические основы системного анализа геоморфологических систем.

Изложение материала диссертационного исследования сопровождается авторскими функциональными схемами, конкретными примерами по строению и развитию генетически неоднородных геоморфологических систем

Практическая значимость. Изложенные результаты и положения открывают возможность прогнозных оценок эволюции форм рельефа в условиях изменяющегося климата и увеличения антропогенной нагрузки на различного рода геосистемы, а также возможность их дальнейшего использования в исследованиях как методологического, так и прикладного плана.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Геоморфологическая система Актру является открытой самоорганизующейся операционально-замкнутой структурой, представляющей собой совокупность бинарных подсистем.

2. Динамика и развитие современных экзогенных процессов определяется энергетическим потенциалом, сосредоточенным в формах рельефа горноледникового бассейна Актру.

3. Картографическое отображение закономерностей динамики и направленности потоков массо- и энергообмена в современных экзогенных процессах раскрывает закономерности формирования геоморфологической системы Актру.

Апробация работы. Результаты исследований использовались при разработке проекта по плановой тематике Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН: проект *“Трансформация энергетических характеристик геосистем в условиях глобальных климатических изменений”* по Программе фундаментальных научных исследований СО РАН VII.63.1. *“Природно-климатические изменения и их последствия для Сибири в современных условиях глобального потепления и антропогенных воздействий”* (2010-2012 гг.); докладывались на международных, всероссийских и региональных конференциях, симпозиумах и семинарах, таких как: Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (Томск, ИМКЭС СО РАН 2009); VI Щукинские чтения *“Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты”* (Москва, МГУ, 2010); Международная конференция *“Динамика геосистем и оптимизация природопользования”* (Иркутск, ИГ СО РАН 2010); Всероссийская конференция с международным участием *“Рельеф и экзогенные процессы гор”* (Иркутск, ИГ СО РАН 2011) и др.

По теме диссертационного исследования опубликовано 9 работ, в том числе 2 из них в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 198 наименований, и 5 приложений. Работа изложена на 152 стр., включая 51 рисунок и 1 таблицу. Все рисунки и таблица являются авторскими либо содержат авторские уточнения, дополнения.

В первой главе – **“Методологические основы исследования динамики геоморфологических систем”** рассматривается становление системного подхода и теории самоорганизации в географии, а также приводятся основные физико-географические характеристики объекта исследования.

Во второй главе – “**Энергетическая характеристика операционально-замкнутой бинарной структуры геоморфосистемы Актру**” рельеф басс. Актру рассматривается как бинарная структура; дается характеристика изменения энергopotенциала в процессе денудации рельефа.

В третьей главе – “**Бинарные операционально-замкнутые структуры геоморфосистемы Актру**” выделены и описаны основные элементы басс. Актру, дан анализ их функциональных характеристик и внутрисистемных связей, рассмотрены особенности геоморфологической динамики.

Четвёртая глава – “**Картографическое отображение геоморфологической динамики экзогенных процессов геоморфосистемы Актру**” посвящена методам картографирования динамики с определением и отображением количественных характеристик рельефа и рельефообразующих процессов.

В заключении в краткой форме изложены основные выводы и подведены итоги диссертационного исследования.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю профессору, д.г.н. А.В. Позднякову за повседневное внимание к моей работе, научные консультации в ходе выполнения работы; коллективу лаборатории СГС за неоценимую помощь и поддержку при написании и оформлении работы; сотрудникам лаборатории лесных экосистем ИМКЭС СО РАН, а также сотрудникам кафедры гидрологии ТГУ, а именно Ю.К. Нарожному, Л.Н. Шантыковой, В.В. Паромову, за оказанную помощь и консультации при полевых исследованиях.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Геоморфологическая система Актру является открытой самоорганизующейся операционально-замкнутой структурой, представляющей собой совокупность бинарных подсистем.

Впервые механизмы самоорганизации бинарных структур были рассмотрены в исследованиях А.В. Позднякова (1988, 2006). Им было показано, что все самоорганизующиеся системы можно рассматривать как бинарные структуры. А именно: развитие какого-либо процесса $X(t)$ сопровождается образованием и развитием совокупности сопутствующих ему других процессов $Y(t)$. Для них процессы $Y(t)$ и формы их внешнего проявления (в данном случае рельеф) выполняют функцию своеобразной экологической емкости, поставляющей для процессов вещество, энергию и информацию. Выходной характеристикой $W(t)$ такой бинарной структуры является форма их внешнего выражения, в основном такие морфометрические показатели, как объем $V(t)$, площадь $S(t)$, высота $H(t)$ и пр. (Поздняков, 2011; Кузнецов, Поздняков, 2012). Динамика такой структуры описывается нелинейным уравнением:

$$dW/dt = X(t, W) - Y(t, W) + f(U), \quad (1)$$

где $f(U)$ – антропогенная управляющая функция, если она присутствует (например, при формировании горнодолинных водохранилищ или при проведении каких-либо защитных мероприятий, снижающих риски развития нежелательных процессов).

Нами эти методологические подходы были впервые применены к описанию динамики рельефообразующих процессов в энергетических оценках на примере басс. Актру. В результате проведенного исследования выделены бинарные геоморфоструктуры первого и второго порядков. К первому порядку относится бинарная геоморфоструктура Актру, а второй порядок образуют следующие геоморфосистемы: обвально-аккумулятивные склоны; долинные ледниковые потоки (Малый Актру, ледники Большого Актру), плосковершинный ледник (Водопадный); зандр Актру; оползневые склоны.

Принципы саморегулирования бинарных геоморфосистем

Рельеф и составляющие его формы, независимо от размеров, создаются и развиваются вследствие одновременного действия двух типов энергомассообмена. Первый тип определяется работой сил, создающих первичные неровности; это эндогенные силы, обуславливающие дифференцированные тектонические движения, благодаря чему создаются первичные неровности и, соответственно, энергетический потенциал; второй тип образуют различные виды экзогенных процессов, в ряду которых по рельефообразующей значимости главное место занимают эрозионные процессы.

Все они, включая процессы дефляции, селективного выветривания и пр., имеют главное сходство в принципах саморегу-



Рисунок 1 – Схема структурно-функциональных отношений в бинарной геосистеме

лирования. Создающаяся каким-либо геоморфологическим процессом форма рельефа (рис. 1) и характеризующий ее гравитационно-энергетический потенциал (подсистема $X(t)$) обуславливают формирование в пределах подсистемы $X(t)$ нового гравитационно-энергетического потенциала, предполагающего развитие рельефообразующих процессов и соответствующих им форм рельефа и образование подсистем $Y(X, t)$, $Z(Y, t)$.

Подсистемы $Y(X, t)$; $Z(Y, t)$,... играют роль обратной отрицательной связи, ингибирующей развитие процессов в подсистеме $X(t)$, в результате такого взаимодействия достигается баланс (динамическое равновесие) в расходах вещества (Поздняков, 1988; Кузнецов, Поздняков, 2012).

Системой $X(t)$ в басс. Актру является рельеф, формирование которого происходит за счёт эндогенного поднятия вещества земной коры – поступления массы и энергии (ME) из среды в F -потоке. Одновременно с поднятием горного массива получают возможность развития процессы денудации, нивелирующие тектонические формы рельефа, т.е. происходит формирование системы “спутника” $Y(t)$ и создаваемого им D -потока ME (Поздняков, 1988) в виде комплекса эрозионно-денудационных процессов. Основой функционирования системы $Y(t)$ являются ME, отдаваемые системой $X(t)$ в D -потоке.

Характеристика системы $X(t)$

Формирование басс. 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 (Богачнин Б.М., 1981). 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 (Девяткин Е.В., Ефимцев Н.А. и др., 1963). 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 (Душкин, 1967).

Таким образом, *F*-поток (формирующим систему) является эндогенный литопоток, характеризующийся следующими показателями: *V* – объем вещества земной коры, выводимый в сферу гипергенеза, м³/год (объем вещества, необходимый для самоорганизации эрозионных процессов); *P* – объем вещества земной коры, выведенный в сферу гипергенеза на единицу площади. Это объем вещества, необходимый для самоорганизации пространственного перераспределения продуктов выветривания денудационными процессами.

Деятельный объем вещества, выведенный в сферу эрозионной переработки (*P*), заключенный между вершинной и базисной поверхностью, для Актру составляет 43,89 км³. Следовательно, с учетом скорости тектонического поднятия осевой части горного узла Биш-Иирду 1,5–2 см/год (Душкин, 1967), ежегодно в область гипергенеза за счет эндогенного (*F*) литопотока поступает до 630000 м³ вещества (расход вещества *Q*).

Характеристика системы *Y(t)*

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

Основным потоком *ME*, формирующим систему *Y(t)*, является *D*-поток. Эрозионно-денудационные процессы характеризуются объемом расхода вещества (*Q*), удаляемого с единицы площади (м³/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 объем материала, поступающий в систему *Y(t)* в *F*-потоке, в течение года в среднем составляет около 107145,2 м³.

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 геоморфосистемы Актру. В результате исследований нами был определён среднесуточный сток взвешенных наносов на выходе из системы, переносимых водным потоком р. Актру; объем стока составляет около 84000 м³/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 басс. 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 басс. Актру восстанавливается вплоть до начала XXI в.

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 (Петкевич, 1973).

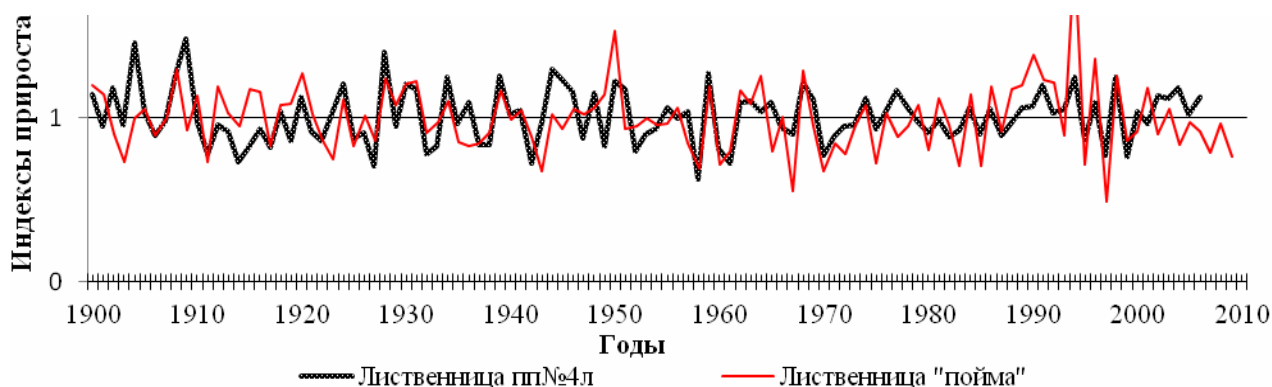


Рисунок 2 – Индексы радиального прироста лиственницы, произрастающей на склонах (пробная площадь №4 – пп.№4л) и в пойме р. Актру

Современное развитие геоморфосистемы Актру происходит на фоне активного поступления ME 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 геоморфосистемы Актру, констатируем, что наблюдается значительная доля аккумуляции вещества в системе $Y(t)$.

Подобным образом функционируют геоморфосистемы второго порядка, что более подробно рассмотрено в диссертационной работе.

2. Динамика и развитие современных экзогенных процессов определяется энергетическим потенциалом, сосредоточенным в формах рельефа горноледникового бассейна Актру.

Традиционные методы, применяемые при характеристике природных процессов, в силу их гетерогенности и значительных различий по характерным временам развития, существенно затрудняют количественную оценку динамики процессов в их взаимодействии. Это противоречие можно преодолеть, если динамику систем характеризовать в энергетических единицах измерения. Автор не ставил целью дать исчерпывающую характеристику данной глобальной проблемы в силу того, что ее исследование находится только в самом начале. Цель рассмотрения некоторых составляющих экзогенных процессов пространственного перераспределения вещества состояла в том, чтобы на конкретном примере выявить принципиальную возможность применения новой методики и дать предварительную оценку ее практической значимости.

Потенциальная энергия, произведенная эндогенными процессами. Рельеф территории Алтая, частью которого является басс. Актру, был создан дифференцированными сводово-глыбовыми тектоническими деформациями земной коры. Вся совокупность процессов пространственного перераспределения продуктов выветривания в этом районе осуществляется за счет расходов потенциальной гравитационной энергии, обусловленной эндогенными движениями. Дать точную количественную характеристику этой энергии затруднительно. Тем не менее, средние ее значения вполне вычисляемы. Для этого необходимо определить поверхности сравнения, относительно которых изменяются численные показатели расходов потенциальной энергии.

Потенциальная энергия, применительно к процессам рельефообразования, – это энергия, создаваемая гравитационными силами, действующими на поднятое над поверхностью сравнения геологическое тело. Работа гравитационных сил, т.е. затраты энергии на перемещение вещества, зависит только от начального и конечного положения тела (и не зависит от формы поверхности). В данном случае поверхностью сравнения считается базисная поверхность в пространстве (границах), образуемая множест-

вом точек, по абсолютной высоте равная высоте тальвегов речных долин. Ее можно получить геометрическим вычитанием (Философов, 1975) положительных форм рельефа – водоразделов всех порядков.

Другой поверхностью сравнения является вершинная поверхность в том же граничном поле, образуемая множеством точек, по абсолютным высотам соответствующая высотам водоразделов; она может быть получена также вычитанием отрицательных форм рельефа – речных долин. Таким образом, можно определить объем V геологического тела, ограниченного поверхностями сравнения, его массу m и высоту центра тяжести поднятого тектоническими процессами блока земной коры:

$$E = cVgh/2, \quad (2)$$

где c – плотность (в среднем для Актру 2700 кг/м^3), среднее превышение над базисной поверхностью h , g – ускорение силы тяжести. Абсолютная высота базисной поверхности в границах рассматриваемой территории составляет 2000 м , вершинная поверхность, в пределах которой сохранились фрагменты меловой поверхности выравнивания, составляет в среднем 3500 м . В таком случае потенциальная энергия E , созданная эндогенными силами, составляет $12,50 \cdot 10^{11} \text{ МДж}$. Это энергетический потенциал слаборасчленённого блока земной коры, выведенного в сферу эрозионного преобразования.

Таким образом, энергетический потенциал территории является энергией, запасённой в формах рельефа, которая используется в дальнейшем для развития и обеспечения динамики процессов (в данном случае экзогенного рельефообразования).

Расход потенциальной энергии на перемещение продуктов денудации. Формирование рельефа Актру осуществлялось совокупным действием процессов селективного выветривания, эрозионного расчленения, ледниковой экзарации, химического растворения данного объема геологического тела и пространственного перераспределения образующегося при этом вещества. Скорость протекания процессов полностью определялась устойчивостью горных пород к перечисленным агентам рельефообразования. Суммарный энергопотенциал современной геоморфосистемы Актру, рассчитанный по (2), составляет $5,23 \cdot 10^{11} \text{ МДж}$, или $11,10 \cdot 10^3 \text{ МДж/м}^2$.

Энергия, затраченная на формирование рельефа басс. Актру, т.е. на перенос объема вещества (около 19 км^3), составляет $7,27 \cdot 10^5 \text{ МДж}$, за счёт чего и образованы все отрицательные формы рельефа.

По нашим данным (Кузнецов, Поздняков, 2012), а также по данным других исследователей (Колюшкина, 1965; Обыскалов, 2002 и др.), на зандровую поверхность ежегодно в среднем поступает до $107145,2 \text{ м}^3$ материала. В свою очередь, через замыкающий створ бас. Актру водным потоком выносятся до $84000 \text{ м}^3/\text{год}$ частиц во взвешенном состоянии. Следовательно, современная денудация всей площади поверхности рельефа басс. Актру составляет $2\text{--}3 \text{ мм/год}$. Учитывая данные обстоятельства, можно определить расходы E_p , во времени, за которое удаляется слой продуктов выветривания толщиной в h (мм/год) со всей площади поверхности рельефа Актру. Тогда суммарный объем удаляющегося материала по весу T_c будет определяться следующим простым выражением:

$$T_c = \frac{S_0}{\cos \alpha} p, \quad (3)$$

где $p = hcg$, c – плотность пород, кг/м^3 , g – ускорение свободного падения. Суммарный расход гравитационной потенциальной энергии примет вид:

$$E_p = T_c h, \quad (4)$$

где E_p расход энергии на перемещение вещества со всей площади от вершинной до базисной поверхности.

Учитывая скорость современной денудации рельефа бассейна Актру, E_p составляет 5,0 МДж/год.

Это общий расход энергетического потенциала в течение года. Но некоторая его часть остаётся в геоморфосистеме Актру, так как значительная доля взвешенных наносов (около 22,5%, см. выше) аккумулируется в пределах долинного зандра. О наличии пойменной аккумуляции также свидетельствует образование внутренней дельты на зандре Актру и занесение прикорневых частей деревьев, произрастающих в пойме реки. Повышение поверхности поймы (как было отмечено выше) составляет 3–4 мм/год (Кузнецов, Поздняков, 2012).

Ежегодно на пойменную аккумуляцию расходуется около 0,2 МДж энергии. Следовательно, расход гравитационного энергетического потенциала на выходе из геоморфосистемы Актру составляет 4,80 МДж/год, что обеспечивает динамику рельефообразующих процессов в басс. Актру по всей площади, от вершинной поверхности до базисной.

Для наглядного представления распределения энергетического потенциала в пределах границ басс. Актру были выделены участки, где господствующим является определённый геоморфологический процесс. Для каждого из участков определены относительная высота (H) над базисной поверхностью, площадь (S). При вычислении массы горных пород была взята средняя плотность 2700 кг/м^3 . Для осыпей и моренных участков средняя плотность составляет 1800 кг/м^3 . На основании полученных данных была составлена карта распределения удельного энергетического потенциала в пределах басс. Актру (рис. 3). Карта составлена по способу картограммы в следующей градации:

- $E_{уд} > 5 \cdot 10^3$ МДж – высокое значение (участки с интенсивным развитием экзогенных процессов – частые камнепады, обвалы горных пород и снежно-ледовых масс);
- $E_{уд} 5-1$ – умеренное (участки с достаточно интенсивным протеканием экзогенных процессов, с периодическими обвалами горных пород, а также с интенсивным развитием солифлюкции);
- $E_{уд} 1-0,1$ – низкое (участки с интенсивным развитием солифлюкции, селевых и оползневых процессов приурочены в основном к местам распространения аккумулятивных тел);
- $E_{уд} < 0,1$ – очень низкое (районы с менее интенсивным развитием экзогенных процессов, это, в основном, морены, выровненные водораздельные поверхности, долинный зандр).

Также в разработанной нами ГИС подсчитана площадь склонов с различным значением удельного энергетического потенциала, данные представлены на рис. 4.

Из рис. 3, 4 видно, что с увеличением площади возрастает и запас удельного энергетического потенциала, по количеству и площади преобладают склоны с удельным энергетическим потенциалом >5 и $5-1$. Это склоны преимущественно южной экспозиции и склоны с наибольшими углами наклона поверхности. Иными словами, более 80% площади характеризуется достаточно высоким уровнем энергетического потенциала, который обеспечивает динамику современных экзогенных процессов.

Таким образом, карта энергии рельефа исследуемой территории является зеркалом, отражающим скорость и особенности динамики современных экзогенных процессов: чем больше запас потенциальной энергии в рельефе, тем интенсивнее будут протекать современные процессы экзогенного рельефообразования (Кузнецов, 2010; Кузнецов, Поздняков, 2012).

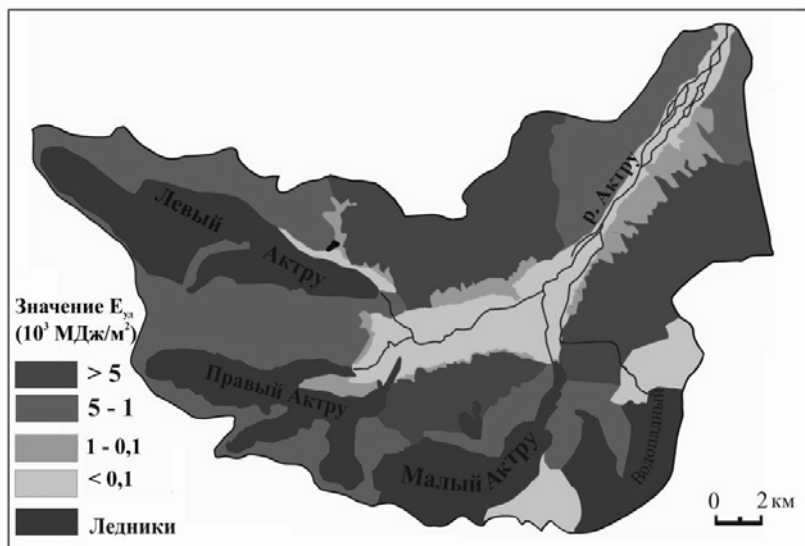


Рисунок 3 – Карта-схема распределения удельного энергетического потенциала ($E_{уд}$) в пределах басс. Актру

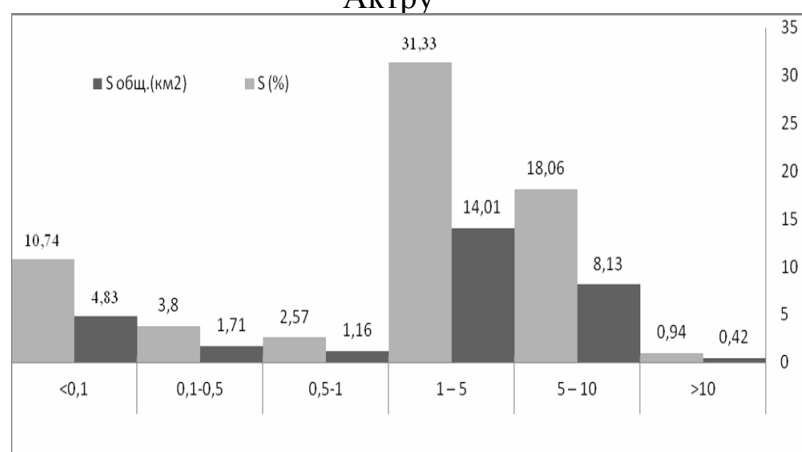


Рисунок 4 – Распределение площадей с различными значениями $E_{уд}$ (10^3 МДж)

венная характеристика изменения в пространстве границ геоморфосистем; 4) отражается граница, на которой баланс расхода вещества равен нулю, то есть динамически равновесная граница (приходная P и расходная Q части равны).

При работе с легендой к картам геоморфодинамики, в основу которой положена идея о рельефообразующих литодинамических потоках, первоначально определяется тип литопотоков и их динамическая характеристика (Pozdnyakov, 2005; Кузнецов, Поздняков, 2012).

Эндогенный литопоток (F)

V – объем вещества земной коры на единицу площади, выводимый в сферу гипергенеза, м³/1000 лет (слой, лежащий на базисной поверхности; определяется по глубине и средней скорости врезания рек). P – объем вещества земной коры, выведенный в сферу гипергенеза, м³ – объем, заключенный между базисной поверхностью и вершинной. Это объем вещества, необходимый для самоорганизации пространственного перераспределения продуктов выветривания денудационными процессами.

Для басс. Актру V составляет 86,52·км³ (или 2,06 км³/км²) – объем вещества, необходимый для самоорганизации эрозионных процессов. Средняя величина разгрузки земной коры для данного района соответствует данным для высокогорья, полученным Н.В. Гусловой (2004), и составляет 280–420 кг/см². Таким образом, значительную роль

3. Картографическое отображение закономерностей динамики и направленности потоков массо- и энергообмена в современных экзогенных процессах раскрывает закономерности формирования геоморфологической системы Актру.

Геоморфологическое картографирование является важной составляющей геоморфологических исследований.

При составлении карты геоморфологической динамики нами в основу была положена легенда, разработанная А.В. Поздняковым (1991 – рукопись; 2005), апробированная в лаборатории самоорганизации геосистем ИМКЭС СО РАН (Гуслова, 2004). Данная методика составления легенды характеризуется следующими принципами: 1) карты геоморфодинамики должны содержать сведения о количественной величине расхода вещества в литопотоках; 2) в количественной форме представляется информация о скорости и направлении процессов рельефообразования; 3) на картах и в пояснительной записке приводится количественная характеристика изменения в пространстве границ геоморфосистем; 4) отражается граница, на которой баланс расхода вещества равен нулю, то есть динамически равновесная граница (приходная P и расходная Q части равны).

в формировании рельефа басс. Актру имеют процессы тектонического поднятия, а дальнейшая разгрузка происходит за счет процессов эрозионного расчленения и денудации территории.

Деятельный объем P для горноледникового бассейна р. Актру составляет 38,09 км³. На 1 км² в среднем приходится 0,9 км³ горных пород, выведенных в сферу гипергенеза. За счёт тектонического поднятия осевой части горного узла Биш-Иирду ежегодно в область гипергенеза эндогенным (F) литопотоком выводится до 630000 м³.

Экзогенный литопоток (D)

Это эрозионно-аккумулятивный поток; объем вещества Q , денудированный с единицы площади (м³/год), определяется произведением мощности m денудированного слоя на площадь S_0 поверхности рельефа: $Q = mS_0/cos$; для басс. Актру Q составляет 84000 м³/год.

Скорость денудации рельефа басс. Актру, по нашим расчетам, составляет 1–3 мм/год. Таким образом, формирование рельефа басс. Актру происходит на фоне активного тектонического поднятия, вследствие чего в область гипергенеза поступает достаточный объем вещества, обеспечивающий динамику и развитие целого комплекса современных экзогенных процессов.

В основном в рельефе басс. Актру присутствуют:

- 1) формы рельефа, образованные литопотоками, вызванными течением льда и снега.
- 2) литопотоки и формы рельефа, образованные плоскостным и внутригрунтовым стоком, действующими в сочетании с криогенными процессами;
- 3) формы рельефа, формирующиеся литопотоками криогенного происхождения;
- 4) формы рельефа, образованные склоновыми литопотоками площадного действия, обусловленные действием веса продуктов выветривания;
- 5) формы рельефа, образованные литопотоками, вызванными действием влекущих сил струйных течений;

При составлении карты геоморфодинамики Актру в основу была положена топографическая карта масштаба 1:25000, материалы аэрофотосъемки, и космические снимки. Морфометрические характеристики форм рельефа определялись с использованием SRTM матриц. В качестве программного обеспечения мы использовали современные ГИС продукты MicroDEM Terrabase II, и MapInfo Professional.

В составленной нами карте геоморфодинамики басс. Актру (рис. 5) учтены все картографические принципы, методические подходы, описанные выше, присутствуют практически все вышеприведенные формы рельефа. На основе приведённой легенды возможно составление карт эколого-

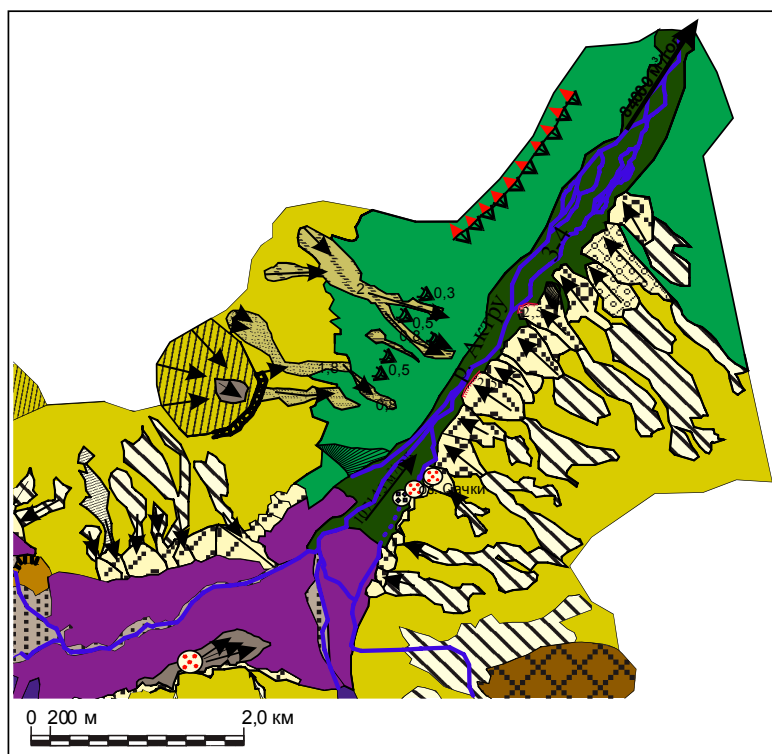


Рисунок 5 – Фрагмент карты геоморфодинамики басс. Актру

геоморфологического районирования территории с выделением опасных рельефообразующих процессов, скорости их протекания и пространственного распространения. Графическое отображение опасных рельефообразующих процессов позволяет выявить геоморфологически обусловленные риски при хозяйственном освоении территории, а также оценить влияние антропогенной деятельности на геоморфосистемы различного ранга.

Заключение

1. У основных элементов системы горноледникового бассейна существует внутренняя структура функциональных отношений как самоорганизующихся и саморегулирующихся бинарных систем более низкого ранга. Проведён анализ балансовых характеристик прихода (P) и составляющей расходной части (Q), как отдельных элементов, так и всей системы в целом. Анализ функциональных связей между элементами системы показал, что басс. Актру является операционально-замкнутой бинарной геоморфосистемой.

2. Морфометрический анализ рельефа позволил составить карту динамики геоморфологических процессов, на которой отображена направленность современных геоморфологических процессов, а также расходы вещества в них. Приведённые в работе расчёты интенсивности современных экзогенных процессов выявили общий темп денудации рельефа горноледникового бассейна, который соответствует общему показателю денудации для всей территории Горного Алтая – 1–3 мм/год, что позволяет сделать вывод о репрезентативности района не только в гляциоклиматологическом, но и в геоморфологическом плане.

3. На основе морфометрии рельефа определён энергетический потенциал исследуемой территории. Впервые для высокогорных районов определен энергетический потенциал отдельных форм рельефа, а также расход потенциальной энергии геоморфосистемой Актру в результате экзогенного преобразования рельефа.

4. Современное развитие геоморфосистемы Актру протекает на фоне активной деградации гляциального комплекса. В связи с перестройкой функциональных отношений происходит смена ледникового рельефа флювиальным, что наблюдается в районе распространения морен Большого Актру. На водоразделах Актру–Тетё и Актру–Кызылташ формируется криогенная геоморфосистема.

Основные результаты диссертационного исследования дополняют положения теории системного анализа геоморфосистем. Методика энергетического анализа требует дальнейшего развития, разработка ее идей позволит не только в наиболее полной мере охарактеризовать отдельные геоморфосистемы, но и сравнить, их стабильность при дополнительном поступлении энергии, как вследствие естественных процессов, так и при антропогенном воздействии на систему.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Кузнецов А.С. Энергетическая оценка динамики осыпных аккумулятивных склонов верховий горноледникового бассейна р. Актру / А.С. Кузнецов, О.Г. Невидимова // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 338. – С. 227–230.

2. Кузнецов А.С. Динамика развития геоморфосистем как бинарных структур, функционирующих с насыщением (на примере горноледникового бассейна Актру) [Электронный ресурс] / А.С. Кузнецов, А.В. Поздняков // Современные проблемы науки и образования : электрон. науч. журнал. – 2012. – № 2. – URL: <http://www.science-education.ru/102-5901> (дата обращения: 06.04.2012).

Публикации в других научных изданиях:

3. Кузнецов А.С. Динамика конусов аккумуляции горноледникового бассейна р. Актру (энергетический подход) [Электронный ресурс] / А.С. Кузнецов // Нелинейные феномены, хаос, критические явления и методы их исследования с помощью вейвлетного, кластерного и спектрального анализа в геоэкологических процессах : матер. Всерос. науч. школы для молодежи. – Электрон. дан. – Саратов : Новый ветер, 2009. – 1 DVD-диск.

4. Кузнецов А.С. Возможные изменения энергетических характеристик осыпных склонов горноледникового бассейна р. Актру, связанных с современным потеплением климата / А.С. Кузнецов // Матер. Восьмого Сибир. совещ. по климатологич. мониторингу / под ред. М.В. Кабанова. – Томск : Аграф-Пресс, 2009. – С.294–296.

5. Кузнецов А.С. К исследованию энергетического баланса высокогорных геоморфосистем юго-восточного Алтая (на примере горноледникового бассейна р. Актру) / А.С. Кузнецов, О.Г. Невидимова // Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты : VI Щукинские чтения : труды. – М. : Географ. фак-т МГУ, 2010. – С. 145-147.

6. Кузнецов А.С. Динамика горноледниковых геосистем юго-восточного Алтая (энергетический подход) / А.С. Кузнецов // Динамика геосистем и оптимизация природопользования : матер. Междунар. конф., посвящённой 105-летию со дня рождения акад. В.Б. Сочавы.– Иркутск, 2010. – С. 124–126.

7. Кузнецов А.С. Энергетические характеристики динамики конусов аккумуляции горно-ледникового бассейна р. Актру и их связь с современными климатическими изменениями / А.С. Кузнецов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2010. – № 1.– С. 104–108.

8. Кузнецов А.С. Энергетический потенциал ландшафтных и геоморфологических систем / А.С. Кузнецов // Природа и общество: взгляд из прошлого в будущее : матер. XVII науч. конф. молодых геогр. Сибири и Дальнего Востока. – Иркутск : Изд-во Ин-та геогр., 2011. – С. 31–32.

9. Кузнецов А.С. Современная экзарационная деятельность ледников горноледникового бассейна Актру (Центральный Алтай) / А.С. Кузнецов // Рельеф и экзогенные процессы : матер. Всерос. науч. конф. с междунар. Участием : в 2 т. – Иркутск : Изд-во Ин-та геогр. им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2011. – Т. 2. – С. 26–29.

Подписано в печать 05.10.2012 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 03/10-12
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а