

УДК 551.4

АСЕЕВ А. А.

О ПЛАНЕТАРНЫХ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В последние годы возрос интерес геоморфологов к развитию теории науки. Это объясняется двумя главными причинами: молодостью геоморфологии и общей тенденцией наук о Земле к внедрению системного подхода¹. С первой причиной связаны значительная эмпиричность геоморфологических знаний и пока еще невысокий уровень абстрагирования, необходимого для формирования зрелой теории. Вторая причина заставляет специалистов четко осмыслить предмет, основные парадигмы и методы каждой науки и определить ее место в общей системе родственных наук. Следует отметить, что современный этап развития теории геоморфологии некоторые исследователи, например, О. В. Кашменская [1], называют кризисом. Однако нет никаких оснований считать кризисом стремление точнее сформулировать и однозначно понять основные положения своей науки.

Главное и пожалуй единственное общепризнанное положение геоморфологии, ее закон, состоит в понимании рельефообразования как динамического взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов. Их относительная роль при этом взаимодействии рассматривается уже по-разному. На мой взгляд, наиболее правильным является представление, что относительное значение взаимодействующих факторов на разных уровнях организации может быть различным [2]. Эндогенная составляющая рельефообразования (и геоморфологической формаций) понимается Н. А. Флоренсовым [3] как восходящая ветвь литодинамического потока массы и энергии, а сумма деструктивных экзогенных процессов, направленных на снижение и выравнивание рельефа — как его нисходящая ветвь. При сочленении ветвей литодинамического потока возникает рельеф, морфология которого отражает закономерности движения масс и энергии внутри и на поверхности Земли.

ПЕРВЫЕ ПЛАНЕТАРНЫЕ МОДЕЛИ

Представления Н. А. Флоренсова рассмотрены О. В. Кашменской [1] с позиций системного анализа, который пока еще мало применялся в геоморфологии. Поэтому одна из первых попыток моделирования рельефа Земли, как сложной динамической системы, сделанная О. В. Кашменской, заслуживает особого внимания. Прежде всего необходимо отметить, что называя свой подход к геоморфологическим системам «системно-формационным», О. В. Кашменская этим термином невольно или сознательно подчеркивает большую «пригодность» учения о геоморфологических формациях Н. А. Флоренсова для применения теории систем. Между тем, системный анализ как общий инструмент познания не следует противопоставлять никакому конкретному методу исследования в геоморфологии: морфоструктурному, формационному или морфометрическому. Поэтому термины типа: «системно-формационный анализ» или «системно-морфоструктурный анализ» представляются совершенно излишними.

Неправильно и утверждение О. В. Кашменской, что «традиционные методы исследования, такие как сравнительно-исторический *входят* (под-

¹ Под системным анализом обычно понимается совокупность общетеоретических положений, облегчающих изучение сложных систем для выявления взаимоотношений частей и целого и последнего в качестве части более ёмкой системы.

черкнуто мною — А. А.) в системный подход, изменяясь соответственно новому уровню познания» [1, стр. 107]. Дело обстоит как раз наоборот: традиционные методы обогащаются положениями теории систем, что должно способствовать *совершенствованию* этих методов. Это принципиально важно, так как простое приспособление терминологии системного анализа к конкретным наукам уже показало свою полнейшую бесплодность. Медленное внедрение системного анализа в геоморфологию в значительной степени связано со стремлением исследователей применять сразу и как можно полнее весь хорошо разработанный понятийный аппарат теории систем независимо от фактической изученности конкретных объектов. Системный анализ требует, в частности, углубленного изучения механизма процессов рельефообразования.

Исходя из представлений Н. А. Флоренсова о литодинамических потоках, отражающих главное положение геоморфологии о взаимодействии эндогенных и экзогенных сил, О. В. Кашменская положила в основу системного анализа рельефа «определение удельного значения тектонических и денудационных сил в рельефообразовании» [1, стр. 111], т. е. балансовый метод. Такая постановка вопроса правомерна, но не исчерпывает проблему рельефообразования. Несмотря на важность балансового метода, который уже неоднократно применялся в геоморфологии Ю. А. Мещеряковым [4] и др., он не может служить единственной основой изучения геоморфологической системы, поскольку в рельефообразовании важны не только количества перемещаемого вещества и затрачиваемая на это энергия, но и механизмы рельефообразующих процессов. Не меньшие затруднения встречает предложение О. В. Кашменской определять «неотектоническую составляющую рельефообразования» в системе, сконструированной по методу «черного ящика», поскольку она не учитывает всей сложности механизма взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов и, в частности, инерционных свойств самого рельефа, записанных в его информационной памяти. Поэтому наблюдаемый рельеф не полностью соответствует современному состоянию взаимодействия процессов рельефообразования.

Не останавливаясь на других спорных взглядах О. В. Кашменской, например, представлениях о «геоморфологическом пространстве» и «геоморфологической форме движения», поскольку целесообразность введения этих понятий уже рассматривалась критически [5], укажем только, что неполнота конструируемой ею общей модели геоморфологической системы состоит и в принципиальном отказе от рассмотрения связей процессов рельефообразования с процессами протекающими в астеносфере, т. е. глубже «пространства» определяемого как «геоморфологическое». Вместе с тем, нельзя не отметить большую заслугу О. В. Кашменской как пропагандиста идей применения теории систем в геоморфологии.

Новый шаг в использовании системного анализа для конкретизации положения о взаимодействии эндогенных и экзогенных сил в планетарном масштабе был сделан в последних работах Н. И. Маккавеева [6, 7]. Им построена концептуальная модель системы: рельеф материков — астеносфера. Эта модель отражает круговорот рельефообразующего вещества, в верхней, экзогенной ветви которого преобладает перемещение продуктов денудации по направлению суша → океан, а в нижней, эндогенной — встречное течение астеносферного вещества от океана к континенту. Н. И. Маккавеевым подсчитан годовой объем денудации с континентов равный $11,9 \text{ км}^3/\text{год}$, при котором денудационный срез в среднем составляет 79 м за 1 млн. лет. При этом учитывается не только расход, но и небольшой приход вещества на континенты в результате экзогенных процессов (преимущественно эоловых), а также морская трансгрессия, вызываемая поступлением материала с суши (150 м), и коэффициент снижения интенсивности денудации вследствие убывания высоты материков и синхронного подъема базиса эрозии. При начальной средней высоте материков равной 870 м (средняя современная высота суши) и конечной высоте в 50 м время, необходимое для глобальной пенеплени-

зации, оценивается равным от 22 до 80 млн. лет в зависимости от принимаемой прочности по отношению к денудации пород, слагающих материки. Исходя из предположения, что скорость встречного горизонтального астеносферного потока от океана к континенту примерно равна скорости перемещения океанических плит, Н. И. Маккавеев оценивает время, необходимое для завершения нижней ветви круговорота в центре материков, в 20—30 млн. лет, т. е. величиной, соизмеримой с оценкой продолжительности глобальной пенеппенизации. Механизм последующего поднятия материков, знаменующего окончание пенеппенизации, Н. И. Маккавеев видит в субдукции океанической коры под материковую. Это вызывает поднятие материков и создает условия для новой пенеппенизации, которая теоретически (без эндогенных влияний) будет продолжаться до тех пор, пока экзогенный расход и приход вещества на поверхности суши не будет сбалансирован.

Указанную систему круговорота Н. И. Маккавеев рассматривает как *автокколебательную*, в которой нижняя (эндогенная) ветвь круговорота поддерживается за счет тепловой энергии Земли и разности горизонтальных градиентов давления, вследствие изостатической неуравновешенности снивелированного материка, а верхняя (экзогенная) — за счет той же силы тяжести и солнечной энергии, преобразованной атмосферными процессами. *Пульсационный* режим системы Н. И. Маккавеев объясняет свойствами вещества астеносферы, которая как очень вязкая (структурная) жидкость оказывает большое сопротивление при приведении ее в движение, но затем вязкое сопротивление ее значительно убывает. При малых скоростях движения (порядка см/год) и высоких температурах (выше 500°С) даже небольшие горизонтальные градиенты давления, созданные денудационной разгрузкой материков, достаточны для движения магмы от океана под материк до тех пор, пока градиенты давления почти сравниваются, т. е. материк достигнет изостатического равновесия.

Нисходящий (экзогенный) и восходящий (эндогенный) потоки в «пульсационной» системе Н. И. Маккавеева функционируют поочередно. Подкоровые потоки приводятся в движение после значительного «облегчения» материка в результате денудационного срезания как бы случайными причинами, какими могут быть землетрясение, вулканизм, быстрое таяние ледников.

Концептуальная модель Н. И. Маккавеева утверждает не только соизмеримость, но и равноправие в механизме функционирования системы экзогенной и эндогенной составляющих на самом высшем иерархическом уровне геоморфологических систем, на котором ведущими обычно считаются эндогенные процессы. Впрочем на этом уровне механизм процессов рельефообразования до сих пор почти не рассматривался.

При всей подкупающей логичности и тщательном количественном расчете денудационного сноса с континентов модель Н. И. Маккавеева не преодолевает ряда трудностей. В экзогенной части системы не учитывается, что большая часть денудированного с суши материала отлагается в пределах шельфа и материкового склона, которые на планетарном уровне изучения тоже относятся к материкам, а также материкового подножия, где обычно проходит граница между земной корой континентального и океанического типов. Границы шельфа при трансгрессиях, сопровождавших пенеппенизацию материков, должны были расширяться, а прогибы, лежащие в основе материкового подножия, углубляться под тяжестью накапливающихся в них осадков. Главная трудность, которую нужно преодолеть при рассмотрении эндогенной ветви системы, состоит в объяснении длительной изостатической неуравновешенности материков в эпохи пенеппенизации, что противоречит представлениям о чуткости механизма изостатической компенсации. Само представление о поочередном действии экзогенных и эндогенных сил, т. е. об их разорванности во времени и «случайности» причин, вызывающих начало изостатического уравнивания, представляется маловероятным. Впрочем и Н. И. Маккавеев считал весьма возможной смену выравнивания новым восходящим развитием рельефа раньше достиже-

ния предельного выравнивания, чему могла способствовать более значительная денудационная разгрузка гор, чем равнин, и связанная с этим растущая локальная изостатическая неуравновешенность, которая должна вызывать приток магмы к их корням, способствуя омоложению старых горных стран. Рассмотрение этих вопросов потребует в дальнейшем привлечения геофизических данных.

ОБЩНОСТЬ ПОГРАНИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ ЗЕМЛИ

Высшей иерархической ступенью системной организации рельефа Земли является в сущности поверхность самой планеты, имеющая форму геоида, которая как известно определяется, с одной стороны, космическими экзогенными силами, выраженными в особенностях ее ротационного режима, а с другой — гравитационной дифференциацией образующего планету вещества, обусловившей деление его на ядро и все другие сферические оболочки (включая гидросферу и атмосферу). Вместе с тем реальный рельеф Земли только приближенно соответствует поверхности геоида, а его наибольшие отклонения от последней образуют материковые выступы и океанические впадины. Поэтому форму Земли как планеты правильно рассматривать в качестве надсистемы для геоморфологических систем самого высшего ранга. Форма Земли является надсистемой и для всех других пограничных систем, обладающих своим рельефом, осложняющим границы разных оболочек и сред (литосферы и астеносферы, мантии и ядра).

Основное свойство этой надсистемы — земное тяготение. Его влияние на все пограничные подсистемы проявляется в стремлении каждой границы земных оболочек занять положение изопотенциальной поверхности. Однако на всех границах сред существуют отклонения от формы изопотенциальной поверхности, вызываемые плотностными неоднородностями. Это и есть рельеф поверхности данной оболочки Земли, обусловленный «антигравитационными» силами². Рельеф поверхности литосферы или собственно рельеф Земли в этом отношении не отличается от «рельефов» более глубинных ее оболочек. Существенная разница состоит в том, что наиболее важной «антигравитационной» силой создающей рельеф Земли является поступление к этой границе сред тепловой энергии как внутриземной, так и солнечной, тогда как все более глубокие границы оболочек искажаются только за счет неравномерного выделения внутреннего тепла и вызываемого этим возникновения плотностных неоднородностей.

Таким образом гравитационное поле Земли обеспечивает устойчивое *существование* (функционирование) всех подобных геоморфологической пограничных систем, а «антигравитационные», преимущественно тепловые воздействия, создающие его нарушения, определяют *развитие* таких систем в пределах, ограничиваемых высокой степенью устойчивости самой системы. При этом следует отметить неравномерность проявления указанных воздействий в пространстве и времени. Это означает, что энергия, расходуемая на нарушения изопотенциальности пограничных систем, поступает импульсами или пульсирующими потоками (струями, течениями), которые в твердых оболочках Земли могут вызывать физико-химические изменения, равносильные пространственному смещению их границ.

Восходящие потоки энергии или вещества близ границ сред часто приобретают горизонтальную составляющую. В соответствии с законом сохранения массы потоки сочетаются с противотечениями, создающими в совокупности тепловую или гравитационно-тепловую конвекцию, в том

² В качестве «антигравитационного» по отношению к гравитационному полю Земли выступает, например, влияние Луны, т. е. сила взаимного притяжения. Последняя на еще более высоком уровне организации (планета — спутник) находится в полном соответствии с законом всемирного тяготения. На планетарном уровне организации она возмущает гравитационное поле Земли и поэтому может условно рассматриваться как «антигравитационная».

числе и в недрах Земли [8 и др.], поскольку плотностная дифференциация материала там еще не закончилась или возникает вновь благодаря радиоактивному распаду. Явление конвекции, столь свойственное подвижным оболочкам Земли, в «твердой» Земле сосредотачивается в горизонтах астеносферного типа, которых в настоящее время известно по меньшей мере три.

Возвращаясь к геоморфологическим системам, отметим, что на *всех уровнях их организации* существуют те же противоборствующие силы: сохранение и упорядочение гравитационного поля и его нарушения. Взаимодействие эндогенных и экзогенных сил в формировании рельефа часто понимают как стремление эндогенного фактора нарушить изопотенциальность поверхности твердой оболочки Земли, а экзогенного — восстановить ее с помощью механизма денудация — аккумуляция. С позиций системного анализа правильнее рассматривать это взаимодействие в качестве более сложного интегрального результата борьбы гравитационных и «антигравитационных» (на данном уровне организации системы) сил как в эндогенных, так и в экзогенных процессах. Главное их различие состоит в источниках энергии, нарушающих изопотенциальность земной поверхности, т. е. ее идеальную равнинность: тепловой энергии Земли (для эндогенной составляющей) и Солнца (для экзогенной составляющей). При этом подобно солнечной энергии, тепловая энергия Земли воздействует на рельеф сложно опосредствованно.

В сфере действия экзогенных процессов «антигравитационными» становятся все формы рельефа, отклоняющиеся от поверхности постоянного гравитационного потенциала, т. е. от идеальной равнинности. Они создаются в процессе выравнивания несмотря на то, что общая направленность экзогенных процессов, на 60—80% связанных с движением воды, определяется гравитационными силами. Это объясняется (вне зависимости от эндогенного фактора) *неравномерным* во времени и пространстве проявлением экзогенных процессов и, в первую очередь, различиями водообеспеченности, которая, в свою очередь, имеет первоисточником неравномерное поступление солнечного тепла. Поэтому, например, денудационное выравнивание горной страны осуществляется через промежуточную стадию расчленения.

В сфере действия эндогенных рельефообразующих процессов двойственная роль принадлежит изостазии. С одной стороны, общая изостатическая уравновешенность литосферы или крупных ее частей, как бы «плавающих» по астеносфере, является проявлением гравитационной упорядоченности, а ее нарушения — проявлением «антигравитационных» сил как эндогенного, так и экзогенного происхождения. С другой стороны, восстановление изостатического равновесия часто выступает в качестве «антигравитационной» силы в формировании рельефа, что иллюстрируется рассмотренной выше моделью Н. И. Маккавеева, где выравнивание рельефа выступает как фактор нарушения изостатического равновесия, а поднятие и расчленение соответствует его восстановлению. Это показывает, что выравнивание гравитационной неоднородности на одной границе сред может вести к ее нарушениям на другой. Важнейшая роль изостазии в формировании рельефа потребует от нас вернуться к ней несколько ниже. Сейчас отметим только, что восстановление нарушений изостатического равновесия иногда связано со значительными горизонтальными перемещениями вещества приобретающего текучесть. «Горизонтальная составляющая перемещения масс внутри Земли, как правило, не меньше, чем горизонтальные перемещения вещества на поверхности Земли, обусловленные экзогенными процессами» [4, стр. 19].

Некоторые из изложенных общих положений об особенностях пограничных природных систем типа рельеф рассматривались ранее специалистами разных наук о Земле³, но для соблюдения системного принципа исследований представляется необходимым переосмысление исходных, даже самых бесспорных представлений.

³ На формирование системных представлений автора, в частности, оказала влияние работа В. Н. Солнцева [10].

Котловины океанов и выступы материков образуют высшую категорию планетарных форм рельефа — геотектур первого ранга, а следовательно и высшую иерархическую ступень геоморфологических систем. Как уже отмечалось нами ранее [11], им соответствует высший ранг тектонических структур. Их различает не только свойственный каждой из этих геотектур тип земной коры и ее мощность, но и положение основных границ раздела литосферы. Различна под океанами и материками и мощность астеносферы. Поэтому есть все основания полагать, что в отличие от геотектур более низких рангов их функционирование и развитие отражают структурные связи рельеф — мантия, на которых мы остановимся несколько ниже.

В размерно-генетической классификации И. П. Герасимова [12] важное место принадлежит стабильным (равнинно-платформенным) и мобильным (шовным зонам) геотектурам, развитым как в пределах континентов, так и в пределах океанов. Первые представляют в тектоническом отношении материковые и океанические платформы, вторые — орогенные и геосинклинальные пояса. С позиций тектоники литосферных плит — это зоны спрединга⁴, субдукции и обдукции. Они также обладают своими особенностями в составе и мощности земной коры [13]. Среди них выделяются континентально-океанические шовные зоны с особым переходным типом земной коры. В функционировании этих систем — геотектур второго ранга проявляются преимущественно плотностные неоднородности в пределах литосферы и особенно на границе с астеносферой. Однако в зонах спрединга и субдукции существенна также роль астеносферных процессов.

К третьей категории геотектур могут быть отнесены отдельные типы платформенных равнин и горных стран, обладающие свойственным только им историческим типом геоморфологического и тектонического развития. Разумеется, они должны обладать и своими особенностями глубинного строения, которые, к сожалению, с этих позиций еще не исследовались. Можно полагать, что основные плотностные неоднородности, т. е. глубинные пределы формирующих их структур находятся в земной коре и отчасти на ее границе с верхней мантией (М).

Попытка сопоставления планетарных геотектур (по работам И. П. Герасимова) и глубинных геотектонических структур (по работам В. Е. Хаина) приведена в таблице. Несмотря на неполноту фактических данных об особенностях строения земной коры в пределах некоторых геоструктур, которые, вероятно, можно было бы пополнить, таблица показывает принципиальную сопоставимость двух независимо созданных классификаций планетарных структур и форм рельефа.

Как уже отмечалось нами [11], между геотектурами и морфоструктурами устанавливается достаточно обоснованная граница. Формирование и функционирование последних связано почти исключительно с внутрикоровыми процессами. При всем историко-генетическом разнообразии морфоструктур они отражают плотностные неоднородности и относительно хрупкость земной коры, проявляющуюся в блоковом строении фундамента, особенно его верхней «гранитной» оболочки на материках, пликативные дислокации осадочного чехла и многие другие особенности глубинного строения верхних горизонтов земной коры. Совершенно на другом уровне организации развито здесь и взаимодействие эндогенных и экзогенных процессов. К сожалению, на этом более привычном для нас масштабном уровне подробное изучение системной организации не может быть вполне успешным без изучения всех геоморфологических систем более высоких таксономических рангов.

Итак, несмотря на существование таких более крупных тектонических категорий, как литосферные плиты, материковые выступы и океанские

⁴ Целесообразно выделять срединно-океанические хребты в особый тип шовных зон.

Схемз соотношений глубинных геотектонических структур (по В. Е. Ханну [13 и др.]) и геотектур (по И. П. Герасимову [12 и др.])

Геоструктуры										Геотекстуры		
Ранги геоструктур					Мощность (км)					Ранги геотектур		
I	II	III	Тип земной коры	Подтип земной коры	осадочного слоя	«гранитного» слоя	«базальтового» слоя	земной коры	Астеносфера на глубине	I	II	III
Континентальные												
от 100—120 до 250												
Материковые выступы												
Материковые платформы					Щиты, платформы, плиты					Кратоны		
Орогенные пояса					Эпигеосинклинальные Эпилаплатформенные (резонансные, перикратонные) Рекурентные					Платооры		
Орогенные пояса					Континентальный					Пленогены		
Орогенные пояса					Континентальный					Орогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Эпигорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Палеорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Неорогенные		
Орогенные пояса					Континентальный					Не		

котловины представляют высший таксономический ранг форм рельефа. О том, что материки находятся в тесных генетических отношениях со структурой, лежащей в их основе, свидетельствует, например, установленное П. С. Вороновым [14] закономерное прямое соотношение площадей континентов со средними их высотами, а также со средними мощностями образующей их земной коры. По мнению П. С. Воронова, существованием определенного предела средней толщины коры континентальных глыб (не более 45—50 км) и коры океанов (менее 6 км) отражает стремление коры (или литосферы) к гидростатическому равновесию относительно верхней мантии (или астеносферы).

КАТЕГОРИИ ИЗОСТАТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Считается почти общепризнанным, что литосфера как под океанами, так и под континентами изостатически уравновешена в вязкой астеносфере, однако единых взглядов на механизм осуществления этого равновесия не существует. По мнению Р. Дица [15], одного из основоположников глобальной тектоники плит, литосфера, как под континентами, так и под океаническими бассейнами, уравновешена изостатически приблизительно на глубине 70 км. М. Е. Артемьев [9] указывает, что наиболее вероятная глубина кровли астеносферы 50—80, а подошвы — порядка 200 км.

По В. Е. Хайну «верхняя граница астеносферы находится на глубине порядка 50—60 км под океанами и 100—120 км под континентами, а нижняя соответственно на глубине 400 и 250 км. Следовательно, астеносферный слой под океанами значительно мощнее, а его подошва здесь практически совпадает с подошвой верхней мантии» [13, с. 31].

Ряд фактов свидетельствует, пожалуй, в пользу второй точки зрения. Это, прежде всего, более высокий тепловой поток Земли в океанах, особенно в областях спрединга, что свидетельствует о более близком залегании источника разогрева, которым является астеносфера. Да и сам выход астеносферы на поверхность в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов не свидетельствует о большой мощности надастеносферного слоя верхней мантии (и литосферы в целом) в пределах океанов. Худшая выраженность астеносферы под континентами обычно интерпретируется как уменьшение ее мощности и повышение вязкости вследствие ее меньшего разогрева. Это обстоятельство дает основание Е. Е. Милановскому [16] считать, что местами под континентами астеносфера отсутствует вообще. Таким образом проблема механизма изостазии еще далеко не решена, а с нею связано не только изучение планетарных форм рельефа, но и разработка геотектонических представлений.

Так или иначе, но литосфера изостатически уравновешена. При этом она очень чутко реагирует на нарушения изостатического (гидростатического) равновесия. При изменении давления только на 0,1% уже могут произойти движения в астеносфере для восстановления равновесия. Вместе с тем крупнейшие из известных изостатических нарушений приводят к изменению давления на глубине 60 км всего на 4% [9]. На основе изучения изостатических компенсационных движений на месте стаявших плейстоценовых ледниковых щитов Е. В. Артюшков [17] рассчитал, что изостатические движения достаточно больших по площади областей могут осуществляться за счет течений в астеносфере при вязкости 10^{20} со скоростью до 1 м/год. Характерно, что литосфера также не может выдерживать длительную нагрузку, если даже приложенная нагрузка значительно меньше предела ее прочности, находящегося на уровне 10^3 кг/см². Она реагирует более медленными деформациями типа ползучести на нагрузки с шириной области приложения меньшей или равной ее толщине. Таким образом, области с поперечником менее 100 км, компенсируют нагрузки изостатическими движениями за счет перемещения вещества в самой литосфере [9]. Отсюда можно заключить, что денудационный срез континентов компенсируется изостатическим поднятием без существен-

ного отставания во времени. Особенно быстро восстанавливается равновесие, даже после снятия небольшой локальной нагрузки, в условиях повышенного разогрева недр (район древнего озера Бонневиль).

Вместе с тем устанавливается ряд изостатических аномалий, указывающих на существование плотностных неоднородностей в земной коре и мантии. Геофизические методы позволяют выделять три категории нарушений: планетарные, зональные (или региональные) и локальные изостатические аномалии [9]. Планетарные плотностные неоднородности предположительно глубже астеносферы и определяют положение ее нижней границы и крупные неровности ее рельефа. Несмотря на еще слабую изученность известно, что планетарные изостатические аномалии образуют субмеридиональные пояса, положение которых не четко коррелируется с планетарными особенностями строения литосферы и ее рельефа. Они рассасываются очень медленно и должны оказывать влияние на конвекцию астеносферы.

Пояс отрицательных аномалий протягивается в Атлантическом океане, однако его минимум несколько смещен в сторону от оси Срединно-Атлантического хребта. К востоку от него располагается пояс положительных планетарных аномалий, охватывающий Европу и протягивающийся далее на юг в Африку, а затем еще один пояс отрицательных аномалий, слабо выраженный на западе и севере Сибири и более четко на ее юге (особенно в области Байкальского рифтогена), а также в Казахстане, Средней и Центральной Азии. Он протягивается и далее на юг в пределы Индостанского полуострова. Впрочем вопрос о том, является ли Центральноазиатский минимум планетарной или региональной аномалией, еще не решен. Самый восточный в пределах материка Евразия пояс положительных планетарных аномалий резко граничит с поясом отрицательных аномалий по Верхоянской горной стране и охватывает Восточную Сибирь и Дальний Восток (включая окраинные моря и островные дуги), а затем протягивается далее на юг вдоль всей восточной окраины материка через Индонезию и Филиппины в Австралию. Существование планетарных аномалий можно объяснить изменениями в положении нижней границы астеносферы всего на ± 10 км.

Указанные планетарные пояса нарушаются резкими зональными аномалиями разного знака, приуроченными главным образом к областям активного орогенеза (Средиземноморье, Кавказ, горы Средней Азии). Их соотношения с рельефом сложны и неоднозначны. Чаще крупным горным сооружениям соответствуют положительные, а впадинам (Южно-Каспийская и др.) — отрицательные зональные аномалии. Однако в пределах шовных зон, в Средиземноморье и Средней Азии известны обратные и более сложные соотношения рельефа и изостатических аномалий. Несмотря на сложность соотношений, зональные и частично локальные аномалии лучше всего объясняются утолщениями земной коры под горными сооружениями, т. е. положением границы М. Не рассматривая других соотношений отметим, что есть основания считать зональные аномалии отражением плотностных неоднородностей на границе земная кора — верхняя мантия и частично на границе литосфера — астеносфера. Поэтому при построении системных моделей геотектур более низкого ранга, чем континенты и океаны, роль зональных изостатических аномалий нельзя не учитывать. Весьма вероятно, что локальные аномалии отражают преимущественно плотностную неоднородность в толще земной коры (например гранитоидный магматизм).

Если сопоставление разных категорий изостатических аномалий с глубинами и характером проявлений процессов в верхних оболочках Земли в какой-то мере правильно, то можно полагать, что и само изостатическое равновесие осуществляется на разных уровнях. В зависимости от глубины рассматриваемого слоя литосферы должны проявляться изостатические и антиизостатические силы разного уровня организации. Уже сейчас можно предполагать, что геотектуры наиболее высокого ранга — континенты и океаны — находятся в системных связях с мощностью и выраженностью астеносферы.

КОНВЕКЦИЯ В АСТЕНОСФЕРЕ И МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Глубинный механизм формирования планетарных геотектур в сущности сводится к комбинации изостатических движений и фазовых преобразований вещества на границах сред. Исключительная роль в этом принадлежит астеносфере. Как полагают М. Е. Артемьев и Е. В. Артюшков [18], в областях отрицательных гравитационных аномалий и повышенного теплового потока (которые часто находятся в обратных соотношениях) происходит подъем нижней границы астеносферы, что вызывает горизонтальное растекание ее вещества. В таких зонах повышенного подогрева интенсивно выплавляется базальтовая магма и в результате ее поступления к земной коре могут образоваться поднятия типа срединно-океанических хребтов. В областях положительных изостатических планетарных аномалий мощность астеносферы меньше, но несколько больше плотность вещества ниже астеносферы. Здесь можно предполагать нисходящие потоки менее разогретой астеносферы. Таким образом изостазия и ее нарушения осуществляются как путем изменения мощности литосферы и астеносферы, так и горизонтальных изменений плотности.

Существующие описания механизма тепловой конвекции в астеносфере, привлекаемые для объяснения движения литосферных плит, разработаны, к сожалению, на примере плит с океанической корой. По более ранним представлениям Г. Хесса [19] и Р. Дица [15] восходящие ветви конвективных ячеек, циркулирующих со скоростью около 1 см/год в мантии (астеносфере), находятся под срединно-океаническими хребтами и раздвигают плиты коры (литосферы). Нисходящие же ветви приурочены к зонам субдукции океанической коры (литосферы) под континентальную с частичным выплавлением легкого материала из океанической коры и припаиванием его к континентальной. Континенты пассивно двигаются вместе с плитой до зоны нисходящего потока и останавливаются над этой зоной. Если восходящий поток оказывается под континентом, то создается тенденция к континентальному рифтообразованию.

Различия между скоростями спрединга — субдукции, достигающими 6 и даже 9 см/год, и предполагаемой скоростью конвекции в астеносфере (около 1 см/год), а также другие соображения заставили Эльзассера, а затем Туркотта, Хаксби и Окендока (изложено по [20]) пересмотреть модель тепловой конвекции в астеносфере. Поскольку носителями энергии в конвективной ячейке являются пограничные слои, а вещество внутри нее находится в примерно адиабатическом состоянии, то носителем нисходящего теплового потока становится сам шестикилометровый слой новообразованной океанической литосферы. Охлаждаясь он приобретает жесткость и постепенно накапливает отрицательную плавучесть, что вызывает его погружение в зоне субдукции. Нижнюю ветвь этой ячейки образует противотечение постепенно нагревающегося нижнего пограничного слоя. Поскольку отрицательная плавучесть нисходящего потока превосходит положительную плавучесть восходящего потока, то скорость движения литосферной плиты больше, чем скорость конвекции в подстилающей мантии. Погружение, засасывание блока становится источником «проскальзывания» литосферной плиты по мантии, а сама плита, как уже отмечалось, — верхней горизонтальной ветвью конвективной ячейки.

Нетрудно заметить, что модель составлена применительно к непрерывному конвейеру формирования — поглощения океанической плиты. Континентальная литосферная плита, ввиду наличия более мощной легкой надстройки из континентальной коры, не может обладать отрицательной плавучестью.

Общее утолщение плит под континентами связано вероятно с погружением верхней границы астеносферы от океана к материку, свидетельствующем об остывании ее верхней части, не влияет на изостатическое равновесие, так как отражает только различия в фазовом состоянии верхней мантии.

Мы рассмотрели эндогенные механизмы, регулирующие *функционирование* планетарных геотектур, в той степени достоверности, которую позволяют современные геофизические представления. Если рассмотреть планетарную геоморфологическую систему в *развитии*, т. е. вернуться к эпохе планетарного выравнивания рельефа — образования глобального мезозойского пенеплена, — то, опираясь на концептуальную модель Н. И. Маккавеева, мы должны предположить, что изостатического равновесия материковой литосферы на астеносфере тогда не было и компенсационные поднятия не препятствовали пенепленизации праматериков Лавразии и Гондваны. В противном случае денудационный срез был бы настолько велик, что поверхность материков слагали бы всюду породы фундамента, как это наблюдается в пределах древних щитов.

Причиной отсутствия изостатического равновесия в системе континент — океан могло быть только слабое и не повсеместное развитие астеносферы или ее очень высокая вязкость, что практически одно и то же. В этих условиях могла реализоваться модель Н. И. Маккавеева с поправкой на неравномерное распределение денудированного материала. Возникновение астеносферной конвекции вызвало значительное поднятие материков и создало на крупных материках условия для их распада в виде восходящих конвективных потоков, способствовавших растяжению литосферы, рифтообразованию и превращению континентальных рифтов в зоны спрединга. Скопления продуктов денудации на окраинах праматериков, преобразовавшихся в активные края современных материков могли переплавиться при наращивании континентальной коры или превратиться в окраинные горные сооружения.

Однако, может быть предложена и альтернативная модель, исходящая из постоянного сохранения и нарушения изостатического равновесия. В этом случае денудация праматериков первоначально протекала в условиях изостатического равновесия на астеносфере, близких к современному, а их средняя высота составляла около 1000 м. Последовавшие за этим разогрев недр и разуплотнение нижней части материковой коры могли вызвать общее поднятие материка⁵ и усиление расчленения его поверхности экзогенными процессами. Вместе с тем разогрев недр мог активизировать более медленный механизм растекания плотностной неоднородности, выраженной как положительная планетарная аномалия на нижней границе астеносферы. В результате этого поднятие материка могло смениться опусканием. Денудация в процессе опускания, сопровождаемого трансгрессией и расширением шельфа, должна была продолжаться, но с тенденцией к затуханию. В это время мог окончательно сформироваться глобальный пенеплен. Утонение огромных плит, а также усилившаяся астеносферная конвекция, как и в предыдущем варианте, расколола крупные плиты, что вызвало не только раскрытие новых океанов и дрейф континентов, но и увеличение их средней высоты от 200—300 м до современных средних высот, соответствующих их современным площадям.

Как видно из сказанного, в этой модели *функционирование* планетарной геоморфологической системы обеспечивается постоянным восстановлением изостатического равновесия, а развитие — его нарушениями, связанными с усилением или ослаблением (пульсацией) астеносферной конвекции. Экзогенному выравниванию и расчленению отводится подчиненная роль. При этом циклы эндогенных преобразований не вполне соответствовали по времени эпохам выравнивания — расчленения. При существующем уровне наших знаний обе модели имеют право на существование.

⁵ При этом так называемые «пассивные» окраины материка с помощью краевой геотектуры и разломов материкового склона не жестко, а шарнирно соединялись с прилегающей новообразованной океанической литосферной плитой. Наличие краевых прогибов под материковым подножием указывает на возможность преобразования пассивных окраин материков в активные.

Рассмотренные планетарные системы и их развитие служат тем фоном, на котором функционируют и развиваются геотектуры более низких рангов, и наоборот, развитие последних, конечно, должно оказывать какое-то влияние на функционирование планетарной надсистемы, создавать особенности конкретных материков и океанов. Однако не они определяют систему организации планетарных геотектур.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кашменская О. В.* Теория систем и геоморфология— Тр. Ин-та геол. и геофиз. СО АН СССР, вып. 453. Новосибирск: Наука, 1980, 119 с.
2. *Герасимов И. П.* Современное состояние и перспективы развития общей теории советской геоморфологии.— *Геоморфология*, 1983, № 4, с. 3.
3. *Флоренсов Н. А.* Очерки структурной геоморфологии. М: Наука, 1978, 238 с.
4. *Мещеряков Ю. А.* Структурная геоморфология равнинных стран. М.: Наука, 1965, 388 с.
5. *Лазаревич К. С., Астахова В. А.* Системный подход в геоморфологии. *Геоморфология*, 1982, № 3, с. 97.
6. *Маккавеев Н. И.* Образование глобального пенепплена.— В кн.: Основные направления развития геоморфологической теории. Новосибирск, 1982, с. 88.
7. *Маккавеев Н. И.* О формировании пенеппленов.— *Вестник МГУ, сер. географ.*, 1982, № 1, с. 20.
8. *Артюшков Е. В.* Гравитационная конвекция в недрах Земли.— *Изв. АН СССР, серия физика Земли*, 1968, № 9, с. 17.
9. *Артемьев М. Е.* Изостазия территории СССР. М.: Наука, 1975, 216 с.
10. *Солнцев В. Н.* Системная организация ландшафтов М.: Мысль, 1981, 239 с.
11. *Асеев А. А., Александров С. М., Благоволин Н. С.* О геоморфологических системах.— В кн.: Проблемы системно-формационного подхода к познанию рельефа. Новосибирск: Наука, 1982, с. 4.
12. *Герасимов И. П.* Архитектура Земли (геотектура) в свете глобальной тектоники плит.— *Геоморфология*, 1976, № 3, с. 3.
13. *Хаин В. Е.* Общая геотектоника М.: Недра, 1973, 512 с.
14. *Воронов П. С.* Очерки о закономерностях морфометрии глобального рельефа Земли. Л.: Наука, 1968.
15. *Диз Р.* Эволюция континентов и океанических бассейнов как результат спрединга океанического дна.— В кн.: Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974, с. 26.
16. *Милановский Е. Е.* Тектоническое развитие Земли в фанерозое в свете представлений о ее пульсациях и расширении.— *Тектоника. Геология альпид «тетисного» происхождения.* Междунар. геол. конгр. XXVI сессия, доклады совет. геологов. М.: Наука, 1980.
17. *Artyushkov E. V.* Rheological properties of the crust and upper mantle according to data on isostatic movements.— *J. Geophys. Res.* 1971, v. 76, № 5.
18. *Артемьев М. Е., Артюшков Е. В.* О происхождении рифтовых впадин.— *Изв. АН СССР, сер. геол.*, 1968, № 4.
19. *Хесс Г.* История океанических бассейнов.— В кн.: Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974, с. 9.
20. *Жарков В. Н.* Внутреннее строение Земли и планет М.: Наука, 1983, 416 с.

Институт Географии АН СССР

Поступила в редакцию
30.XI.1983

ON PLANETARY GEOMORPHOLOGICAL SYSTEMS

ASEEV A. A.

Summary

Conceptual models are discussed for highest taxonomic rank geomorphological systems, as well as general principles of functioning and development of natural boundary systems. Continents and oceans are considered to be highest categories in systematic organization of landforms; their deep tectonic structure, isostatic equilibrium realisation mechanism and convection processes in asthenosphere are discussed in terms of plate tectonics. The author concludes that at present state of knowledge only alternative conceptual models can be developed.