

УДК 552.4+552.11

ДИССИПАТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИТОИДОВ ПОСОЛЬНЕНСКОГО МАССИВА ЮЖНО-ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

**А. Н. Семенов^{1*}, О. П. Полянский¹, С. В. Зиновьев¹, Н. В. Попов²,
А. Д. Ножкин¹**

¹ Институт геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090), *semenov@igm.nsc.ru

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090)

Представлены результаты 3D численного термомеханического моделирования процессов формирования докембрийского гранитоидного Посольненского массива, расположенного в пределах Ангаро-Канского блока Южно-Енисейского кряжа. Геологические и геохронологические данные (U-Pb и ⁴⁰Ar/³⁹Ar) свидетельствуют о полихронной природе массива, включающей как древние (~1,8 млрд лет) гранитоиды, так и более молодые (~500 млн лет) субщелочные граниты и сиениты. На основе анализа структурно-геологических и геохимических особенностей выделены два основных этапа развития массива. Первый этап связан с формированием автохтонных гранитоидов за счет диссипативного нагрева в условиях интенсивных сдвиговых деформаций в Посольненско-Кузеевской тектонической зоне. Моделирование показало, что при скорости сдвига не менее 2 см/год и на глубинах свыше 35 км диссипация энергии деформации могла привести к локальному плавлению корового вещества, обеспечивая образование гранитных расплавов. Второй этап характеризуется внедрением высокотемпературных магм субщелочного состава, для генерации которых требовались температуры выше 800 °С, недостижимые при диссипативном нагреве. Основным источником тепла, вероятно, послужили мантийные магмы, внедренные при андерплейтинге. Таким образом, формирование Посольненского массива объясняется комбинацией коровых процессов, обусловленных вязкими деформациями, и мантийного теплового воздействия, что подчеркивает многопричинный характер гранитоидного магматизма в коллизионных поясах.

Ключевые слова: Посольненско-Кузеевская тектоническая зона; Южно-Енисейский кряж; вязкие деформации; U-Pb- и ⁴⁰Ar/³⁹Ar-возраст; диссипация тепла

Для цитирования: Семенов А. Н., Полянский О. П., Зиновьев С. В., Попов Н. В., Ножкин А. Д. Диссипативный механизм формирования гранитоидов Посольненского массива Южно-Енисейского кряжа // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 138–142. doi: 10.17076/geo2174

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-77-20018-П и частично по государственному заданию ИГМ СО РАН FWZN-2026-0016 (отбор образцов), FWZN-2026-0018 (выделение цирконов), ИНГГ СО РАН FWZZ-2026-0042 (геологическая интерпретация).

**A. N. Semenov^{1*}, O. P. Polyansky¹, S. V. Zinoviev¹, N. V. Popov¹,
A. D. Nozhkin¹. DISSIPATIVE MECHANISM OF THE POSOLNENSKIY
GRANITOID MASSIF GENERATION, SOUTH YENISEY RIDGE**

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptuyug Ave., 630090, Novosibirsk, Russia), *semenov@igm.nsc.ru
² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptuyug Ave., 630090, Novosibirsk, Russia)

This paper presents the results of 3D numerical thermomechanical modeling of formation processes of the Precambrian Posolnenskiy granitoid massif located within the Angara-Kansk block of the South Yenisey Ridge. Geological and geochronological data (U-Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar) indicate the polychronous nature of the massif, including both ancient (~1.8 Ga) granitoids and younger (~500 Ma) subalkaline granites and syenites. Based on an analysis of structural-geological and geochemical features, two main stages have been identified in the massif's evolution. The first stage is associated with the formation of autochthonous granitoids due to dissipative heating under shear deformation conditions in the Posolnenskiy-Kuzeevskiy tectonic zone. Modeling showed that at shear rates of at least 2 cm/yr and at depths greater than 35 km, the energy dissipation could have led to localized melting of crustal material, facilitating the formation of granitic melts. The second stage is characterized by the intrusion of high-temperature subalkaline magmas, the generation of which requires temperatures above 800 °C, unattainable through dissipative heating. Consequently, the likely primary heat source was mantle magmas injected during underplating. Thus, the formation of the Posolnenskiy Massif is explained by a combination of crustal processes driven by viscous deformations and mantle thermal influence, emphasizing the multifactorial nature of granitoid magmatism in collisional belts.

Keywords: Posolnenskiy-Kuzeevskiy tectonic zone; South Yenisey Ridge; viscous deformations; U-Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar age; dissipative heat

For citation: Semenov A. N., Polyansky O. P., Zinoviev S. V., Popov N. V., Nozhkin A. D. Dissipative mechanism of the Posolnenskiy granitoid massif generation, South Yenisey Ridge. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. doi: 10.17076/geo2174

Funding. The study was funded by the Russian Science Foundation grant #21-77-20018-P with co-funding provided under state assignments to the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS FWZN-2026-0016 (sampling), FWZN-2026-0018 (zircon isolation), and to the Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS FWZZ-2026-0042 (geological interpretation).

В немногочисленных исследованиях роли тепловыделения при деформациях и трении в природных системах вопрос об источнике тепла в сдвиговых зонах и коллизионных орогенах часто остается дискуссионным [Чиков и др., 1988; Polyansky et al., 2021 и ссылки в ней]. Результаты моделирования в сравнении с геологическими данными о степени метаморфизма и масштабе деформаций Приенисейской региональной сдвиговой зоны Северо-Енисейского кряжа показали, что для формирования метаморфических комплексов диссипативный нагрев являлся тепловым источником, однако условия плавления метапелитов в верхней коре не достигались [Polyansky et al., 2021].

Природным объектом, в котором предполагается роль процессов вязко-диссипативного нагрева вплоть до плавления, является

Посольненско-Кузеевская тектоническая зона Ангаро-Канского блока Южно-Енисейского кряжа. Один из гранитоидных массивов этой зоны – Посольненский – расположен в северной части Южно-Енисейского кряжа среди метаморфических толщ енисейского комплекса (рис. 1). Площадь выхода массива на дневную поверхность составляет около 120 кв. км. Вмещающие породы представлены двуслюдяными гнейсами исаевской толщи с прослоями амфиболитов.

Имеются следующие возрастные датировки пород, относящихся к Посольненскому массиву и составляющих его комплексов: 1) амфибол-биотитовый порфиробластический гнейсогранит $1789,8 \pm 8,9$ млн л. (циркон, SHRIMP-II), 2) из того же образца $544,2 \pm 7,6$ млн л. (амфибол, Ar–Ar) и $544,5 \pm 1,3$ млн л. (биотит, Ar–Ar) [Popov et al., 2020]; 3) субщелочной

гранит А-типа 511 ± 9 млн л. (циркон, U–Pb) и $485,6 \pm 4,6$ млн лет (биотит, Ar–Ar) [Vernikovskaya et al., 2004]. Различие в возрасте более 1 млрд лет и контрастный состав пород разных комплексов позволяет говорить о самостоятельных этапах формирования структуры массива и рассматривать его как полихронный [Porov et al., 2020]. Исходя из структурно-геологических и геохимических различий, причины магмообразования на разных этапах, очевидно, принципиально отличались.

В данной работе нами выполнено моделирование разных механизмов, отвечающих за самостоятельные стадии развития Посольненского массива. Рассматривались два механизма формирования гранитоидов: (1) за счет

диссипативного тепловыделения при трении в процессе деформаций в реологически неоднородной сдвиговой зоне вязко-пластического течения и бластомилонитизации; (2) механизм плавления корового вещества под воздействием высокотемпературной мантийной магмы, внедрившейся в область основания коры (андерплейтинга).

Результаты моделирования тепловыделения при трении в процессе деформаций показывают (рис. 2), что в случае диссипативного нагрева плавление могло происходить только на самых глубинных уровнях коры более 35 км и при высоких скоростях сдвига (не менее 2 см/год). Как следует из моделирования, нагрев локализован в области коры,

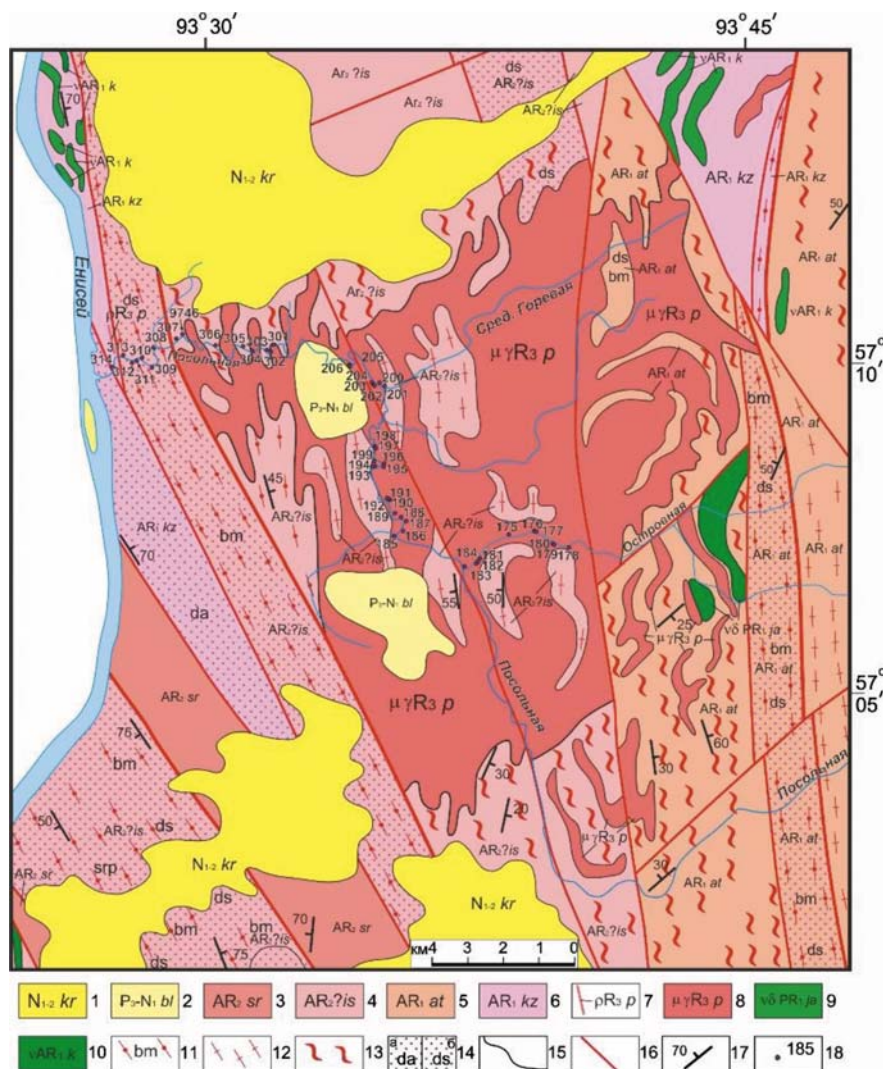


Рис. 1. Строение Посольненского массива по данным карты [Государственная..., 2002]. Показаны точки отбора образцов

Fig. 1. Structure of the Posolsky massif derived from the map [State..., 2002], with the sampling points

где породы подвержены наибольшему вязким деформациям и поддерживаются высокие напряжения. Для стационарного состояния при скорости сдвига 2 см/год нагрев за счет диссипации тепла составляет не менее 200–220 °С.

Таким образом, можно рассматривать Посольненский массив как полифазный, в развитии которого выделяется два эпизода: (1) этап формирования автохтонных гранитоидов за счет механизма диссипативного нагрева при сдвиговых деформациях и (2)

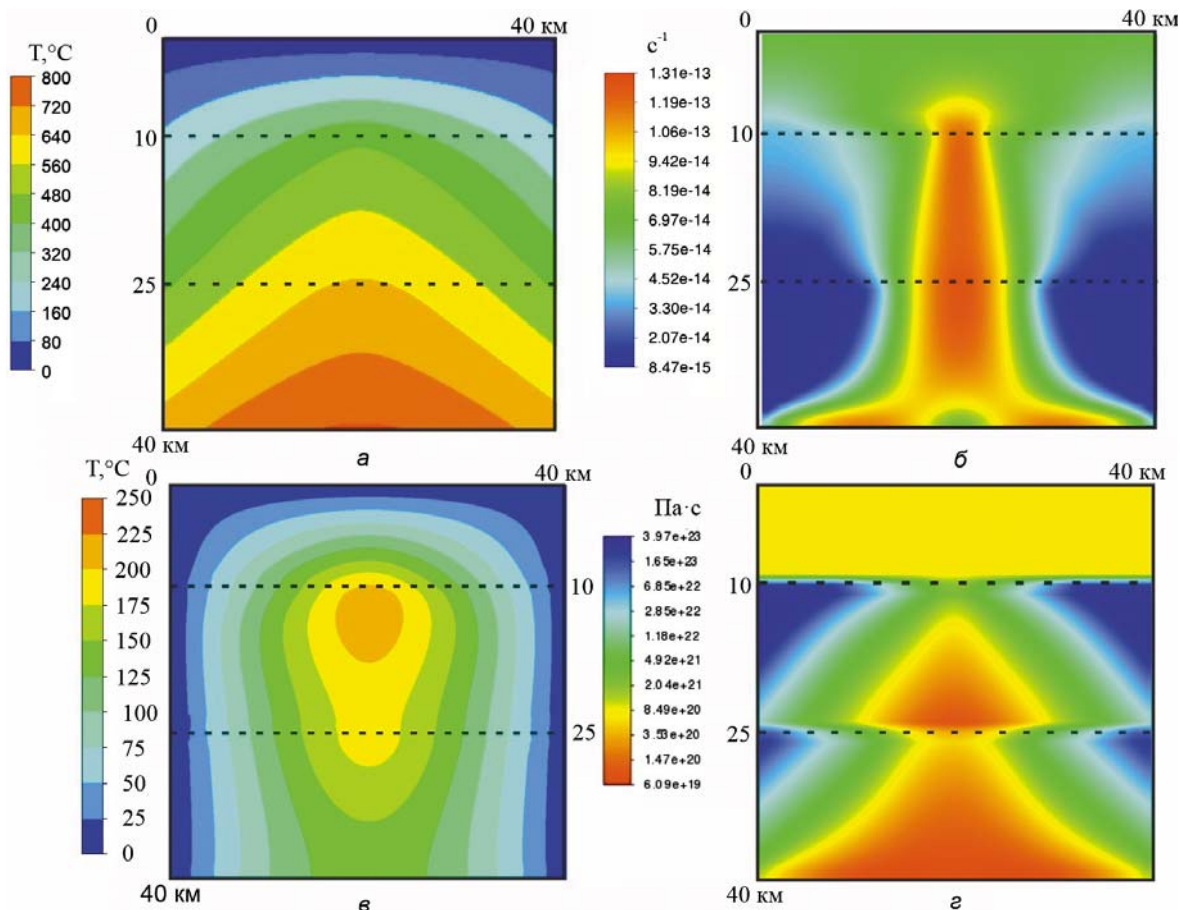


Рис. 2. Результаты 3D-моделирования с учетом плавления и вязкостной диссипации в сдвиговой зоне шириной 40 км при трехслойной структуре коры. Показан разрез поперек зоны сдвига. Правая и левая границы модели перемещаются со скоростью 2 см/год в противоположных направлениях: а – температура с учетом диссипативного нагрева; б – скорость деформации; в – приращение температуры; г – распределение вязкости

Fig. 2. Results of 3D modeling with consideration of melting and viscous dissipation within a 40-km wide shear zone with a three-layer crustal structure. A cross-section across the shear zone is shown. The right and left model boundaries move at a rate of 2 cm/year in opposite directions: а – temperature with account for dissipative heating; б – strain rate; в – temperature increment; г – viscosity distribution

интрузивное внедрение более высокотемпературных фаз, к которым принадлежат магмы сиенитового и субщелочного состава, присутствующие в небольшом количестве в составе Посольненского массива. Для формирования сиенитовых магм требовалась температура более 800 °С [Полянский и др., 2017] – суще-

ственно выше, чем достигалась при диссипативном нагреве. Поэтому предполагаем, что при формировании этих пород в качестве дополнительного теплового источника генерации сиенитовой магмы основную роль играли магматические источники тепла мантийного происхождения.

Литература

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Енисейская. Лист О-46-XXVIII Бол. Мурта / Ред. Л. К. Качевский. М.: ВСЕГЕИ, 2002. 217 с.

Полянский О. П., Семенов А. Н., Владимиров В. Г., Кармышева И. В., Владимиров А. Г., Яковлев В. А. Численная модель магматического минглинга (на примере Баянкольской габбро-гранитной серии, Сангилен, Тува) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 2. С. 385–403. doi: 10.5800/GT-2017-8-2-0247

Чиков Б. М., Зиновьев С. В., Подцибастенкова Е. А. Морфологические типы структур течения в бластомилонитах Иртышской зоны смятия // Геология и геофизика. 1988. № 2. С. 11–14.

Polyansky O. P., Babichev A. V., Semenov A. N., Reverdatto V. V. Modelling heat generation during friction and viscoplastic deformation based on the example of the Yenisei shear zone (Eastern Siberia) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021. Vol. 12(4). P. 909–928. doi: 10.5800/GT-2021-12-4-0563

Popov N. V., Likhonov I. I., Reverdatto V. V., Savko K. A. Proterozoic granitoid magmatism at the southwestern margin of the Siberian platform in the tectonic history of the Angara–Kan block // *Doklady Earth Sciences*. 2020. Vol. 490(2). P. 81–86. doi: 10.1134/S1028334X20020129

Vernikovskaya A. E., Vernikovskiy V. A., Yasenov A. M., Datsenko V. M., Sal'nikova E. B., Kovach V. P., Kotov A. B., Travin A. V. Manifestation of early paleozoic magmatism in the south Yenisei ridge // *Doklady Earth Sciences*. 2004;397(6):747–752.

Поступила в редакцию / received: 31.07.2025; принята к публикации / accepted: 27.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Семенов Александр Николаевич

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник

e-mail: semenov@igm.nsc.ru

Полянский Олег Петрович

д-р геол.-мин. наук, заведующий лабораторией

e-mail: pol@igm.nsc.ru

Зиновьев Сергей Валентинович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

e-mail: zinoviev@igm.nsc.ru

Попов Николай Васильевич

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

e-mail: PopovNV@ipgg.sbras.ru

Ножкин Александр Дмитриевич

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: nozhkin@igm.nsc.ru

References

Chikov B. M., Zinov'ev S. V., Podtsibastenkova E. A. Morphological types of flow structures in blastomylonites of the Irtysh shear zone. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*. 1988;2:11–14. (In Russ.)

Kachevskii L. K. (ed.). State geological map of the Russian Federation at a scale of 1:200,000. Series Yenisei. Sheet O-46-XXVIII Bolshemurtinsky. Moscow: VSEGEI; 2002. 217 p. (In Russ.)

Polyansky O. P., Babichev A. V., Semenov A. N., Reverdatto V. V. Modelling heat generation during friction and viscoplastic deformation based on the example of the Yenisei shear zone (Eastern Siberia). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021;12(4):909–928. doi: 10.5800/GT-2021-12-4-0563

Polyansky O. P., Semenov A. N., Vladimirov V. G., Karmysheva I. V., Vladimirov A. G., Yakovlev V. A. Numerical simulation of magma mingling (case of Bayankol gabbro-granite series, Sangilen, Tuva). *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2017;8(2):385–403. (In Russ.). doi: 10.5800/GT-2017-8-2-0247

Popov N. V., Likhonov I. I., Reverdatto V. V., Savko K. A. Proterozoic granitoid magmatism at the southwestern margin of the Siberian platform in the tectonic history of the Angara–Kan block. *Doklady Earth Sciences*. 2020;490(2):81–86. doi: 10.1134/S1028334X20020129

Vernikovskaya A. E., Vernikovskiy V. A., Yasenov A. M., Datsenko V. M., Sal'nikova E. B., Kovach V. P., Kotov A. B., Travin A. V. Manifestation of early paleozoic magmatism in the south Yenisei ridge. *Doklady Earth Sciences*. 2004;397(6):747–752.

CONTRIBUTORS:

Semenov, Alexander

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher

Polyansky, Oleg

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory

Zinoviev, Sergey

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Popov, Nikolai

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Nozhkin, Alexander

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher