

УДК 551.251:519.771.3

*С.Н. Коробейников, О.П. Полянский, В.В. Ревердатто,  
А.В. Бабичев, В.Г. Свердлова***Математическое моделирование процессов  
коллизии плит\****S.N. Korobeynikov, O.P. Polyansky, V.V. Reverdatto,  
A.V. Babichev, V.G. Sverdlova***Mathematical Modeling of Slabs Collision Processes**

Приведены результаты математического моделирования процессов коллизии плит, происходящих в рамках их тектонического движения. Моделирование основано на численном решении методом конечных элементов уравнений механики деформируемого твердого тела с использованием пакета MSC.Marc. Все задачи решаются в двумерной постановке в условиях плоской деформации. Подробно рассмотрены три модели процессов: надвиг деформируемой плиты на абсолютно жесткую плиту; поддвиг/субдукция деформируемой плиты под абсолютно жесткую плиту; формирование рельефа дневной поверхности в районе коллизии плит. В первых двух моделях явления надвига и поддвиг/субдукции искусственно разделяются для уменьшения математических трудностей, а в последней модели эти явления рассматриваются одновременно. Получено удовлетворительное соответствие результатов моделирования с наблюдаемой высотой хребта островной дуги (1~2 км) и величиной глубоководного желоба (около 7 км) в районе Курило-Камчатской зоны субдукции.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, коллизия плит, геодинамические процессы.

Невозможность проведения натурных экспериментов геофизических процессов стимулирует проводить как их физическое (лабораторное), так и математическое моделирование. В настоящей работе приведены результаты математического моделирования процессов коллизии плит, происходящих в рамках их тектонического движения. Моделирование основано на численном решении методом конечных элементов (МКЭ) [1, 2] уравнений механики деформируемого твердого тела (МДТТ) с использованием пакета MSC.Marc [3]. В этом пакете реализованы все типы нелинейностей (геометрическая, физическая и контактная) [4], используемые в формулировках уравнений, требуемых для математического моделирования геофизических процессов. Все задачи решаются в двумерной постановке в условиях плоской деформации.

The results of mathematical modeling of slab collision processes arising from their tectonic movement are presented. Simulation is based on numerical solution of the solid mechanics equations by the finite element method using the MSC Marc code. All problems are solved in two-dimensional plane strain statement. Three models of processes are considered in detail: overthrusting fault of a deformable slab on a rigid slab; underthrusting/subduction of a deformed slab under a rigid slab; formation of a day-surface relief in the vicinity of slabs collision. In the first two models, the overthrusting fault phenomenon and underthrusting/subduction one are divided artificially to reduce mathematical difficulties, and in a latest model these phenomena are considered simultaneously. Satisfactory correspondence of modeling results with observable height of a ridge arch island (1~2 km) and the value of a deep-water trench (about 7 km) near the Kuril-Kamchatka subduction zone is obtained.

**Key words:** mathematical modeling, slabs collision, geodynamic processes.

При коллизии плит различают явления надвига и поддвиг/субдукции. В первом случае изучают процессы деформирования и разрушения плит, приводящие к горообразованиям, а во втором случае рассматривают процессы «подслаивания» или глубокого погружения одной плиты под другую. Отметим, что в реальности эти процессы происходят одновременно, но при математическом моделировании в первых двух подходах авторы настоящей работы их искусственно разделяют для уменьшения больших математических и вычислительных трудностей одновременного учета обоих явлений, а в последнем подходе оба явления учитываются одновременно.

**1. Надвиг деформируемой плиты на абсолютно жесткую плиту.** Континентальная кора представляет область, состоящую из двух блоков. Участок области, моделирующий надвиг, определяется кон-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №09-08-00684) и программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН.

тактом между блоками, один из которых задается в виде абсолютно жесткого неподвижного упора с заданным углом наклона контакта  $45^\circ$ . Второй (деформируемый) блок движется под действием заданного горизонтального перемещения со скоростью  $1.375 \text{ см/год}$  (рис. 1).

Предполагается, что деформируемая плита состоит из двух слоев, находящихся в жестком сцеплении. Материал верхнего слоя предполагается хрупким, а материал нижнего слоя – упругопластическим. Общий вид деформированного состояния в финальной стадии приведен на рисунке 2.

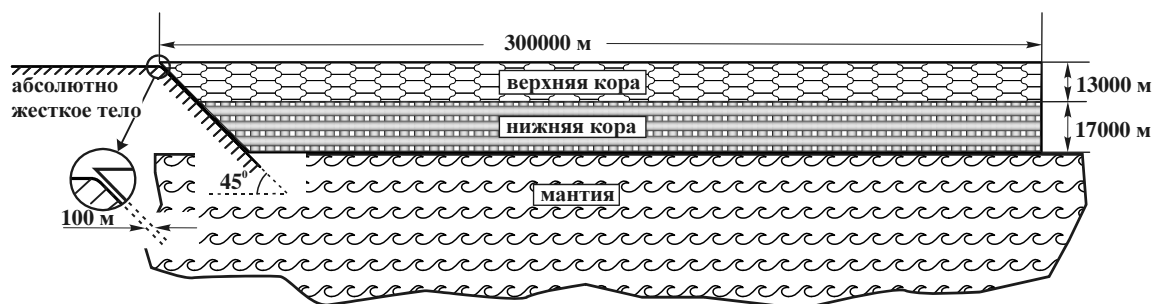


Рис. 1. Плоская модель континентальной коры в начальный момент времени

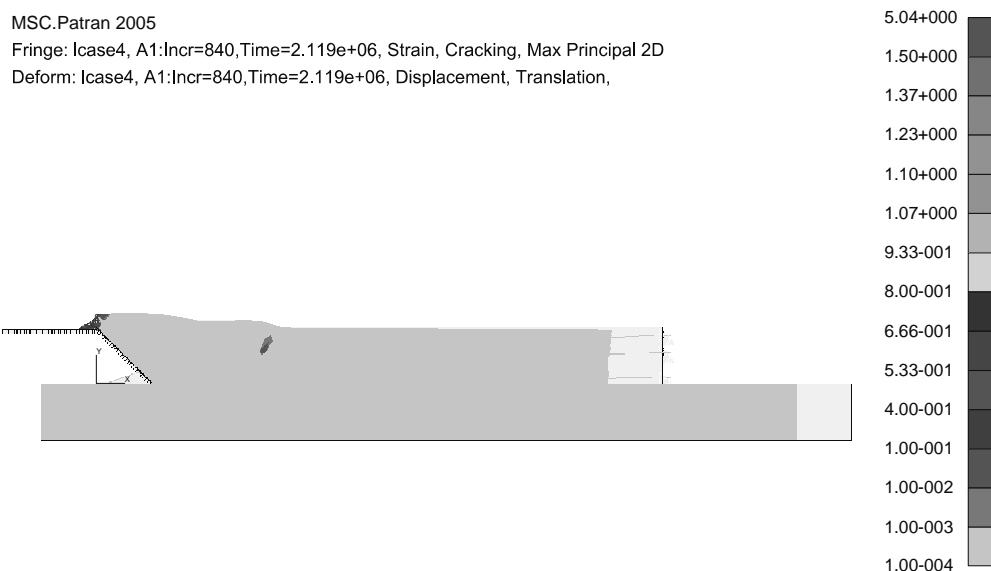


Рис. 2. Моделирование надвига при использовании текущей лагранжевой формулировки уравнений МДТТ (приведены изолинии максимальных главных деформаций разрушения)

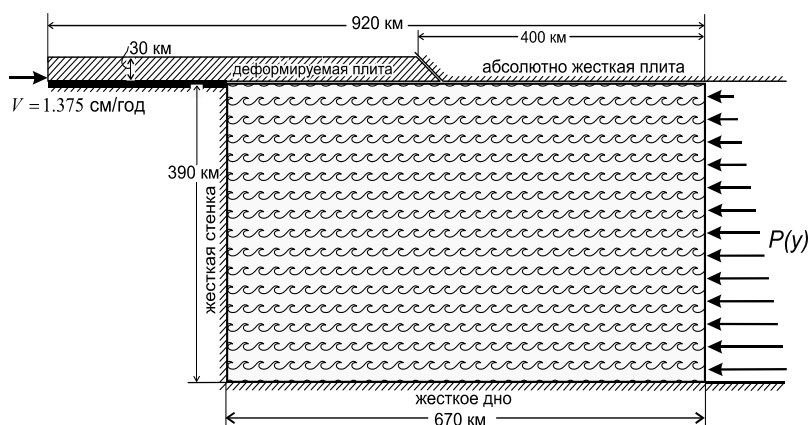


Рис. 3. Геометрические параметры области, включающие плиты и мантию до приложения веса в момент времени  $t = 0$

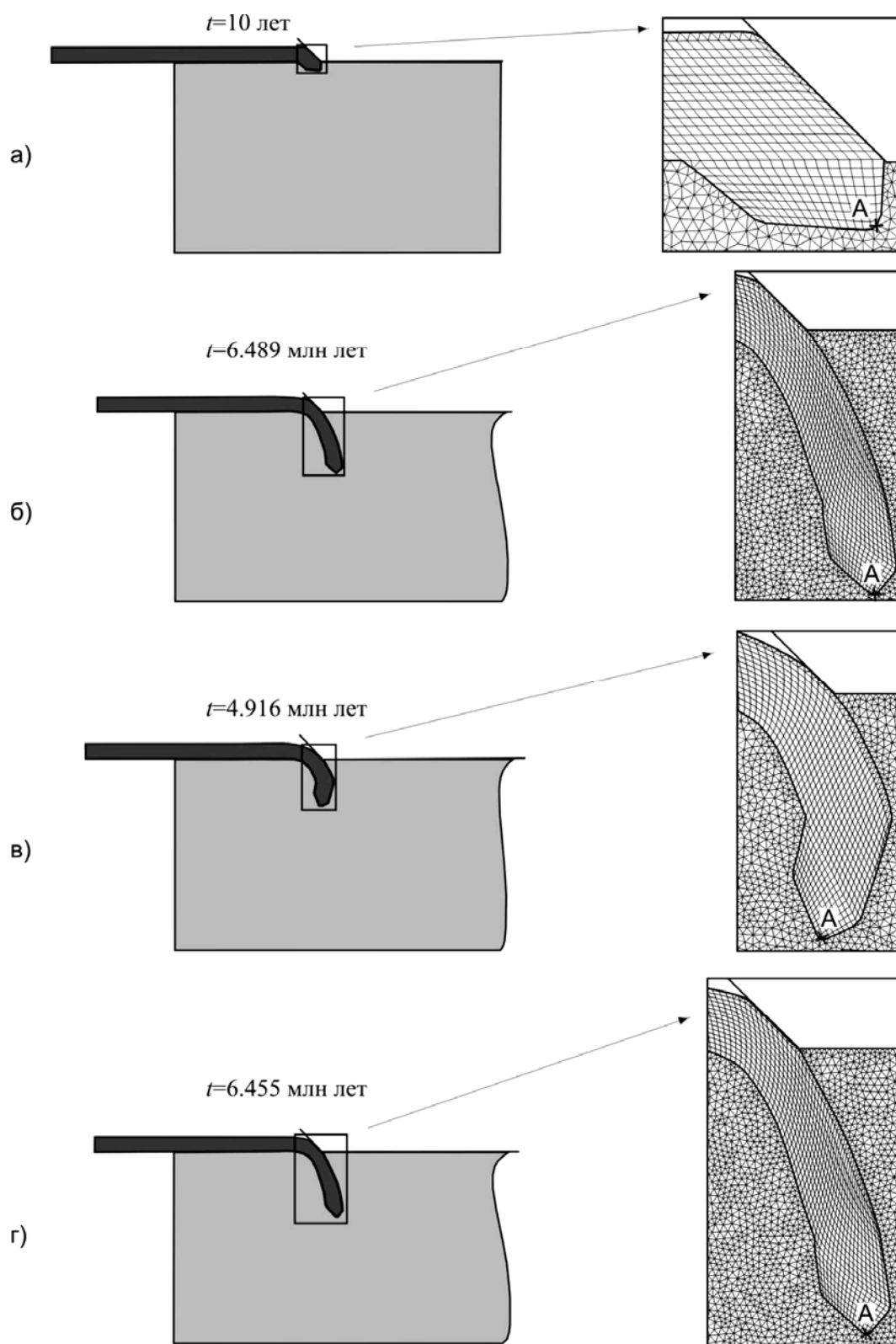


Рис. 4. Коллизия плит (модель деформируемой плиты с выступом на нижней поверхности):  
 а – расчетная область после решения вспомогательной задачи о приложении веса к плите;  
 б–г – деформированные конфигурации в финальные моменты времени в расчетах с поверхностями текучести:  
 (б – Хубера – Мизеса; в – конической Друкера – Прагера; г – параболической Друкера – Прагера)

**2. Подвиг/субдукция деформируемой плиты под абсолютно жесткую плиту.** Целью исследований была разработка в рамках используемых уравнений МДТТ такой математической модели коллизии плит, при которой возможно явление глубокой субдукции, приводящей в реальных природных процессах к погружению плит в мантию на сотни километров. Левая (деформируемая) плита сближается с правой (абсолютно жесткой) плитой с постоянной скоростью 1.357 см/год (рис. 3). Предполагается, что материал плиты уплотняется непосредственно при погружении в мантию. При этом плотность материала изменяется от 3000 до 3510 кг/м<sup>3</sup> (увеличивается на 17%).

Материал мантии описывается идеальным упругопластическим материалом с поверхностью текучести Хубера – Мизеса с низким значением предела текучести, а для материала коры использовались различные модели пластичности с различными поверхностями текучести (Хубера – Мизеса, Друкера – Прагера с конической поверхностью текучести и с параболической поверхностью текучести). При рассмотрении дна деформируемой плиты в виде гладкой нижней поверхности численное моделирование показывает, что реализуется явление поддвига деформируемой плиты под жесткую плиту независимо от выбора модели пластичности. Явление субдукции реализуется только в том случае, если деформируемая плита изначально имеет выступ, который является пусковым механизмом этого явления (рис. 4).

**3. Компьютерное моделирование процесса формирования рельефа дневной поверхности в районе коллизии плит.** В этом разделе оба

процесса (надвига и субдукции) учитываются одновременно. При этом обе плиты моделируются деформируемыми телами, что позволяет определять форму дневной поверхности плит в районе их коллизии. Цель настоящей работы – сравнение рельефа дневной поверхности плит в районе их коллизии, полученной в результате математического моделирования, с рельефом, наблюдаемым в природе. Установлено их качественное и количественное соответствия, в то время как при раздельном моделировании надвига и поддвига/субдукции невозможно получить даже качественное соответствие.

При решении задачи коллизии плит задается горизонтальное движение торца левой плиты со скоростью 5 см/год (рис. 5).

На рисунке 6 представлен сценарий развития субдукции/поддвига плит, полученный в расчетах без учета трения между плитами.

Из сравнения полученных в расчетах профилей дневной поверхности следует, что спустя около 1 млн лет после начала движения первоначальный сравнительно большой подъем  $h_b \approx 2.3$  км становится незначительным, причем в расчетах без учета трения подъем практически исчезает, а при расчетах с учетом трения этот подъем  $h_c$  составляет до 1 км. Эта величина согласуется с наблюдаемой высотой хребта островной дуги (1~2 км) в Курило-Камчатской зоне субдукции. Однако влияние трения на величину впадины не столь существенно. Для впадины получены значения около 5.5–6 км, что довольно близко к величине глубоководного желоба (около 7 км) в районе Курило-Камчатской зоны субдукции.

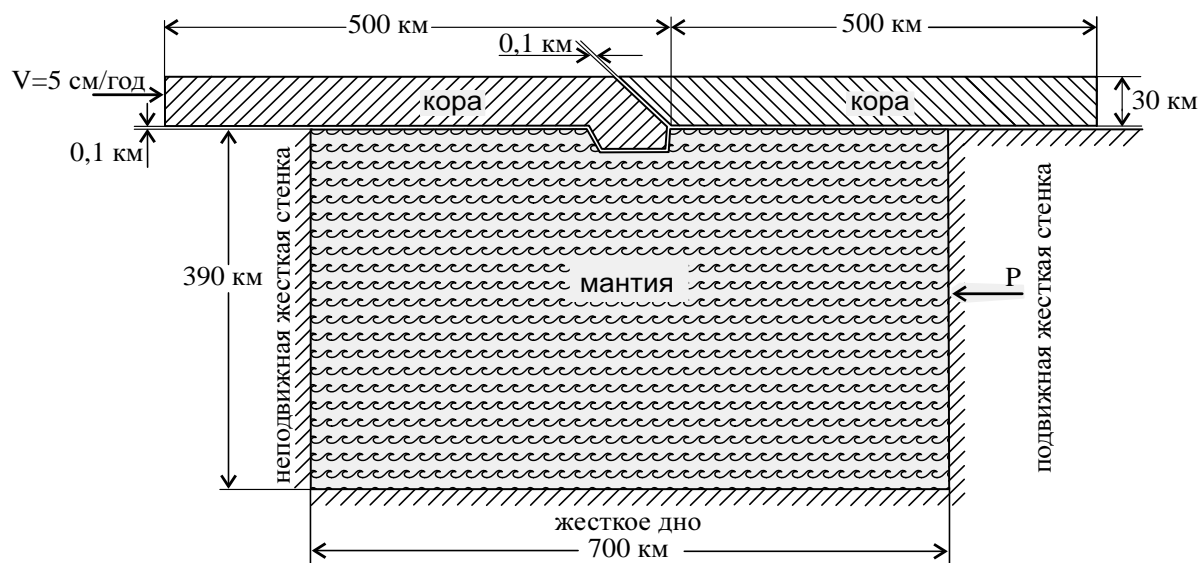


Рис. 5. Геометрические параметры области, включающие плиты и мантию до приложения веса

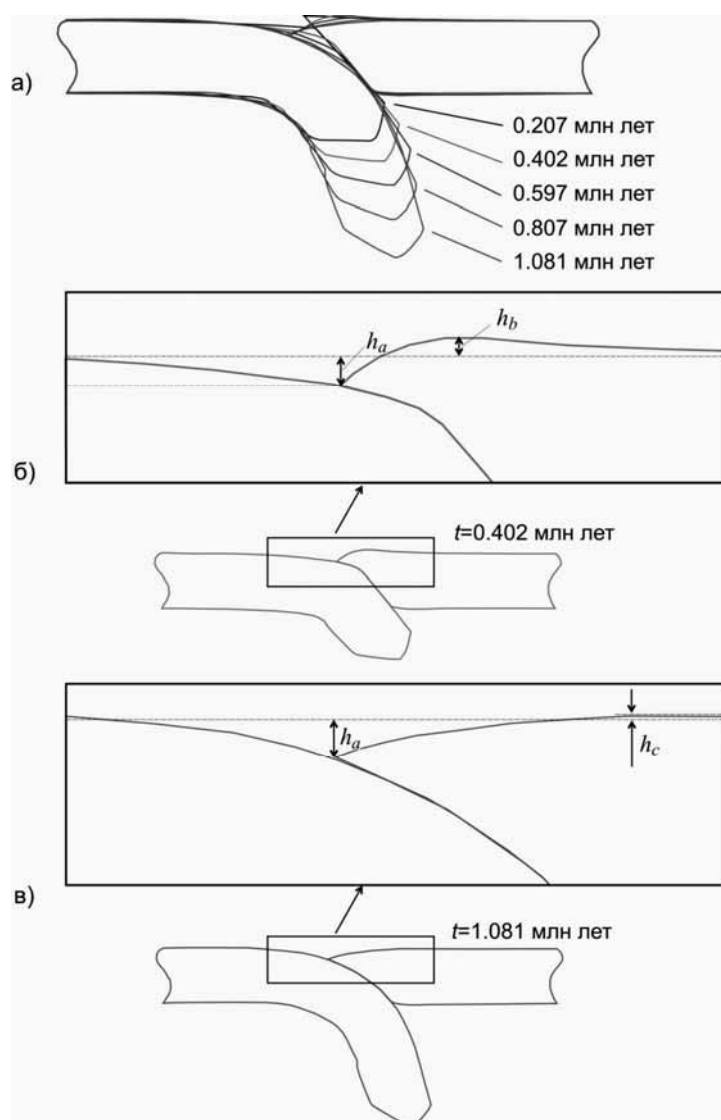


Рис. 6. Сценарий развития коллизии плит:  
 а – конфигурации деформированных плит в процессе их коллизии;  
 б, в – конфигурации деформированных плит при  $t = 0.402$  млн лет и при  $t = 1.081$  млн лет

### Библиографический список

1. Bathe K.-J. Finite Element Procedures. – New Jersey, Upper Saddle River, 1996.
2. Zeinkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. – Oxford, 2000.
3. Marc Users Guide. Vol. A: Theory and User Information. – Santa Ana, 2010.
4. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. – Новосибирск, 2000.