



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

Смирнов Андрей Викторович

Аспирант кафедры динамической геологии геологического факультета
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Павлова Екатерина Дмитриевна

Аспирант кафедры динамической геологии геологического факультета
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Николаев Игорь Сергеевич

Аспирант кафедры динамической геологии геологического факультета
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В представленной масштабной научно-исследовательской работе, выполненной коллективом молодых российских геологов и геофизиков, проводится комплексный системный анализ методов моделирования процессов, протекающих в зонах субдукции. Авторы осуществляют глубокую деконструкцию динамики погружения океанической литосферы в мантию, исследуя механизмы возникновения напряжений, тепловой режим конвергентных границ и роль флюидов в формировании магматических очагов. В статье подробно рассматриваются подходы к численному и лабораторному моделированию, анализируется влияние реологической стратификации литосферы на морфологию зон субдукции и сейсмичность. Особое внимание уделено междисциплинарному синтезу тектонофизики и вычислительной математики. Работа обосновывает стратегическую важность понимания глубинных процессов для прогнозирования катастрофических землетрясений и цунами, а также для реконструкции палеогеодинамических обстановок.

Ключевые слова: субдукция, тектоника плит, геодинамическое моделирование, мантия, конвергентные границы, сейсмичность, геотермический режим, реология, литосфера, магматизм островных дуг.

Введение

Зоны субдукции представляют собой наиболее динамичные и геологически сложные регионы нашей планеты, являясь основными узлами планетарного конвейера тектоники плит. В этих зонах происходит погружение тяжелой и холодной океанической литосферы в более горячую и пластичную мантию, что сопровождается колоссальными выбросами энергии в виде землетрясений, интенсивным вулканизмом и формированием глубоководных желобов. Понимание процессов, протекающих на глубинах в сотни километров, невозможно без использования методов научного моделирования, так как прямые наблюдения в этих областях неосуществимы. Моделирование зон субдукции позволяет исследователям воспроизводить эволюцию литосферных плит на протяжении миллионов лет, выявляя причинно-следственные связи между глубинными потоками и поверхностными тектоническими структурами.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью совершенствования прогностических моделей сейсмической активности и понимания процессов формирования месторождений полезных ископаемых, генетически связанных с субдукционным магматизмом. Для молодых ученых из МГУ и СПбГУ изучение конвергентных границ представляет собой задачу по интеграции данных сейсмической томографии, геохимии и петрологии в единую динамическую систему. Настоящий труд направлен на детальное описание существующих подходов к моделированию, начиная от классических физических аналогий до современных численных кодов, учитывающих сложную нелинейную реологию вещества. Мы доказываем, что только комплексный учет термических, химических и механических факторов позволяет приблизиться к созданию адекватной модели тектонических процессов в зонах погружения.

Механизмы взаимодействия плит и физические основы моделирования

Процесс субдукции инициируется разностью плотностей между старой, остывшей океанической плитой и подстилающей ее астеносферой. Тяжелая плита под действием гравитации начинает опускаться, увлекая за собой остальную часть плиты, что создает основную движущую силу тектоники — силу натяжения слэба. В процессе моделирования крайне важно учитывать реологическое поведение горных пород, которое меняется от хрупкого в верхних слоях литосферы до вязкопластичного и вязкого на больших глубинах. Аспиранты МГУ в своих исследованиях фокусируются на анализе температурной зависимости вязкости мантийного вещества, так как именно тепловой режим определяет глубину проникновения плиты и угол ее падения. При моделировании учитывается адиабатический разогрев, фазовые переходы минералов и диссипация тепла при трении на границе раздела плит.

Особое внимание в моделировании уделяется роли флюидов, выделяющихся из погружающейся плиты при дегидратации минералов.

Эти флюиды проникают в вышележащий мантийный клин, снижая температуру плавления пород и провоцируя возникновение магматизма островных дуг. Моделирование этого процесса требует учета многофазной фильтрации и химического взаимодействия в системе плита-мантия. Студенты НГУ подчеркивают, что геометрия погружения плиты может существенно меняться в зависимости от скорости конвергенции и возраста литосферы. Старая и холодная литосфера склонна к крутому падению, в то время как молодая и горячая плита часто подвигается под малым углом, что приводит к интенсивному сжатию в пределах континентальной окраины и формированию высоких горных хребтов, подобных Андам.

Лабораторное и численное моделирование: Подходы и инструментарий

Исторически первым методом изучения зон субдукции было физическое или аналоговое моделирование. В лабораторных условиях исследователи используют материалы с определенными реологическими свойствами, такими как специальные сорта силикона, парафины и песок, которые в уменьшенном масштабе времени и пространства имитируют поведение литосферы и мантии. Такие модели позволяют наглядно наблюдать процессы изгиба плиты, формирование аккреционной призмы и возникновение разломов. Аспиранты СПбГУ отмечают, что, несмотря на развитие компьютерных технологий, аналоговое моделирование остается незаменимым инструментом для верификации сложных трехмерных структур и понимания базовых механических принципов взаимодействия твердых тел в вязкой среде.

Современное численное моделирование базируется на решении систем уравнений сохранения массы, импульса и энергии методами конечных элементов или конечных разностей. Эти модели позволяют интегрировать данные сейсмической томографии для создания реалистичных сценариев погружения плит в конкретных регионах, например, в Курило-Камчатской или Японской зонах субдукции. Численные коды способны учитывать фазовые переходы оливина в шпинель и далее в перовскит, которые происходят на глубинах 410 и 660 километров. Эти переходы сопровождаются изменением объема и плотности вещества, что может либо ускорять субдукцию, либо приводить к застойным явлениям, когда слэб расплывается на границе верхней и нижней мантии. Студенты УрФУ в своей работе рассматривают программные комплексы, позволяющие моделировать возникновение мега-землетрясений, учитывая накопление упругих напряжений в зоне контакта плит и их внезапную разрядку.

Динамика мантийных потоков и морфология погружающихся плит

Субдукция оказывает определяющее влияние на циркуляцию вещества во всей мантии Земли. Погружающаяся холодная плита инициирует нисходящие потоки, которые компенсируются восходящими плюмами в других частях планеты.

Моделирование показывает, что взаимодействие слэба с окружающими мантийными потоками приводит к сложным деформациям плиты, включая ее изгиб, разрывы и скручивание. Особый интерес представляет изучение «окна субдукции» — разрыва в погружающейся плите, через который может проникать горячее вещество астеносферы, вызывая аномальный магматизм в тыловых областях. Эти процессы напрямую влияют на эволюцию окраинных морей и задуговое растяжение литосферы.

Важнейшим аспектом моделирования является анализ ретроградации желоба или отката плиты (slab rollback). Этот процесс происходит, когда скорость погружения плиты превышает скорость сближения плит, что заставляет зону сочленения смещаться в сторону океана. Моделирование отката плиты позволяет объяснить раскрытие задуговых бассейнов, таких как Курильская котловина или Японское море. Исследование динамики отката требует учета вязкого сопротивления мантии, которое препятствует латеральному перемещению плиты. Работа молодых ученых демонстрирует, что морфология слэба является отражением баланса между его собственной жесткостью и вязкими силами мантии, причем этот баланс постоянно меняется в ходе эволюции зоны субдукции.

Сейсмичность и геодинамические риски в зонах конвергенции

Зоны субдукции являются источниками самых мощных землетрясений в истории человечества. Моделирование сейсмического цикла направлено на понимание процессов трения и сцепления на границе раздела плит, известной как мегатраст. В этой зоне литосферные плиты могут находиться в заблокированном состоянии на протяжении столетий, накапливая колоссальные упругие деформации. Моделирование позволяет выявлять участки повышенного сцепления (асперити), разрыв которых приводит к катастрофическим сейсмическим событиям. Аспиранты МГУ в данном разделе работы описывают механизмы возникновения глубокофокусных землетрясений в зоне Вадати-Заварицкого-Беньофа, природа которых до сих пор остается предметом научных дискуссий и связывается с фазовыми превращениями минералов или внезапным высвобождением флюидов.

Кроме того, моделирование субдукционных процессов позволяет оценивать риск возникновения цунами. Внезапное вертикальное смещение морского дна при землетрясении в зоне субдукции порождает волны, способные пересекать целые океаны. Использование связанных гидродинамических и геомеханических моделей дает возможность рассчитывать высоту волн и зоны затопления на основе параметров разлома. Студенты УрФУ подчеркивают, что мониторинг деформаций земной поверхности с помощью спутниковой геодезии GPS/ГЛОНАСС предоставляет важнейшие входные данные для этих моделей, позволяя в реальном времени корректировать оценки напряженного состояния зон субдукции. Таким образом, моделирование выступает как фундамент системы экологической и техносферной безопасности прибрежных регионов.

Заключение

Подводя итог системному анализу методов моделирования тектонических процессов в зонах субдукции, необходимо констатировать, что данное направление находится на пороге создания полномасштабных четырехмерных моделей Земли. Мы доказали, что погружение плит — это многофакторный процесс, где тепло, химия и механика связаны неразрывными обратными связями. Основной вывод работы заключается в том, что современное моделирование позволяет не только реконструировать прошлое, но и прогнозировать будущее состояние литосферы, выявляя наиболее опасные участки конвергентных границ.

Для молодых ученых России исследование субдукции имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение, учитывая протяженность активных окраин на востоке страны. Сочетание передовых вычислительных алгоритмов и глубоких геологических знаний позволяет создавать модели, способные спасать жизни людей и эффективно осваивать природные ресурсы. Дальнейшие исследования будут направлены на учет мелкомасштабной неоднородности мантии и изучение влияния субдукции на глобальный цикл углерода и воды. Данный труд вносит вклад в методологическую базу геодинамики, предлагая системный взгляд на зону субдукции как на сложную самоорганизующуюся систему, определяющую облик нашей планеты.

Литература

1. **Хаин В. Е., Ломизе М. Г.** Геотектоника с основами геодинамики. — М.: КДУ, 2010. — 560 с.
2. **Смирнов А. В.** Термомеханическое моделирование Курило-Камчатской зоны субдукции // Геотектоника. — 2026. — № 2. — С. 14–32.
3. **Павлова Е. Д.** Роль флюидного режима в динамике мантийного клина // Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География. — 2025. — № 1. — С. 40–58.
4. **Тюркотт Д., Шуберт Дж.** Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. — М.: Мир, 1985. — 730 с.
5. **Stern R. J.** Subduction zones // Reviews of Geophysics. — 2002. — Vol. 40, No. 4. — P. 1012.
6. **Gerya T.** Introduction to Numerical Geodynamic Modelling. — Cambridge University Press, 2010. — 358 p.
7. **Bercovici D.** Treatise on Geophysics. Mantle Dynamics. — Elsevier, 2007. — 724 p.
8. **Лобковский Л. И., Никишин А. М., Хаин В. Е.** Современные проблемы геотектоники и геодинамики. — М.: Научный мир, 2004. — 612 с.
9. **Николаев И. С.** Численный анализ напряжений в зоне мегатраста // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2025. — № 4. — С. 5–18.