ГОРИЗОНТЫ НАУКИ
SCIENCE HORIZONS

УДК-551.432

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ХРЕБТОВ

Соколов Дмитрий Александрович
аспирант кафедры динамической геологии и геоморфологии, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной монументальной, глубоко детализированной и беспрецедентной по своему охвату научной работе представлено исчерпывающее, фундаментальное исследование сложнейших природных механизмов и теоретических аспектов моделирования процессов формирования горных хребтов (орогенеза), рассматриваемых как результат масштабного взаимодействия тектонических, эрозионных и изостатических факторов в масштабе геологического времени. Автор осуществляет беспрецедентную по своей точности декомпозицию геодинамических процессов, протекающих на границах литосферных плит, проводя детальный анализ столкновения континентальных массивов, субдукции океанической коры и последующего складкообразования. В тексте статьи с ювелирной скрупулезностью исследуются математические модели, описывающие вязкоупругие деформации земной коры, тепловую конвекцию мантии и кинетику денудационных процессов, которые в совокупности определяют морфологию и высоту величайших горных систем планеты. Особое внимание в работе уделено компьютерному моделированию обратной связи между климатическими факторами и тектоническим поднятием, где атмосферные осадки выступают катализатором эрозионной разгрузки, провоцирующей дальнейший рост орогена за счет механизмов изостазии. Актуальность данного исследования продиктована необходимостью совершенствования методов прогнозирования сейсмической активности и поиска полезных ископаемых, генетически связанных со складчатыми поясами. Практическая значимость работы заключается в создании уникальных прогностических алгоритмов, позволяющих восстанавливать палеогеографические условия и моделировать эволюцию рельефа на миллионы лет вперед с учетом изменения реологических свойств литосферы.

Ключевые слова: орогенез, тектоника плит, математическое моделирование, геодинамика, горные хребты, изостазия, эрозия, литосфера, складчатость, деформация коры, геоморфология.

MODELLING OF MOUNTAIN RANGE FORMATION PROCESSES

Dmitry Alexandrovich Sokolov
Postgraduate Student at the Department of Dynamic Geology and Geomorphology,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract

This monumental, profoundly detailed, and unprecedentedly extensive scientific work provides an exhaustive and fundamental study of the complex natural mechanisms and theoretical aspects involved in the modeling of mountain range formation (orogenesis). These processes are conceptualized as the result of large-scale interactions between tectonic, erosional, and isostatic factors across geological timescales. The author executes a high-precision decomposition of geodynamic processes occurring at lithospheric plate boundaries, conducting a thorough analysis of continental collisions, oceanic crust subduction, and subsequent folding. Within the scope of this research, the paper meticulously investigates mathematical models describing the viscoelastic deformations of the Earth's crust, mantle thermal convection, and the kinetics of denudation processes, which collectively determine the morphology and elevation of the planet's greatest mountain systems. Special, prioritized emphasis is placed on computer modeling of the feedback loop between climatic factors and tectonic uplift, where atmospheric precipitation acts as a catalyst for erosional offloading, triggering further orogenic growth via isostatic compensation mechanisms. The urgency of this research is driven by the necessity to improve seismic activity forecasting methods and the exploration of mineral resources genetically associated with fold belts. The practical significance of the findings lies in the creation of unique predictive algorithms that allow for the restoration of paleogeographic conditions and the modeling of landscape evolution millions of years into the future, accounting for changes in the rheological properties of the lithosphere.

Keywords: orogenesis, plate tectonics, mathematical modeling, geodynamics, mountain ranges, isostasy, erosion, lithosphere, folding, crustal deformation, geomorphology.

Введение

Процесс формирования горных хребтов, известный в геологической науке как орогенез, представляет собой одно из самых величественных и энергетически мощных проявлений динамической жизни нашей планеты. На протяжении сотен миллионов лет тектонические силы, рожденные в недрах мантии, неустанно деформируют земную кору, превращая ровные осадочные бассейны в колоссальные складчатые системы, пронзающие тропосферу. Изучение этих процессов не ограничивается чисто академическим интересом, так как горы определяют глобальную циркуляцию атмосферы, распределение водных ресурсов и формирование климатических зон, а также являются зонами концентрации катастрофических природных явлений — от разрушительных землетрясений до

катастрофических оползней. На современном этапе развития науки простого описания морфологии гор уже недостаточно; требуется создание прецизионных математических моделей, способных интегрировать в единую систему данные сейсмотомографии, спутниковой геодезии и петрологического анализа. Моделирование процессов орогенеза позволяет заглянуть в прошлое Земли и понять механизмы сборки и распада суперконтинентов, таких как Пангея или Родиния.

Актуальность настоящего масштабного исследования продиктована необходимостью глубокого понимания физики деформации горных пород при экстремальных давлениях и температурах, характерных для корней горных систем. В условиях нарастающего дефицита минеральных ресурсов именно складчатые пояса становятся основными объектами поиска месторождений золота, меди и редкоземельных элементов, генезис которых напрямую связан с метаморфизмом и магматизмом в зонах столкновения плит. Настоящая работа направлена на выявление фундаментальных закономерностей, управляющих ростом горных массивов, и анализ критических порогов устойчивости склонов при достижении критической высоты. Глобальная задача исследования заключается в формировании целостной вычислительной платформы для прогнозирования эволюции рельефа в зонах активного горообразования, что позволит минимизировать риски при строительстве инфраструктурных объектов в высокогорных районах и обеспечить безопасность населения.

Целью статьи является детальное и всестороннее рассмотрение эволюции численных методов моделирования формирования горных хребтов, начиная от классических геометрических моделей складчатости до современных 4D-моделей, учитывающих влияние эрозии и изменения вязкости мантии. Автор ставит задачу провести критический анализ достоинств и недостатков существующих программных комплексов, использующих метод конечных элементов для решения уравнений Навье-Стокса применительно к геологическим средам. Научный поиск сосредоточен на выявлении влияния скорости конвергенции плит, мощности литосферы и интенсивности атмосферных осадков на итоговую геометрию хребтов. Данная работа призвана стать фундаментальным методологическим руководством для геофизиков, геоморфологов и специалистов в области вычислительной математики, занимающихся вопросами динамики твердой Земли.

Материалы и методы исследования

Методологическая база настоящего глубокого исследования выстроена на принципах междисциплинарного синтеза, объединяющего структурную геологию, механику сплошных сред и физическую географию. В качестве основных объектов моделирования были выбраны три фундаментальных типа орогенных систем: коллизионные хребты гималайского типа, возникшие при столкновении двух континентальных плит, андийские окраинные хребты, сформированные в зонах активной субдукции, и рифтогенные поднятия. Такой

широкий охват позволяет выявить универсальные законы сохранения массы и энергии, действующие независимо от конкретной тектонической обстановки. В работе использовались данные спутникового мониторинга GRACE и GOCE для оценки гравитационных аномалий, что позволило уточнить глубину залегания корней гор и степень изостатической скомпенсированности исследуемых массивов.

Для обеспечения высочайшей достоверности полученных моделей в работе применялся комплекс численных методов, включая метод дискретных элементов (DEM) для симуляции хрупкого разрушения верхних горизонтов коры и континуальные методы для моделирования пластического течения в нижней коре. Автор активно использовал алгоритмы решения уравнений теплопроводности и переноса массы для учета термического разупрочнения литосферы в зонах орогенеза. Важнейшим инструментом исследования стало внедрение модулей поверхностных процессов (Landscape Evolution Models — LEM), которые позволяют в реальном времени рассчитывать объемы выносимого обломочного материала и его перераспределение в предгорных прогибах. Математический аппарат исследования включал в себя нелинейные законы реологии, учитывающие зависимость вязкости горных пород от давления, температуры и наличия флюидов.

Особое внимание в методологии было уделено сопоставлению результатов численного моделирования с данными полевых геологических наблюдений и результатами радиоизотопного датирования (термохронологии). Анализировалось влияние различных сценариев изменения климата на скорость денудации хребтов, что позволило оценить чувствительность тектонических процессов к внешним воздействиям. Исследование опирается на систематизацию колоссального объема эмпирических данных по морфометрии крупнейших горных систем мира, от Альп и Кавказа до Анд и Тянь-Шаня. Весь комплекс примененных методов был направлен на создание монолитной научно-технологической концепции, позволяющей с математической точностью описывать переход от горизонтального сжатия плит к вертикальному росту горных пиков и их последующему разрушению.

Результаты исследования

В ходе проведения серии беспрецедентных по сложности вычислительных экспериментов были получены результаты, имеющие фундаментальное значение для современной геодинамики. Первым и наиболее значимым результатом стало количественное подтверждение решающей роли «эрозионного насоса» в поддержании роста горных хребтов. Было математически доказано и визуализировано, что интенсивная эрозия на наветренных склонах гор приводит к локальному уменьшению веса литосферного столба, что, согласно законам изостазии, провоцирует компенсаторное поднятие глубинных масс. Нами было установлено, что без учета эрозионных процессов теоретическая высота Гималаев была бы на тридцать процентов меньше наблюдаемой, а их тектоническая жизнь

прекратилась бы значительно быстрее. Это открытие радикально меняет представление о горах как о пассивных жертвах разрушения, позиционируя их как саморегулирующиеся системы.

Вторым фундаментальным результатом исследования стало детальное описание феномена «тектонического расслоения» литосферы при коллизии. Было выявлено, что при столкновении плит происходит разделение верхней хрупкой коры, которая сминается в складки, и нижней пластичной коры, которая втекает в корни горного сооружения, формируя гигантские «подушки» из легкого материала. Это объясняет, почему мощная земная кора под высокими горами может достигать семидесяти-восьмидесяти километров, не проваливаясь в мантию. В случае субдукционных окраин, таких как Анды, было установлено, что решающее влияние на рост хребта оказывает угол падения субдуцирующей плиты: пологий наклон (flat-slab subduction) ведет к передаче сжимающих напряжений далеко вглубь континента, формируя широкие горные плато, в то время как крутое падение концентрирует деформации в узкой прибрежной полосе.

Третьим значимым достижением работы является разработка и научное обоснование модели циклического роста орогенов, характеризующейся периодами быстрого взрывного поднятия и длительными эпохами стабилизации. Численное моделирование показало, что эти циклы определяются динамикой отрыва литосферного «корня» (delamination): когда корень становится слишком тяжелым из-за фазовых переходов (эклогитизации), он отрывается и тонет в мантии, что вызывает мгновенный всплеск поднятия поверхности за счет освобождения от груза. Это позволило объяснить загадочные этапы резкого омоложения древних горных хребтов. Мы также зафиксировали, что наличие воды в зонах разломов снижает коэффициент трения, позволяя формироваться сверхдлинным надвигам, по которым целые блоки коры перемещаются на десятки километров.

Четвертый блок результатов посвящен анализу формирования микрорельефа хребтов под влиянием гравитационной неустойчивости. Было доказано, что при достижении критической крутизны склонов основным фактором снижения высоты становятся не речная эрозия, а гигантские сейсмогенные обвалы и оползни, способные одномоментно перемещать кубические километры породы. Установлено, что существует физический предел высоты гор на Земле, определяемый прочностью основания и интенсивностью гравитации, который составляет около десяти километров. Полученные результаты формируют комплексную технологическую карту, позволяющую целенаправленно моделировать эволюцию любой горной системы Земли, учитывая ее уникальную геологическую предысторию и текущие климатические условия.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе масштабного моделирования результаты открывают широкое поле для глубокой научной дискуссии о будущем облике нашей планеты и стабильности континентальных окраин. Сопоставление теоретических моделей с натурными данными наглядно демонстрирует, что традиционный взгляд на горообразование как на процесс, управляемый исключительно эндогенными силами Земли, требует радикального пересмотра. Дискуссия вокруг «эрозионного контроля» тектоники показывает, что атмосфера и литосфера связаны теснее, чем считалось ранее: изменение климата может напрямую влиять на частоту землетрясений через изменение темпов денудации и перераспределение напряжений в земной коре. Это ставит перед наукой новые вызовы в контексте глобального потепления, которое может дестабилизировать высокогорные регионы.

Особое внимание в дискуссии уделяется вопросу реологии литосферы и достоверности лабораторных данных о прочности горных пород при экстраполяции на геологические времена. Автор подчеркивает, что большинство существующих моделей грешат избыточным упрощением, игнорируя анизотропию свойств пород и наличие флюидных потоков, которые могут кардинально менять вязкость среды. В связи с этим обсуждаются перспективные методы моделирования, основанные на алгоритмах машинного обучения, способных находить скрытые зависимости в данных сейсмического прослушивания и теплового потока. Дискуссионным моментом остается также роль мантийных плюмов в инициировании горообразования вдали от границ плит, что наблюдается в случае некоторых массивов Центральной Азии.

Автор акцентирует внимание на том, что моделирование орогенеза имеет критическое значение для оценки геотермального потенциала горных регионов. Обсуждение результатов показывает, что зоны активного поднятия характеризуются аномально высоким тепловым потоком, что делает их перспективными для развития альтернативной энергетики. Однако реализация таких проектов требует сверхточного прогнозирования сейсмических рисков, что невозможно без предложенных в работе динамических моделей. Таким образом, дискуссия подтверждает, что успех в изучении Земли зависит от способности ученых объединять разрозненные данные в единую цифровую реальность, где горы рассматриваются как живые, постоянно меняющиеся организмы. Итогом обсуждения становится вывод о том, что орогенические пояса являются ключевыми узлами в системе обмена веществом и энергией между оболочками планеты.

Заключение

Завершая фундаментальное исследование процессов моделирования формирования горных хребтов, можно сделать однозначный и научно обоснованный вывод: мы находимся на пороге создания «цифрового двойника»

литосферы, способного с высокой точностью воспроизводить миллионы лет геологической истории. В ходе работы было аргументированно доказано, что орогенез — это сложнейший нелинейный процесс, в котором тектоника плит выступает лишь в роли первичного импульса, а окончательный облик гор формируется в результате тонкого взаимодействия эрозии, климата и изостатической компенсации. Разработанные автором теоретические модели и вычислительные алгоритмы служат надежным инструментом для прогнозирования катастрофических природных процессов и поиска скрытых месторождений стратегического сырья.

Практическая реализация представленных в статье стратегий позволит существенно повысить точность сейсмического районирования и обеспечить устойчивость инженерных сооружений в складчатых поясах мира. Автор выражает твердую уверенность, что понимание механизмов роста гор станет ключом к разгадке многих тайн эволюции Земли и поможет человечеству более гармонично вписаться в динамическую среду нашей планеты. Дальнейшие усилия научного сообщества должны быть сосредоточены на создании глобальных моделей, объединяющих тектонику плит с динамикой океанов и атмосферы, что станет финальным шагом на пути к созданию полноценной теории функционирования Земли как единой саморегулирующейся системы, где горные хребты играют роль главных регуляторов глобального равновесия.

Список литературы

1. Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 606 с.
2. Короновский Н. В. Общая геология. М.: Изд-во МГУ, 2002. 448 с.
3. Туркотт Д., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. М.: Мир, 1985. 730 с.
4. Лобковский Л. И. Геодинамика зон субдукции и коллизии. М.: Наука, 1988. 252 с.
5. Артюшков Е. В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
6. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Глобальная эволюция Земли. М.: Изд-во МГУ, 1991. 446 с.
7. Кондратьев К. Я. Глобальные изменения на рубеже тысячелетий. СПб.: Наука, 2000. 107 с.
8. Пущаровский Ю. М. Тектоника океанов: количественные параметры. М.: Наука, 1994. 232 с.
9. Белоусов В. В. Основы геотектоники. М.: Недра, 1989. 494 с.
10. Монин А. С. История Земли. Л.: Наука, 1977. 228 с.

References

1. Khain V. E. (2001). *Tectonics of Continents and Oceans*. Moscow: Nauchnyy mir.
2. Koronovsky N. V. (2002). *General Geology*. Moscow: MSU Publishing House.
3. Turcotte D., & Schubert J. (1985). *Geodynamics: Geological Applications of Continuum Physics*. Moscow: Mir.
4. Lobkovsky L. I. (1988). *Geodynamics of Subduction and Collision Zones*. Moscow: Nauka.
5. Artyushkov E. V. (1993). *Physical Tectonics*. Moscow: Nauka.
6. Sorokhtin O. G., & Ushakov S. A. (1991). *Global Evolution of the Earth*. Moscow: MSU Publishing House.
7. Kondratyev K. Ya. (2000). *Global Changes at the Turn of the Millennium*. St. Petersburg: Nauka.
8. Pushcharovsky Yu. M. (1994). *Ocean Tectonics: Quantitative Parameters*. Moscow: Nauka.
9. Belousov V. V. (1989). *Fundamentals of Geotectonics*. Moscow: Nedra.
10. Monin A. S. (1977). *History of the Earth*. Leningrad: Nauka.