

УДК 551.253; 551.251

## ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЯ ЗА СЧЁТ ТРЕНИЯ В СДВИГОВЫХ ЗОНАХ КОРЫ КАК ФАКТОР МЕТАМОРФИЗМА И АНАТЕКСИСА: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. Бабичев<sup>1,\*</sup>, академик РАН В. В. Ревердатто<sup>1</sup>, О. П. Полянский<sup>1</sup>,  
И. И. Лиханов<sup>1</sup>, А. Н. Семенов<sup>1</sup>

Поступило 11.12.2018 г.

С помощью математического моделирования была сделана оценка эффекта тепловыделения за счёт трения в разломах в условиях сдвига и надвига, разработаны 3D- и 2D-термомеханические численные модели. Решались уравнения механики деформируемого твёрдого тела (МДТТ) в связанной постановке: уравнения механического равновесия и уравнения теплопроводности. Использована модель упругопластического материала с функцией текучести Друкера–Прагера и Хубера–Мизеса. Для трёхмерной модели сдвига разогрев составил 100–110 °С, для величины коэффициента трения 0,3, для значения 0,5 180–190 °С и для 0,65 около 300 °С. В задачах горизонтального надвига разогрев в зоне контакта составил 120–130 °С при глубине плоскости смещения 20 км и 150–160 °С при глубине 30 км для коэффициента трения 0,3. Полученные результаты можно рассматривать как нижнюю оценку величины фрикционной теплогенерации пород Приенисейской коллизионно-сдвиговой зоны.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, трение, метаморфизм, фрикционная теплогенерация, надвиг.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866704-708>

Эффект тепловыделения за счёт трения в зонах локализованной деформации до сих пор остается остро дискуссионной проблемой. Процесс преобразования механической работы в тепло характерен для сдвиговых поясов и проявлен в широком спектре условий метаморфизма: от зеленосланцевой фации до ультраметаморфизма и анатексиса. Оценки тепловыделения различаются в несколько раз: от первых десятков градусов [1] до нескольких сотен градусов, вплоть до условий ультравысокотемпературного метаморфизма (УНТ) и частичного плавления [2, 3].

Для оценки эффекта тепловыделения за счёт трения в разломах в условиях сдвига и коллизии разработаны 3D- и 2D-термомеханические численные модели. Цель моделирования состоит в определении величины нагрева и размеров температурных аномалий вблизи контакта блоков, разделённых односторонним разломом.

В качестве примера исследования рассмотрена Приенисейская региональная сдвиговая зона (ПРСЗ) в пределах северной части Енисейского кряжа [4]. Она связана с Байкало-Енисейским глубинным разломом, протягиваясь вдоль западной окраины Сибирского кратона на 200 км при ширине 30–50 км

(рис. 1). Её структура представляет собой систему субпараллельных разломов с проявлениями приразломного катаклаза, меланжирования и динамометаморфизма [5]. Множественные сдвиги в приразломных полях пластичных деформаций сопровождаются формированием мощных зон бластомилонитов. Формирование основной массы бластомилонитов происходило с повышением температуры на 180–240 °С при градиенте  $dT/dH=15–20$  °С/км в породах метабазит-ультрабазитового блока, залегающих внутри зоны серпентинитового меланжа (рис. 1).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

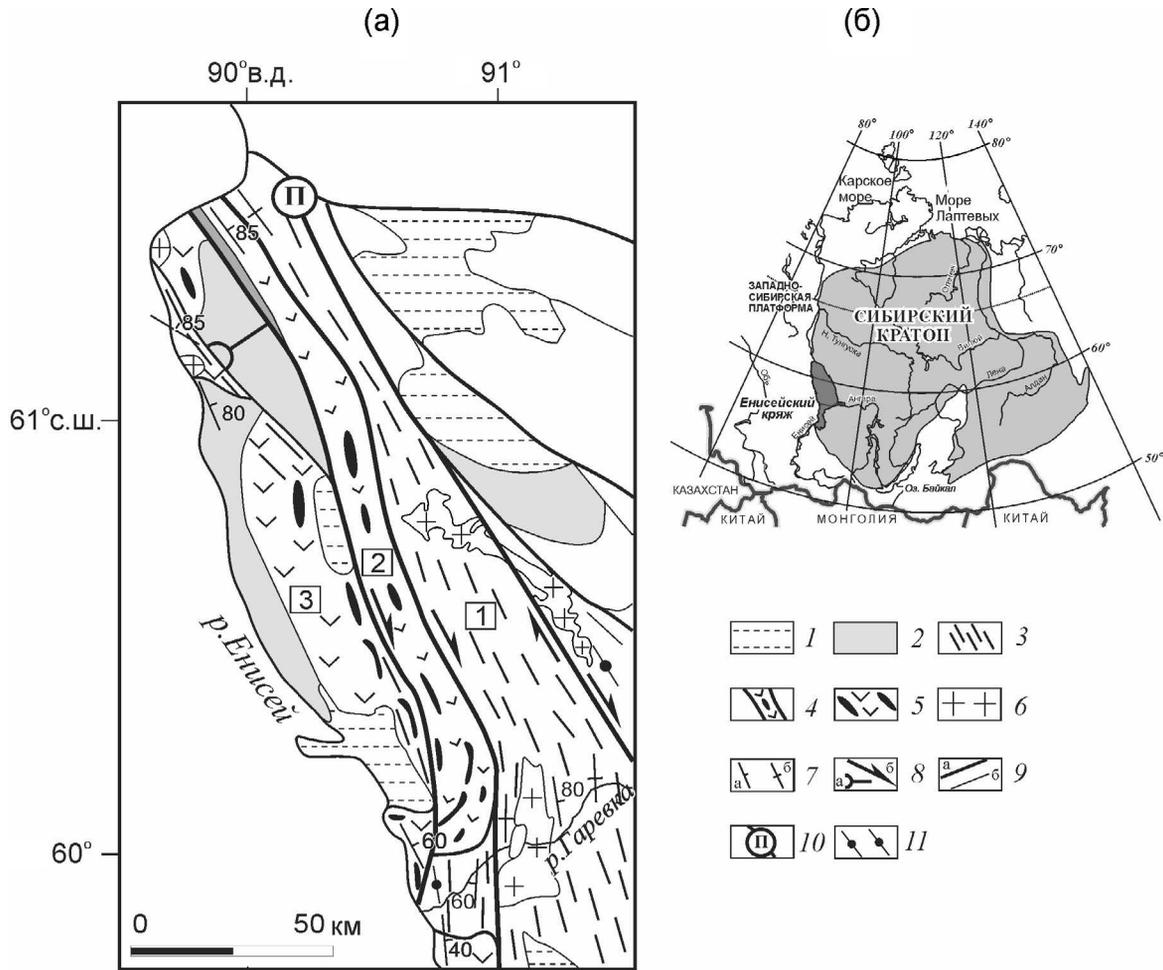
В работе были рассмотрены два подхода: трёхмерная задача тепловыделения при сдвиге двух блоков, (рис. 2а) и двухмерная задача надвига вдоль горизонтальной плоскости, расположенной на глубине 20 или 30 км (рис. 2 б, в). Решались уравнения механики деформируемого твёрдого тела в связанной постановке. Подробно о методе и параметрах модели указано в [6–8]. В задаче сдвига двух блоков с вертикальным контактом (рис. 2а) использована модель упругопластического материала Друкера–Прагера с функцией текучести

$$F^d(s) \equiv \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}},$$

где  $J_1, J_2$  — инварианты тензора напряжений  $s$ , параметры функции текучести  $\alpha=0,123$ ,  $\sigma_y=14,2$  МПа, что соответствует параметрам пород верхней коры.

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского Отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск

\* E-mail: babichev@igm.nsc.ru



**Рис. 1.** Схема (а) и положение Приенисейской региональной сдвиговой зоны на западной окраине Сибирского кратона (б). Тектонические блоки (цифры в квадратах):

1 – континентальный гнейсо-амфиболитовый, 2 – метабазит-ультрабазитовый, 3 – вулканоплутонический [4].  
 Условные обозначения: 1 – чехол (Pz–Cz); 2 – молассы (NP<sub>2-3</sub>); 3 – бластомилониты по породам гаревского комплекса; 4 – высокобарические метабазит-ультрабазитовые и апогнейсовые бластомилониты; 5 – метадацит-андезит-базальтовые и молассовые комплексы Исаковского террейна; 6 – гранитоидные комплексы; 7 – элементы залегания сланцеватости: а – наклонные, б – вертикальные; 8 – направление тектонических движений: а – поддвиги, б – сдвиги; 9 – тектонические нарушения: а – разломы, б – прочие границы; 10 – Приенисейский разлом; 11 – ставролит-гранат-кианитовые тектониты.

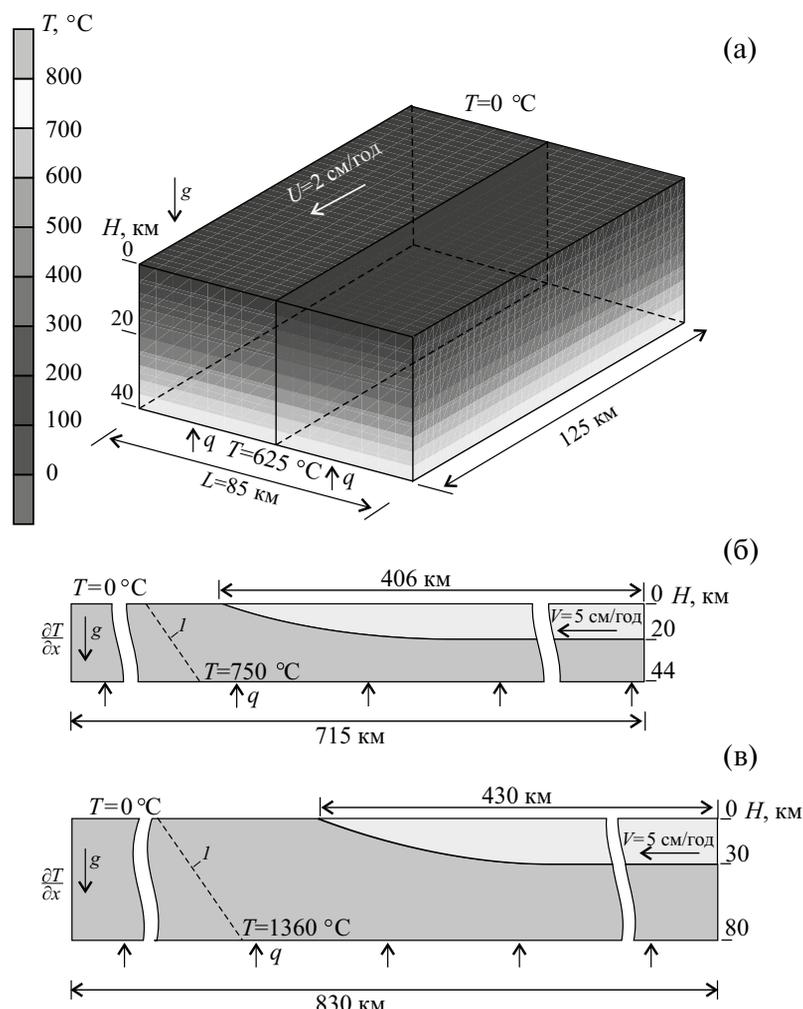
В задаче надвига (рис. 2 б, в) была использована модель упругопластического материала Хубера–Мизеса

$$F^h(s) \equiv \sqrt{J_2} - \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}},$$

где предел текучести  $\sigma_y = 50$  МПа [9]. В обеих моделях учитывается контактное деформирование и разогрев при трении на бортах разлома. Условия на поверхности разлома удовлетворяют закону Кулона  $\sigma_t < \mu\sigma_n$  в режиме прилипания,  $\sigma_t = -\mu\sigma_n \cdot t$  в режиме скольжения, где  $\sigma_t, \sigma_n, \mu, t$  – касательное, нормальное напряжение, коэффициент трения и касательный вектор. При учете нагрева при трении

тепловой поток в обе стороны от контакта равен  $Q = \gamma\mu\sigma_n u$ , где  $u$  – перемещение, параметр  $\gamma \approx 0,9$  определяет степень преобразования механической энергии в тепло.

Для большинства пород, изученных в лабораторных условиях, коэффициент трения близок к  $\mu = 0,85$ . С другой стороны, оценки сдвиговых напряжений на реальных разломах сдвигового (Сан-Андреас) и субдукционного типов (Тайвань) говорят о весьма низком трении на разломах:  $\mu = 0,17-0,25$  для разлома Сан-Андреас [10] и менее 0,1 для субдукции [11]. В работе варьировался коэффициент трения в 3D-модели в диапазоне 0,3–0,65, в задаче о сдвиге он принят 0,3.



**Рис. 2.** Постановка задачи теплогенерации в результате трения на разломе.

а) Трёхмерная задача сдвига двух блоков вдоль вертикальной плоскости, постоянный тепловой поток  $q=0,03$  Вт/м<sup>2</sup>. Левый блок движется вдоль плоскости разлома со скоростью 2 см/год, боковая поверхность правого блока зафиксирована. б), в) Задача надвига вдоль горизонтальной плоскости на глубине 20 и 30 км. Блоки, выделенные светлым тоном, движутся в горизонтальном направлении со скоростью 5 см/год. Кривая 1 — начальное распределение температуры.

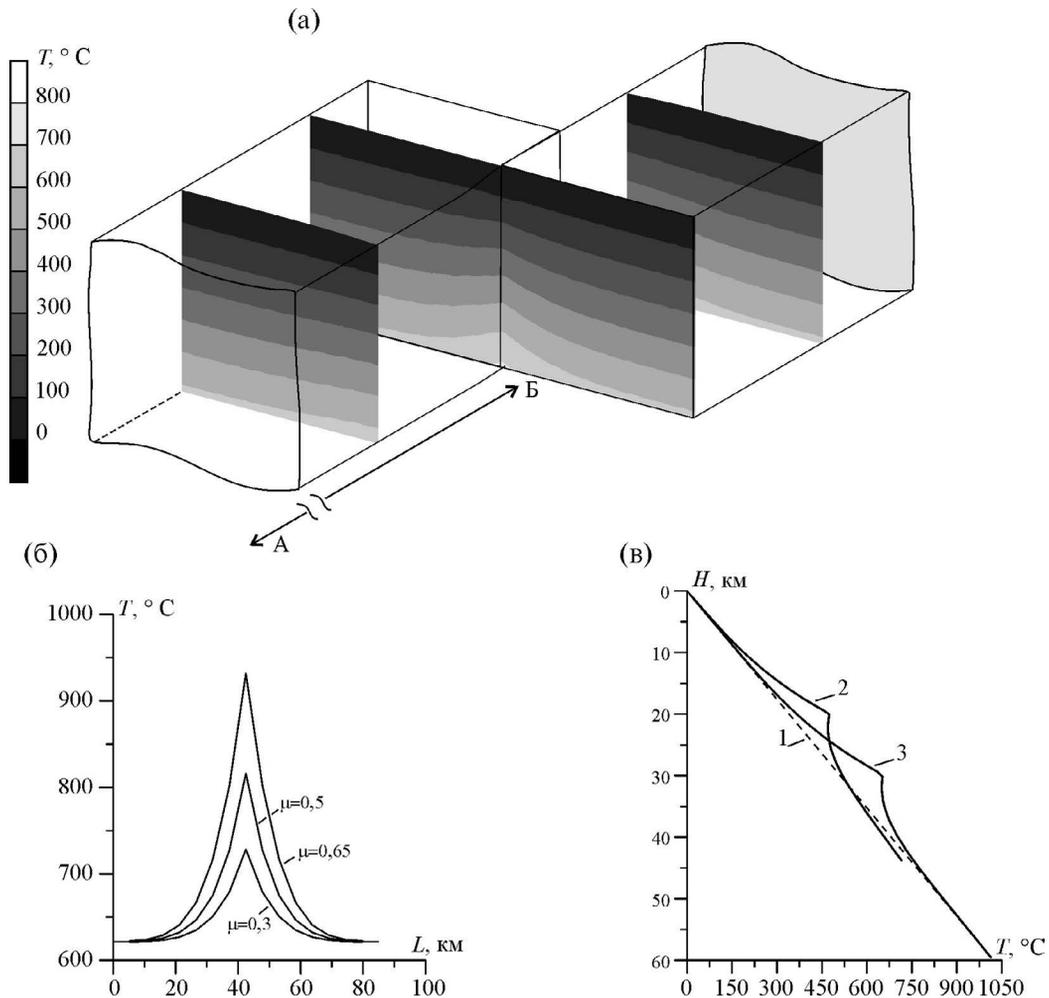
## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 а, б представлены результаты задачи сдвига в 3D-постановке на момент времени 5 млн лет, при сдвиге 100 км. Вблизи разлома в нижней коре наблюдается локальный разогрев. На рис. 3б представлено распределение температуры поперёк разлома для различных значений коэффициента трения 0,3–0,65. Для модели сдвига максимальный разогрев составил 100–110 °С при коэффициенте трения 0,3, 180–190 °С при 0,5 и около 300 °С при 0,65. 3D-модель показала, что размеры температурной аномалии на глубине 40 км составляют от 30 до 45 км по горизонтали при вариации коэффициента трения от 0,3 до 0,65, соответственно (рис. 3б).

На рис. 3в представлены результаты расчётов задачи надвига в постановке плоских деформаций.

Разогрев в зоне контакта составил 120–130 °С при глубине плоскости надвига 20 км и 150–160 °С при глубине 30 км. Модель показала, что при перемещении аллохтона на 100 км, вертикальный размер зоны нагрева может составлять 8–10 км (рис. 2в). Максимальное превышение температуры над фоновой в зоне контакта составляет 130 °С для модели надвига на глубине 20 км и 160 °С для модели надвига на 30 км.

Магматические источники тепла в Приенисейской сдвиговой зоне (син- и постколлизийные граниты с возрастом 760–750 (Аяхтинские) и 750–720 (Глушихинские), млн лет не могут рассматриваться в качестве причины образования более поздних высокотемпературных и высокобарических минеральных ассоциаций [12, 13]. По этой же при-



**Рис. 3.** Результаты моделирования задачи тепловыделения на контакте блоков в 3-мерной (а, б) и 2-мерной постановке (в): а — распределение температур спустя 5 млн лет при сдвиге (смещение 100 км); б — кривые зависимости температуры от ширины модели  $L$  в точке Б на момент времени 5 млн лет (смещение 100 км) и значения  $\mu$ ; в — кривые распределения температуры с глубиной для величины горизонтального сдвига 100 км в задачах о надвиге. 1 — начальное распределение температуры, 2 — распределение температуры в случае глубины разлома 20 км, 3 — в случае глубины 30 км.

чине не может рассматриваться в качестве теплового источника тепловыделение за счёт концентрации радиогенных элементов в зоне Татарско-Ишимбинских разломов [14]. Альтернативным источником может являться тепло трения в сдвиговых разломах [15], либо тепловыделения при вязких деформациях в зонах пологих надвигов [3].

Путем перебора параметров найдено, что наиболее удовлетворительными являются значения длительности сдвига 5 и 2 млн лет и скорости сдвига 2 и 5 см/год, соответственно. Принимая во внимание геологические оценки коэффициента трения 0,17–0,25 [10], можно заключить, что тепловыделение с учётом трения не повышает температуру в зоне разлома до условий частичного плавления метapelитов. Возможно, метapelиты и мигматиты Гаревского метаморфического комплекса Приени-

сейской сдвиговой зоны испытали воздействие тепла трения на уровне амфиболитовой фации (570–600 °C). По-видимому, этим объясняется низкотемпературные преобразования мигматитов (бластомилонитизация) и отсутствие признаков плавления. Применяя геотермометрические определения температур метаморфизма в качестве реперных, можно оценить величину коэффициента трения. В Гаревском метаморфическом комплексе коэффициент трения, по-видимому, не превышал 0,3. Модели учитывают только фрикционное тепло на контакте блоков и не рассматривают диссипацию тепла при вязком течении. Поэтому, полученные результаты можно рассматривать как нижнюю оценку величины термомеханического разогрева пород Приенисейской коллизионно-сдвиговой зоны.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при поддержке программы Президиума СО РАН № 53, гранта РФФИ 17–05–00848 и в рамках госзадания ИГМ СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mori H., Wallis S., Fujimoto K., Shigematsu N. // *Island Arc*. 2015. V. 24. P. 425–446.
2. Strong D.F., Hanmer S.K. // *Canad. Mineral*. 1981. V. 19. P. 163–176.
3. Nabelek, P. I., Whittington A. G., Hofmeister A. M. // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. B12417. DOI: 10.1029/2010JB007727.
4. Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Савко К.А. // *Геотектоника*. 2018. Т. 52. № 1. С. 28–51.
5. Likhanov I.I., Régnier J.-L., Santosh M. // *Lithos*. 2018. V. 304–307. P. 468–488.
6. Полянский О.П., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Бабичев А.В., Ревердатто В.В. // *Петрология*. 2010. Т. 18. №4. С. 450–466.
7. Полянский О.П., Коробейников С.Н., Бабичев А.В., Ревердатто В.В., Свердлова В.Г. // *Физика Земли*. 2014. № 6. С. 124–137.
8. Коробейников С.Н. *Нелинейное деформирование твердых тел*. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2000. 262 с.
9. Бабичев А.В., Новиков И.С., Полянский О.П., Коробейников С.Н. // *Геология и геофизика*. 2009. № 50. №2. С. 137–151.
10. Bird P., Kong X. // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1994. V. 106(2). P. 159–174.
11. Barr T.D., Dahlen F.A. // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № 4. P. 3923–3947.
12. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Полянский О.П., Травин А.В. // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. №5. С. 576–594.
13. Ревердатто В.В., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Полянский О.П. // *ДАН*. 2010. Т. 430. № 6. С. 802–805.
14. Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Полянский О.П., Лаевский Ю.М., Матушкин Н.Ю., Воронин К.В. // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. №1. С. 32–50.
15. He J., Lu Sh., Wang X. // *J. of Asian Earth Sciences*. 2009. V. 34. P. 363–375.

## HEAT GENERATION DUE TO FRICTION IN THE SHEAR CRUST ZONES AS A FACTOR OF METAMORPHISM AND ANATEXIS: THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION

A. V. Babichev, Academician of the RAS V. V. Reverdatto, O. P. Polyansky,  
I. I. Likhanov, A. N. Semenov

*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

Received December 11, 2018

The heat release effect was estimated due to friction in faults under shear and thrust conditions by mathematical modeling, 3D and 2D thermomechanical numerical models were developed. The equations of solid mechanics in a coupled formulation were solved: the equations of mechanical equilibrium and the equation of heat transfer. The model of an elastic-plastic material with the Drucker–Prager and Huber–Mises yield function is used. For the 3D shear model, the heating was 100–110 °C for the value of the friction coefficient 0.3, 180–190 °C for 0.5, about 300 °C for 0.65. In models of horizontal thrust, the heating in the contact zone was 120–130 °C with a depth of shear plane of 20 km and 150–160 °C with a depth of shear plane of 30 km for a friction coefficient of 0.3. The results obtained can be considered as a lower estimate of the heating in the Yenisei collision-shear zone.

*Keywords:* mathematical modeling, friction, metamorphism, shear heating, thrust.